

## Самоочистительная способность экосистемы Ялтинского порта в отношении неорганических форм азота за 2012–2022 годы

И. В. Мезенцева<sup>1</sup>, Е. Е. Совга<sup>2\*</sup>, Т. В. Хмара<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Севастопольское отделение Государственного океанографического  
института им. Н. Н. Зубова, Севастополь, Россия

<sup>2</sup> Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

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

### Аннотация

По результатам многолетнего мониторинга гидрохимических показателей акватории Ялтинского порта за 2012–2022 гг. сформирована база данных о концентрации биогенных элементов и растворенного кислорода за указанный период. Для исследуемой акватории показана динамика содержания биогенных элементов и выделены неорганические формы азота (нитриты, нитраты, аммоний) как приоритетные загрязняющие вещества в экосистеме порта. Оценка самоочистительной способности экосистемы акватории Ялтинского порта выполнена путем расчета балансовым методом величины удельной ассимиляционной емкости ( $AE_{уд}$ ) в отношении нитратов, нитритов и аммония. Рассчитаны также скорости и время удаления этих неорганических форм азота из указанной экосистемы. Проанализированы полученные значения  $AE_{уд}$  для экосистемы акватории Ялтинского порта за два периода: 2012–2017 и 2018–2022 гг. Показано, что в отношении нитратов наблюдается увеличение  $AE_{уд}$  от 31.49 до 36.07 мкг/(л·сут) за указанные периоды соответственно. Такая же зависимость установлена для нитритов: изменение  $AE_{уд}$  составило от 0.08 до 0.1 мкг/(л·сут). В отношении аммония за указанные периоды наблюдается обратная зависимость – уменьшение  $AE_{уд}$  от 8.67 до 7.56 мкг/(л·сут). Приведены результаты сравнения полученных значений  $AE_{уд}$  в отношении неорганических форм азота для экосистемы акватории Ялтинского порта с соответствующими показателями для экосистемы б. Севастопольской, которая характеризуется высокой антропогенной нагрузкой, подвержена влиянию стока рек и имеет затрудненный водообмен с открытым морем. Высказывается предположение, что причиной более высокой, чем у экосистемы б. Севастопольской, способности к самоочищению в отношении неорганических форм азота экосистемы Ялтинского порта (как части Ялтинского залива) является более интенсивный гидродинамический режим.

**Ключевые слова:** биогенные элементы, биогенный азот, экосистема, самоочистительная способность, ассимиляционная емкость, Ялтинский порт

© Мезенцева И. В., Совга Е. Е., Хмара Т. В., 2025



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

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН МГИ по теме FNNN-2024-0016 «Прибрежные исследования».

**Для цитирования:** Мезенцева И. В., Совга Е. Е., Хмара Т. В. Самоочистительная способность экосистемы Ялтинского порта в отношении неорганических форм азота за 2012–2022 годы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 3. С. 41–53. EDN ZFXLJK.

## Self-Purification Capacity of the Yalta Port Ecosystem in Relation to Inorganic Forms of Nitrogen for 2012–2022

I. V. Mezentseva<sup>1</sup>, E. E. Sovga<sup>2\*</sup>, T. V. Khmara<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sevastopol Branch of the N. N. Zubov State Oceanographic Institute, Sevastopol, Russia

<sup>2</sup> Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

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

### Abstract

A database of nutrients and dissolved oxygen for 2012–2022 was formed from long-term monitoring results of the hydrochemical indicators of the Yalta Port water area. The paper shows dynamics of nutrients for the studied water area and determines inorganic forms of nitrogen (nitrites, nitrates, ammonium) as priority pollutants in the port ecosystem. The self-purification capacity of the Yalta Port water ecosystem was assessed by calculating the specific assimilation capacity ( $AC_{sp}$ ) in relation to nitrates, nitrites and ammonium using the balance method. The rates and times of removal of these inorganic nitrogen forms from the mentioned ecosystem were calculated. The paper analyses the obtained  $AC_{sp}$  values for the Yalta Port water ecosystem for two periods (2012–2017 and 2018–2022). The study shows that for nitrates, there is an increase in  $AC_{sp}$  from 31.49 to 36.07  $\mu\text{g}/(\text{L}\cdot\text{day})$  for these periods, respectively. The same dependence was established for nitrites. For this nitrogen form, the change in  $AC_{sp}$  ranged from 0.08 to 0.1  $\mu\text{g}/(\text{L}\cdot\text{day})$ . As for ammonium, an inverse relationship was observed for these periods: a decrease in the  $AC_{sp}$  value from 8.67 to 7.56  $\mu\text{g}/(\text{L}\cdot\text{day})$ . The paper compares the obtained  $AC_{sp}$  values in relation to inorganic forms of nitrogen for the Yalta Port water ecosystem with similar values for the Sevastopol Bay ecosystem, which is under high anthropogenic load, affected by river runoff and has limited water exchange with the open sea. The more intensive hydrodynamic regime is suggested to account for the higher self-purification capacity in relation to inorganic forms of nitrogen in the Yalta Port ecosystem (as part of Yalta Bay) if compared with Sevastopol Bay.

