

Сравнение ассимиляционной емкости и индекса трофности различных частей акватории Севастопольской бухты

Е. Е. Совга^{1*}, И. В. Мезенцева², К. А. Слепчук¹

¹ Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

² Севастопольское отделение Государственного океанографического института им. Н. Н. Зубова, Севастополь, Россия

*e-mail: esovga@mhi-ras.ru

Поступила 03.07.2020 г.; принята к публикации 10.08.2020 г.; опубликована 25.09.2020 г.

Экологическое состояние морской мелководной экосистемы на примере акватории Севастопольской бухты анализируется по соотношению ассимиляционной емкости и индекса *E-TRIX* в зависимости от уровня антропогенной нагрузки на экосистему всей бухты. В ходе анализа выделены восточная, центральная, западная части бухты и Южная бухта. Расчет ассимиляционной емкости и индекса *E-TRIX* экосистем для различных частей Севастопольской бухты был проведен с использованием натуральных данных о неорганических формах азота за 1998–2012 гг. из банка океанографических данных МГИ РАН. Сравнивались значения ассимиляционной емкости экосистем, рассчитанные по отношению к неорганическому азоту как преобладающему загрязняющему веществу в муниципальных и ливневых стоках, и индекса трофности *E-TRIX* морской экосистемы с учетом уровня техногенной нагрузки и сезонности (теплый и холодный период) биологических процессов поступления биогенных элементов. Это позволило адекватно выделить акватории, наиболее уязвимые с точки зрения возникновения неблагоприятных экологических ситуаций, вплоть до катастрофических. Согласно полученным данным, такой акваторией является Южная бухта. Второй по уязвимости является акватория восточной кутовой части Севастопольской бухты, находящаяся под влиянием стока реки Черной. Причем, как показали полученные результаты, ситуация усугубляется в периоды зимне-весенних паводков в результате увеличения содержания неорганических форм азота в стоках реки Черной. Экосистема западной части бухты, граничащей с открытым морем, по своей ассимиляционной емкости в отношении нитратного азота наиболее благополучна, а экосистема центральной части бухты оказалась самой чистой по индексу трофности *E-TRIX*. Наиболее подверженной экологическим рискам по обоим индексам (ассимиляционной емкости и *E-TRIX*) является экосистема Южной бухты (южная часть Севастопольской бухты). Наблюдаемое несоответствие в распределении расчетных индексов трофности *E-TRIX* и ассимиляционной емкости по различным частям Севастопольской бухты обусловлено различной природой этих величин. Ассимиляционная емкость экосистемы определяется физическими, химическими, биологическими процессами с учетом динамиче-

© Совга Е. Е., Мезенцева И. В., Слепчук К. А., 2020



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

ского выведения ЗВ за пределы экосистемы, а индекс *E-TRIX* – в основном сезонной изменчивостью поступления в экосистему биогенных элементов.

Ключевые слова: Севастопольская бухта, экосистема, самоочистительная способность, ассимиляционная емкость, неорганический азот, индекс трофности *E-TRIX*, река Черная.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Прибрежные исследования» при поддержке гранта РФФИ в рамках проекта № 18-45-920002 «Самоочистительная способность экосистем акваторий Севастопольской бухты в зависимости от уровня антропогенной нагрузки».

Для цитирования: 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

Comparison of Assimilative Capacity and Trophic Index for Various Parts of the Sevastopol Bay Water Area

E. E. Sovga^{1*}, I. V. Mezentseva², K. A. Slepchuk¹

¹ Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

² Sevastopol Branch of the N. N. Zubov State Oceanographic Institute, Sevastopol, Russia

*e-mail: esovga@mhi-ras.ru

Submitted 03.07.2020; revised 10.08.2020; published 25.09.2020

The ecological state of the marine shallow water ecosystem (the case of the Sevastopol Bay) is analyzed by the ratio of assimilative capacity and E-TRIX index depending on the anthropogenic load level for the whole bay ecosystem. As part of analysis, the eastern, central, western parts of the bay were distinguished as well as the Yuzhnaya Bay (southern part). Calculations of the assimilative capacity and E-TRIX index for ecosystems of different parts of the Sevastopol Bay were performed using the *in situ* data of inorganic nitrogen for the period 1998–2012 obtained from the MHI RAS oceanographic data bank. The paper compares values of ecosystem assimilative capacity calculated for inorganic nitrogen as a prevailing pollutant in municipal and storm wastewaters and E-TRIX trophic index of the sea ecosystem, with the technogenic load and biological process seasonality (warm and cold periods) of nutrient income taken into account. This allowed to properly distinguish water areas, which are most vulnerable in terms of formation of negative ecological events, up to disasters. According to the obtained data, such an area is that of the Yuzhnaya Bay. The second vulnerable water area is the eastern apex part of the Sevastopol bay exposed to the Chernaya River discharge. As the results showed, the situation worsens during winter and spring freshets due to increase in content of inorganic nitrogen forms in the Chernaya River runoff. The ecosystem of the western bay part adjoining the open sea is the safest in terms of nitrate nitrogen assimilative capacity, whereas the central part ecosystem appears to be the cleanest in terms of E-TRIX. The ecosystem most exposed to ecological risks in terms of both indices (assimilative capacity and E-TRIX) is that of the Yuzhnaya Bay (the southern part of the Sevastopol Bay). The observed imbalance of distribution of the calculated trophic index E-TRIX and assimilative capacity in different parts of the Sevastopol Bay is due to various nature of these quantities. The assimilative capacity of an ecosystem is defined by physical, chemical and biological processes given a dynamic removal of pollutants from the ecosystem, whereas E-TRIX is determined, in general, by seasonal variability of nutrient income into the ecosystem.