**Keywords:** nutrients, biogenic nitrogen, ecosystem, self-purification capacity, assimilation capacity, Yalta Port

**Acknowledgements:** The study was performed under state assignment of MHI RAS on topic FNNN-2024-0016 “Coastal research”.

**For citation:** Mezentseva, I.V., Sovga, E.E. and Khmara, T.V., 2025. Self-Purification Capacity of the Yalta Port Ecosystem in Relation to Inorganic Forms of Nitrogen for 2012–2022. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 41–53.

## Введение

Прибрежные акватории Южного берега Крыма, в частности Ялтинский залив, как рекреационно-курортные зоны, испытывают значительную антропогенную нагрузку с ярко выраженной сезонностью.

Акватория морского порта Ялты с глубинами до 8.5 м является частью Ялтинского залива и ограничена гаванью с защитным молом. Она испытывает дополнительную техногенную нагрузку вследствие круглогодичной навигации в порту и стока горных рек. В результате в морских водах Ялтинского порта наблюдаются более высокие концентрации загрязняющих веществ, включая биогенные элементы (фосфаты, нитраты, нитриты, аммоний и кремний), по сравнению с аналогичными показателями в акватории всего Ялтинского залива.

Степень эвтрофикации водной среды определяется характером распределения биогенных соединений азота и фосфора, их сезонным и годовым ходом и степенью рециркуляции. Источниками поступающего в море неорганического азота (нитритов, нитратов и аммония) являются речные воды, бытовые и промышленные стоки, атмосферные осадки. Круговорот азота в поверхностном слое вод связан с нитрификацией  $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$  и аммонификацией  $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NH}_4^+$ .

К настоящему времени гидрологическим и гидрохимическим характеристикам прибрежных вод Южного берега Крыма, в том числе Ялтинского залива, посвящено множество исследований. В работе [1] представлена сводная информация о гидрометеорологических условиях прибрежной зоны Ялты, базирующаяся на всех имеющихся данных наблюдений с 1870 по 2003 г., а также о гидрохимическом режиме в 1986–2004 гг. В работе [2] сопоставляются гидрохимические характеристики двух акваторий (район Ялтинского порта и Ялтинский залив) на основе анализа годовой динамики концентраций биогенных веществ (азота  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{N}_{\text{общ}}$ , фосфора  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{P}_{\text{общ}}$  и кремния  $\text{SiO}_2$ ), а также растворенного кислорода ( $\text{O}_2$ ) и температуры воды в поверхностном слое за 1987–2004 и 2005–2010 гг. Представленные результаты показывают изменения в экологическом состоянии поверхностного слоя вод акватории порта Ялта в исследуемые периоды.

Поступление в Ялтинский залив значительных объемов биогенных и загрязняющих веществ (ЗВ) обусловлено стоком горных рек, таких как Дерикойка (Быстрая) с притоками, Учан-Су (Водопадная) с притоками, Люка (обеспечивающая водой Ялту) и др.<sup>1)</sup> Следует отметить, что, по данным [3, с. 61], «устье р. Водопадной и прилегающая акватория Ялтинского городского пляжа находятся в зоне экологического риска, поскольку в речной воде фиксируются повышенные содержания нитратов и нитритов, в морской воде – высокий уровень бактериального загрязнения кишечной палочкой (превышение санитарной нормы в пик курортного сезона в сотни раз)». Согласно данным<sup>1)</sup>, русловая, надпойменная и устьевая части р. Быстрой и прилегающей

---

<sup>1)</sup> Борисова Ю. Река Учан-Су // Плантиум. Растения и лишайники России и сопредельных стран : открытый онлайн атлас и определитель растений [Электронный ресурс]. URL: <https://www.plantarium.ru/page/landscapes/point/2563.html> (дата обращения: 29.08.2025).

акватории Ялтинского пассажирского морского порта находятся в зоне экологического риска. В речной воде зафиксировано повышенное содержание нитратов и нитритов. Сезонная динамика неорганических форм азота и фосфора в устьевой зоне р. Водопадной изучена в работе [4]. Исследования выявили, что в пресных водах устьевое участка концентрации азотных соединений, представленных нитритами (в 7.2 раза), аммонием (в 3.0 раза) и нитратами (в 62.9 раза), а также минерального фосфора (в 13.2 раза) значительно превышают их концентрации в морской воде устьевое взморья. Общая концентрация минеральных форм азота в речной воде оказалась в 27.9 раза выше, чем в морской.

В настоящее время в прибрежных водах Крыма значительно ограничен комплексный мониторинг фоновое состояние морской среды, особенно в акваториях, примыкающих к инфраструктуре грузопассажирского, рыболовецкого, военного флотов. Это затрудняет адекватную оценку базового состояния прибрежных вод Крыма.

Эффективность природного самоочищения морских экосистем определяется взаимообусловленными процессами, такими как поступление ЗВ, их депонирование в донные отложения и взаимодействие с морским аэрозолем, перераспределение ЗВ и его трансформация биотой, динамический вынос ЗВ за пределы акватории. В условиях интенсивной антропогенной нагрузки первым шагом на пути к нормализации экологического состояния мелководных морских акваторий является оценка их самоочистительной способности, выполненная путем расчета ассимиляционной емкости (АЕ) экосистемы в отношении приоритетного ЗВ или комплекса.

Разработанная Ю. А. Изразлем и А. В. Цибань [5] концепция АЕ, базирующаяся на результатах разносторонних океанологических исследований, была протестирована на экосистеме Балтийского моря для бенз(а)пирена, полихлорбифенилов и ряда токсичных металлов (Cu, Zn, Pb, Cd, Hg). Согласно работе [5], показатель АЕ характеризует способность морской экосистемы выдерживать добавление некоторого количества ЗВ без развития необратимых биологических последствий. АЕ имеет размерность потока вещества (масса вещества в единице объема, отнесенной к единице времени). Как показано в [6, 7], при использовании балансового метода расчета АЕ наибольшую сложность представляет вычисление интегрального времени пребывания ЗВ в исследуемой экосистеме. Эта величина в значительной степени зависит от физико-химических свойств конкретного ЗВ, гидродинамических параметров акватории и совокупности процессов (физических, химических, микробиологических), отвечающих за деструкцию ЗВ или его вынос за пределы исследуемой акватории.

Цель работы – по результатам многолетнего мониторинга биогенных элементов в водах акватории Ялтинского порта определить приоритетное ЗВ и оценить самоочистительную способность экосистемы путем расчета удельной АЕ ( $AE_{уд}$ ) в отношении неорганических форм азота ( $NO_3^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $NH_4^+$ ).

Следует отметить, что, согласно анализу литературных данных, для экосистемы акватории Ялтинского порта такой расчет осуществляется впервые.

### Материалы и методы исследования

Для достижения поставленной цели была сформирована база данных по акватории Ялтинского порта. Ее основу составили материалы ежегодников «Качество морских вод по гидрохимическим показателям» за 2018–2022 гг. ФГБУ «ГОИН»<sup>2)</sup> и материалы базы данных Морского гидрофизического института. Согласно работе<sup>2)</sup>, гидрохимические исследования биогенного комплекса выполняла Лаборатория мониторинга загрязнения окружающей среды г. Ялты (ЛМЗОС, ФГБУ «Крымское УГМС») по методикам, утвержденным в системе гидрохимического мониторинга Роскомгидромета<sup>3)</sup>.

Пробы отбирали в акватории порта Ялты в одной точке с глубиной 6 м у основания волнолома ежегодно с января по декабрь, стандартный гидрологический мониторинг проводили каждые десять дней. Рассмотрены тенденции в сезонной и многолетней динамике биогенных элементов и растворенного кислорода на фоне изменения температуры, солености вод поверхностного и придонного слоев акватории Ялтинского порта за 2018–2022 гг., дана оценка изменения экологической ситуации в акватории в сравнении с предыдущим периодом 2013–2017 гг. [8].

Анализируемая база данных составила 1920 определений содержания общего азота и фосфора, минеральных комплексов азота (нитритов, нитратов, аммония), фосфатов, кремния и растворенного кислорода, а также температуры и солености морских вод. Количество анализируемых проб и пределы концентраций представлены в табл. 1.

Характеристика базы данных за 2013–2017 гг. представлена в работе<sup>2)</sup>. В настоящем исследовании АЕ рассчитывали по балансовому методу, предложенному Ю. А. Израэлем и А. В. Цибань [6] и адаптированному авторами статьи для морских экосистем, в которых ведется государственный гидрохимический мониторинг [8], например в акватории б. Севастопольской в отношении неорганических форм азота и фосфора [9, 10]. Согласно [7], 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:

$$AE_{mi} = \bar{A}_{mi} \pm \sqrt{D[A_{mi}]}, \quad (1)$$

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

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

<sup>2)</sup> Качество морских вод по гидрохимическим показателям : ежегодник / под общей ред. А. Н. Коршенко. Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 2013–2024.

<sup>3)</sup> Руководство по химическому анализу морских вод. РД 52.10.243-92 : руководящий документ : утв. Решением Комитета по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Минэкологии РФ от 28.04.1992. Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 1993. 128 с.

Т а б л и ц а 1. Характеристика используемых данных за 2018–2022 гг.

Table 1. Characteristics of the used data for 2018–2022

Параметр / Parameter	ПДК / MPC	Среднее / Average	Максимум (% от ПДК) / Maximum (% of MPC)	Стандартное отклонение / Standard deviation
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , мкг/л / PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , µg/L	50	12	48 (96)	8.48
P <sub>общ</sub> , мкг/л / P <sub>tot</sub> , µg/L	–	54.9	172	34.76
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , мкг/л / NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , µg/L	24	3.7	15.4 (64)	2.80
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мкг/л / NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , µg/L	9032	140	953 (11)	201.77
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , мкг/л / NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , µg/L	389	18.6	104 (27)	14.27
N <sub>общ</sub> , мкг/л / N <sub>tot</sub> , µg/L	–	1157	4301	831.60
SiO <sub>2</sub> , мкг/л / SiO <sub>2</sub> , µg/L	368	265	1698 (461)	303.91
O <sub>2</sub> , %	–	91	109	6.49
Соленость, ‰ / Salinity, ‰	–	16.98	19.41	2.52
Температура, °C / Temperature, °C	–	17.1	26.7	5.87

П р и м е ч а н и е. Количество проб, отобранных для определения концентраций биогенных элементов, составило по 120 для каждого элемента, для определения содержания кислорода, солености и температуры – по 360 для каждого параметра.

Note. The number of samples taken to determine the nutrient concentrations is 120 for each parameter, and 360 for each of oxygen content, temperature and salinity.

по оригинальному алгоритму [6, 7]. В приведенном уравнении наибольшую сложность при расчете АЕ представляет количественная оценка интегрального времени пребывания ЗВ в исследуемой экосистеме.

Для районов государственного мониторинга, включая акватории Ялтинского залива и порта, в работе [7] предложена методика оценки времени пребывания ЗВ в экосистеме. Этот показатель рассчитывают через отношение изменения концентрации ЗВ в единицу времени к его средней концентрации, а также через среднюю скорость удаления ЗВ, определяемую по полному массиву данных для конкретной акватории (в нашем случае Ялтинского порта). Удельная скорость удаления ЗВ оценивается по уравнению

$$\tau = C/v,$$

где  $\tau$  – время пребывания ЗВ в экосистеме;  $C$  – содержание ЗВ в морской воде;  $v$  – удельная скорость элиминации ЗВ из экосистемы.

Удельную скорость удаления ЗВ из экосистемы исследуемой акватории определяли через изменение концентрации ЗВ в морской воде за единицу времени по формуле

$$v_n = (C_n - C_{n+1}) / (t_n - t_{n+1}),$$

где  $v_n$  – удельная скорость удаления ЗВ из экосистемы в выбранный период убывания концентрации  $t_n - t_{n+1}$ ;  $C_n$  – концентрация в период  $t_n$ ;  $C_{n+1}$  – концентрация в период  $t_{n+1}$ ; для  $n = 1, \dots, N$ , где  $N$  – объем выборки. С использованием соотношения средней концентрации исследуемого  $i$ -го вещества и средней скорости его удаления (для всех выбранных периодов) рассчитывается интегральное время пребывания ЗВ в экосистеме:

$$\tau_i = C_{\text{ср.}i} / v_{\text{ср.}i}.$$

Результаты расчета по приведенным уравнениям приведены в табл. 2.

Достоверность расчетных значений АЕ обеспечена анализом большого массива данных многолетних мониторинговых наблюдений (1920 измерений) за 10 лет. Следует учесть, что для акватории Ялтинского порта некоторые границы с сопредельными акваториями строго не определены (то есть проницаемы), поэтому рассчитывали  $AE_{\text{уд}}$  на единицу объема (1  $\text{дм}^3$ ) как относительную величину, характерную для центральной части акватории порта [7].

Для расчета параметров АЕ используются исходные данные исключительно рассматриваемой акватории, что позволяет лучше оценить ее отклик на поступление ЗВ и способность к самоочищению в сравнении с использованием ПДК, принятой для всех морских экосистем без учета региональных особенностей.

Средние за период наблюдений значения содержания всех форм неорганического азота не превышали соответствующих ПДК. Это позволило использовать эти средние значения в качестве порогового уровня при расчете самоочистительной способности исследуемой экосистемы, что является одним из неперемных условий использования балансового метода Израэля [5] для расчета, второе необходимое условие – наличие данных многолетнего мониторинга.

### Результаты и обсуждение

В рассматриваемый период соленость вод акватории Ялтинского порта варьировала в диапазоне 4.59–19.41 ‰, сильное распреснение (менее 10 ‰) отмечалось в поверхностном слое вод в 2018, 2019, 2021 и 2022 гг. Насыщение вод кислородом постоянно оставалось на низком уровне (в среднем 89–92 ‰), что приводило к дефициту растворенного кислорода, составлявшему 25–37 %. Фактическая концентрация растворенного кислорода варьировалась в значительном диапазоне – от 5.29 до 10.99 мг/л.

Средние за 2018–2022 гг. значения содержания всех минеральных форм биогенных элементов не превышали ПДК. Как следует из табл. 1, в анализируемый период отмечено превышение только ПДК кремния, что вполне объяснимо с учетом значительного объема пресных речных вод, впадающих в Ялтинский залив<sup>1)</sup>. Максимальное содержание фосфатов в 2021 г. было близко к пороговому значению (96 % от ПДК).

Едиичная проба поверхностных вод, отобранная 15 июля 2022 г. в акватории порта, содержала высокую концентрацию нитратов и аммония: 953 мкг/л (0.11 ПДК) и 190 мкг/л (0.49 ПДК) соответственно. Максимальное содержание общего азота в поверхностных водах акватории порта в этот период достигло 20 779 мкг/л, что в пять раз выше аналогичного показателя для остальных проб этого года (4301 мкг/л) (табл. 1) и предыдущих лет (1559–3266 мкг/л) и, очевидно, связано с обильными осадками и выносом биогенных веществ с речными водами с площади водосбора [3, 4]. Содержание нитритов достигало максимума (15.4 мкг/л) в 2019 г., тогда же был зафиксирован второй максимум содержания аммония (104 мкг/л), которое в остальные годы не превышало 69 мкг/л. Динамика средних и экстремальных значений содержания исследуемых биогенных элементов и растворенного кислорода за 2018–2022 гг. представлена на рис. 1.

При довольно мало меняющихся значениях вентилируемости вод ( $O_{2cp}$ ) акватории порта Ялты в описываемый период наблюдался рост среднегодовой концентрации фосфора и азота [8]. Так, суммарное содержание фосфора ( $P_{общ}$ ) возросло с 16 мкг/л в 2018 г. до 77 мкг/л в 2021 г., а азота ( $N_{общ}$ ) с 650 мкг/л в 2019 г. до 1440 мкг/л в 2022 г. Среди минеральных комплексов максимальное увеличение среднегодовой концентрации характерно для нитратов (с 51 мкг/л в 2018 г. до 228 мкг/л в 2022 г.), менее заметно для фосфатов (с 6.5–11.7 мкг/л в 2018–2020 гг. до 15.7–16.3 мкг/л в 2021–2022 гг.)

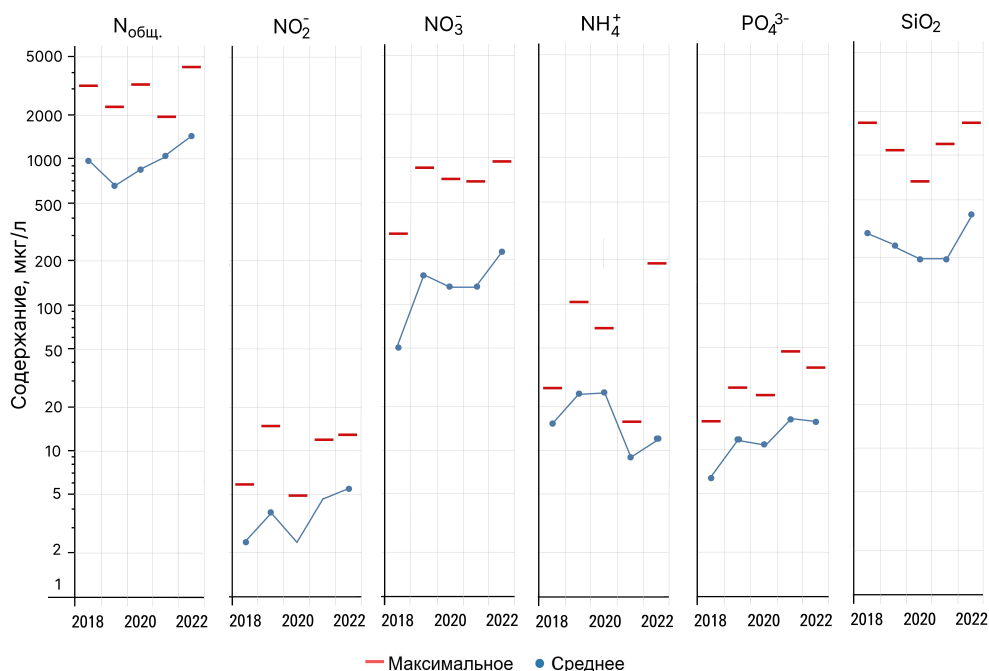


Рис. 1. Многолетнее изменение среднего и экстремального содержания биогенных элементов в акватории порта Ялта в 2018–2022 гг.

Fig. 1. Long-term dynamics of average and extreme values of nutrients content in the water area of the port of Yalta in 2018–2022

и нитритов (с 2.4–3.8 до 4.7–5.5 мкг/л в указанные годы). Динамика концентрации аммонийного азота показала ее снижение с 24–25 мкг/л в 2019–2020 гг. до 9 мкг/л в 2021 г.

Анализ базы данных за 2018–2022 гг. показал, что неорганические формы азота ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ) являются приоритетными биогенными элементами в Ялтинском порту: их концентрации выросли на 50–120 % за пять лет (динамика фосфатов и кремния не такая выраженная), а вклад в общий азот достиг 70 %. При этом сравнительные оценки содержания неорганического и общего азота по данным за два периода (2013–2017 гг. [8] и 2018–2022 гг.) показали двукратное увеличение суммарного содержания минеральных форм азота (в среднем с 84 мкг/л за 2013–2017 гг. до 161 мкг/л за 2018–2022 гг.) в водах акватории Ялтинского порта на фоне значительного снижения общего содержания этого ЗВ (в среднем за указанные периоды с 1212 до 996 мкг/л) (рис. 2). За счет уменьшения вклада органической составляющей суммарная доля минерального азота возросла с 7 до 16 %.

Сформированная база данных позволила оценить самоочистительную способность экосистемы акватории порта путем расчета ее АЕ для показавших устойчивый рост неорганических форм азота (нитратов и нитритов), а также для аммония, содержание которого изменилось незначительно. Характеристика способности к самоочищению морских вод экосистемы акватории порта Ялта в отношении нитратов и нитритов и аммония за 2013–2017 и 2018–2022 гг. представлена в табл. 2.

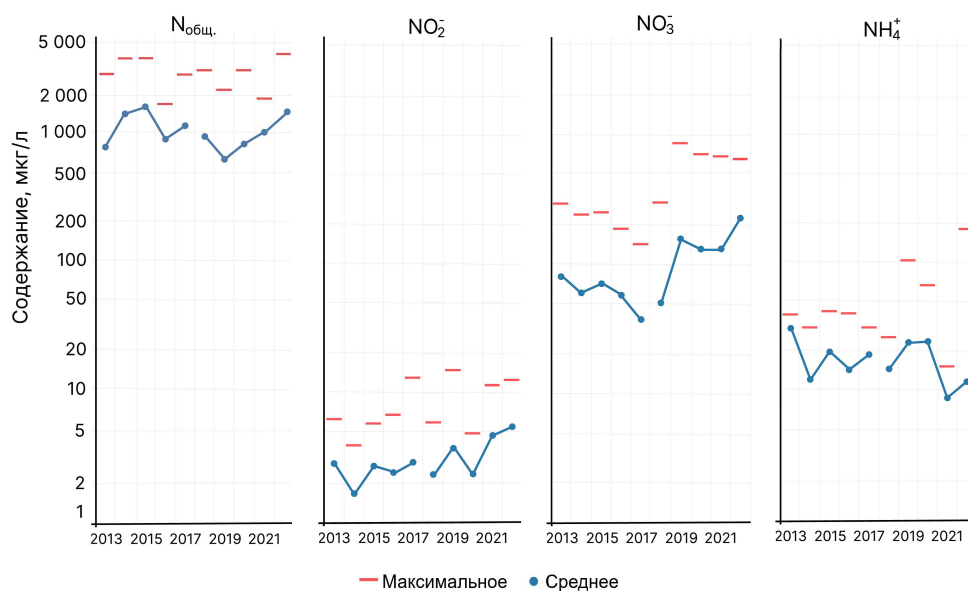


Рис. 2. Содержание неорганического и общего азота в акватории порта Ялта за 2013–2017 и 2018–2022 гг.

Fig. 2. Content of inorganic and total nitrogen in the Port of Yalta water area in 2013–2017 and 2018–2022

Т а б л и ц а 2. Результаты расчета удельной величины  $AE_{уд}$  экосистемы акватории Ялтинского порта в отношении неорганических форм азота в 2013–2017 и 2018–2022 гг.

Table 2. Calculation results for the specific value of  $AC_{sp}$  in the ecosystem of the Port of Yalta water area in relation to inorganic forms of nitrogen for 2013–2017 and 2018–2022

Формы азота / Forms of nitrogen	Содержание, мкг/л / Content, µg/L		$v_n$ , мкг/(л·сут) / $v_n$ , µg/(L·day)	$\tau_i$ , сут / $\tau_i$ , day	$AE_{уд}$ , мкг/(л·сут) / $AC_{sp}$ , µg/(L·day)
	среднее / mean	максималь- ное / max			
2013–2017					
Нитриты ( $NO_2^-$ ) / Nitrites ( $NO_2^-$ )	2.5	13.5	0.049	52–55	0.081
Нитраты ( $NO_3^-$ ) / Nitrates ( $NO_3^-$ )	61.6	300.0	1.120	55–59	31.490
Аммоний ( $NH_4^+$ ) / Ammonium ( $NH_4^+$ )	19.8	43.0	0.180	113–120	8.660
2018–2022					
Нитриты ( $NO_2^-$ ) / Nitrites ( $NO_2^-$ )	3.7	15.4	0.065	58–60	0.097
Нитраты ( $NO_3^-$ ) / Nitrates ( $NO_3^-$ )	140.0	953.0	4.210	33–37	36.070
Аммоний ( $NH_4^+$ ) / Ammonium ( $NH_4^+$ )	16.5	104.0	0.220	81–83	7.560

Как показано в табл. 2, среднее время элиминации нитритов из акватории порта Ялта в 2018–2022 гг. составляет 58–60 сут, а в 2013–2017 гг. оно составляло 52–55 сут. В 2018–2022 гг. время удаления из экосистемы нитратов и аммония сократилось примерно на 20 и 30 сут соответственно.

Удаление нитратов происходит значительно быстрее. Скорость удаления изменяется в широком диапазоне: ее максимальные значения для нитритов достигают 0.302 мкг/(л·сут), нитратов – 9.86 мкг/(л·сут) и аммонийного азота – 2.95 мкг/(л·сут), что превышает средние для периода значения в 2.3–9.2 раза.

Анализ динамики  $AE_{уд}$  показал, что экологическая обстановка в акватории Ялтинского порта по концентрации нитритов и нитратов в 2018–2022 гг. улучшилась в сравнении с 2013–2017 гг., однако ухудшилась по содержанию аммония. Снижение  $AE_{уд}$  для аммония как восстановленной неорганической формы азота свидетельствует о возросшем в последний период поступлении в акваторию Ялтинского порта неочищенных муниципальных стоков.

Для верификации полученных параметров самоочистительной способности экосистемы акватории Ялтинского порта выполнено их сравнение с соответствующими значениями  $AE_{уд}$  для экосистемы Севастопольской бухты, опубликованными в работах [10, 11]. Для б. Севастопольской в целом  $AE_{уд}$  в отношении нитритов составила 0.047 мкг/(л·сут) и нитратов – 25.92 мкг/(л·сут). Анализ результатов показал, что эти значения ниже, чем полученные для экосистемы акватории Ялтинского порта (табл. 2). Это свидетельствует о более

благоприятном состоянии акватории, очевидно, обусловленном повышенной динамикой вод.

Значение  $AE_{уд}$  для аммония в акватории Ялтинского порта составляло 7.56 мкг/(л·сут), что превысило средний показатель по б. Севастопольской (5.67 мкг/(л·сут)) и значение в ее самой проблемной восточной части бухты (1.99 мкг/(л·сут)), подверженной влиянию стока р. Черной [11, 13].

Сравнение способности к самоочищению акваторий Ялтинского порта и б. Севастопольской в отношении неорганических форм азота показало, что, несмотря на некоторые общие источники загрязнения неорганическими формами азота (техногенная и рекреационная нагрузка, поступление с речными водами), самоочистительный потенциал экосистемы акватории Ялтинского порта значительно выше. Причина, на наш взгляд, заключается в особенностях гидродинамического режима исследуемых акваторий.

В отличие от Севастопольской бухты, где водообмен с открытым морем ограничен, акватория Ялтинского порта, являющаяся частью Ялтинского залива, характеризуется сложной структурой гидродинамических процессов [13]. Это обусловлено воздействием западного и юго-западного потоков Основного Черноморского течения (ОЧТ), проходящих вдоль южного побережья Крыма. Кроме того, значительное влияние оказывает взаимодействие северной границы ОЧТ с элементами рельефа шельфовой зоны Крымского п-ова, такими как мысы и заливы. Изучение влияния этого взаимодействия на способность экосистем прибрежных акваторий ЮБК к самоочищению станет предметом будущих исследований.

Таким образом, рассчитанные значения  $AE_{уд}$  для каждой из форм неорганического азота позволяют оценить предел самоочистительной способности именно для экосистемы акватории порта Ялты, в отличие от единой ПДК, принятой для всех морских экосистем без учета региональных особенностей.

При оценке способности экосистемы акватории Ялтинского порта к самоочищению в случаях аварийных залповых сбросов следует ориентироваться на  $AE_{уд}$ , составляющую для нитритов – 0.097 мкг/(л·сут), нитратов – 36.1 мкг/(л·сут) и аммонийного азота – 7.56 мкг/(л·сут). Нормирование сбросов с учетом установленных количественных ограничений, охватывающих полный комплекс процессов утилизации, позволит улучшить экологическое состояние акватории порта и, как следствие, снизить негативное воздействие на Ялтинский залив в целом.

### **Выводы**

По результатам многолетнего мониторинга за 2012–2022 гг. сформирована база данных о содержании биогенных элементов и растворенного кислорода в акватории Ялтинского порта. На основе этой базы данных оценена динамика биогенных элементов и выделены неорганические формы азота (нитриты, нитраты, аммоний) как приоритетные ЗВ экосистемы порта.

Впервые для этой экосистемы за два периода (2012–2017 и 2018–2022 гг.) балансовым методом рассчитана  $AE_{уд}$  для неорганических форм азота (нитратов, нитритов и аммония), вычислены скорость и время удаления их из исследуемой экосистемы.

Полученное за 2018–2022 гг. уменьшение  $AE_{уд}$  в отношении аммония как восстановленной неорганической формы азота свидетельствует о том, что в этот период в акваторию Ялтинского порта поступало большее, по сравнению с первым периодом, количество неочищенных муниципальных стоков.

Выполнено сравнение полученных значений  $AE_{уд}$  для экосистемы акватории Ялтинского порта за 2018–2022 гг. в отношении всех неорганических форм азота с аналогичными показателями для экосистемы Севастопольской бухты – акватории с высокой антропогенной нагрузкой и затрудненным водообменом с открытым морем.

Рассчитанные значения  $AE_{уд}$  для каждой формы неорганического азота (нитраты, нитриты, аммоний) могут использовать органы местного самоуправления для количественной и качественной оценки муниципальных и ливневых стоков как основных источников поступления этих форм азота.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов В. А., Репетин Л. Н., Мальченко Ю. А.* Климатические изменения гидрометеорологических и гидрохимических условий прибрежной зоны Ялты. Севастополь : МГИ НАН Украины, 2005. 163 с.
2. Оценка гидрохимического режима прибрежных вод Ялтинского залива / Е. Е. Совга [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2014. № 3. С. 48–59. EDN TEWSBZ.
3. Проблемы зон экологического риска на приморских территориях Крыма / Н. М. Ветрова [и др.] // Проблемы и программы развития регионов. Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2019. № 2. С. 59–73. EDN SXDOOO. <https://doi.org/10.21869/23-11-1518-2019-26-2-59-73>
4. Содержание биогенных элементов и лимитирование первичной продукции фитопланктона в устьевой области реки Водопадной (Южный берег Крыма) / В. Н. Егоров [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 3. С. 37–51. EDN JARTUI. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2021-3-37-51>
5. *Израэль Ю. А., Цыбань А. В.* Антропогенная экология океана. Москва : Гидрометеоиздат, 1989. 528 с.
6. *Sovga E., Mezentsева I., Verzhenskaia 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.
7. *Совга Е. Е., Мезенцева И. В.* Методические аспекты оценок самоочистительной способности морских мелководных экосистем (заливов, бухт, портов) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2017. № 3. С. 57–68. EDN ZMZFVZ.
8. *Иванов В. А., Совга Е. Е., Мезенцева И. В.* Многолетняя динамика биогенных элементов и кислорода в акватории Ялтинского порта за период 2013–2017 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 2. С. 86–93. EDN IFEJCH. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2019-2-86-93>
9. *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. 39–52. EDN ZXHLNF. <https://doi.org/10.21513/0207-2564-2017-4-38-51>

10. *Совга Е. Е., Мезенцева И. В., Хмара Т. В.* Моделирование сезонной изменчивости гидродинамического режима Севастопольской бухты и оценок самоочистительной способности ее экосистем // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 2. С. 110–123. EDN AWWRHN. <https://doi.org/10.48612/fpg/92ge-ahz6-n2pt>
11. *Мезенцева И. В., Совга Е. Е.* Самоочистительная способность экосистемы восточной оконечности Севастопольской бухты по отношению к неорганическим формам азота // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2019. № 1. С. 71–77. EDN NAGCNQ. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2019-1-71-77>
12. *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. EDN OHOULJ. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-3-63-76>
13. *Репетин Л. Н., Романов А. С., Чурилова Т. Я.* Апвеллинг в зоне антициклонической завихренности на шельфе Южного Крыма // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2010. Вып. 22. С. 205–227. EDN WTBIAT.

Поступила 28.11.2024 г.; одобрена после рецензирования 11.01.2025 г.; принята к публикации 24.06.2025 г.; опубликована 30.09.2025 г.

*Об авторах:*

**Мезенцева Ирина Владимировна**, старший научный сотрудник, Севастопольское отделение Государственного океанографического института им. Н. Н. Зубова (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Советская, д. 61), кандидат географических наук, **SPIN-код: 2352-8939**, **ORCID ID: 0000-0001-9771-0380**, [mez-irina@mail.ru](mailto:mez-irina@mail.ru)

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

**Хмара Татьяна Викторовна**, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 3382-0644**, **Scopus Author ID: 6506060413**, **ResearcherID: C-2358-2016**, [xmara@mhi-ras.ru](mailto:xmara@mhi-ras.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

**Мезенцева Ирина Владимировна** – проведение расчета ассимиляционной емкости экосистемы Ялтинского порта, анализ результатов расчета

**Совга Елена Евгеньевна** – постановка задачи исследования, анализ методов расчета ассимиляционной емкости, сопоставление значений ассимиляционной емкости экосистем Ялтинского порта и Севастопольской бухты, подготовка рукописи

**Хмара Татьяна Викторовна** – проведение расчетов, обсуждение результатов исследования, визуализация данных и их анализ, редактирование рукописи

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*