Keywords: Sevastopol Bay, ecosystem, self-purification ability, assimilation capacity, inorganic nitrogen, trophic index E-TRIX, Chernaya River.

Acknowledgements: the research is performed under State Order on topic “Coastal studies” and funded by the RFBR grant and under Project no. 18-45-920002 “Self-purification ability of the Sevastopol Bay area ecosystems depending on the antropogenic load level”.

For citation: Sovga, E.E., Mezentseva, I.V. and Slepchuk, K.A., 2020. Comparison of Assimilative Capacity and Trophic Index for Various Parts of the Sevastopol Bay Water Area. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 63–76. doi:10.22449/2413-5577-2020-3-63-76 (in Russian).

Введение

Севастопольская бухта представляет собой устьевое взморье р. Черной – полузамкнутую акваторию эстуарного типа с ограниченным водообменом. Бухта находится под постоянным техногенным воздействием (судоходство, стоянки судов, гидротехнические работы) и антропогенным влиянием (бытовые городские и ливневые стоки).

Систематический мониторинг качества вод Севастопольской бухты осуществлялся по программе Общегосударственной службы наблюдения и контроля окружающей среды с 1975 г. [1]. Результаты мониторинга широко представлены в научной литературе [2–4], где рассматривается гидрохимический режим бухты¹⁾, система течений, которые зависят от ветрового воздействия и поступления вод р. Черной, а также уровень антропогенного воздействия.

В Севастопольской бухте в зависимости от морфометрических параметров, месторасположения источников загрязнения и гидрометеорологических условий образуются зоны с различным уровнем загрязнения [5]. В [3] было принято деление акватории Севастопольской бухты на четыре района (рис. 1).

Экологическое состояние южной части Севастопольской бухты (б. Юж-



Рис. 1. Расположение районов слабого (W – западный район), умеренного (E – восточный район), сильного (C – центральный район) и очень сильного (S – южный район) загрязнения Севастопольской бухты [3]

Fig. 1. Location of the Sevastopol Bay's polluted areas: mild (W – western part), moderate (E – eastern part), acute (C – central part) and extreme (S – southern part) pollution [3]

ная), наиболее проблемной по уровню загрязненности акватории, зависит не только от интенсивности поступления загрязняющих веществ (ЗВ), но и от ветрового режима [6]. Установлено полное отсутствие сезонной изменчивости уровня загрязненности нитритами и нитратами акватории б. Южной, что может служить подтверждением антропогенного характера поступления неорганического азота. При этом уровень загрязненности Южной бухты

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

превышает уровень загрязненности других частей Севастопольской бухты. В кутовой части Южной бухты находится субмаринный источник, который к настоящему времени недостаточно изучен, хотя его влияние на экологическую и динамическую ситуацию в бухте может быть существенным [4].

Экологическая ситуация западного района акватории Севастопольской бухты, граничащего с открытым морем и относительно более чистой центральной частью бухты, зависит от поступления ЗВ из чрезвычайно загрязненной акватории б. Южной, особенно в определенных гидрометеороусловиях. При преобладающих в Севастопольской бухте ветрах южных и восточных направлений происходит вынос ЗВ из акватории Южной бухты, а при ветрах северных румбов – их запираение [4]. Ранее в работе [7] сравнивалась способность к самоочищению экологически неблагополучной акватории Южной бухты с более чистой западной частью Севастопольской бухты. Установлено, что самоочистительная способность экосистемы б. Южной зависит в основном от уровня антропогенной нагрузки, а для экосистемы западной части акватории эта способность определяется как антропогенным фактором, так и влиянием биологических продукционно-деструкционных процессов, связанных с рециркуляцией неорганических форм азота.

Восточный (кутовый) район Севастопольской бухты непосредственно находится под существенным влиянием стока р. Черной и источников субмаринной разгрузки в ее устье, выпуска сточных вод (без очистки) и аварийных выпусков в районе Нефтегавани, ТЭЦ. В работе [8] в качестве первого шага при оценке самоочистительной способности морской экосистемы представлен анализ экологического состояния восточной части акватории Севастопольской бухты. Важным источником поступления биогенных элементов в эту акваторию, особенно в периоды паводков, является р. Черная – наиболее паводкоопасная река Севастополя. Расчет ассимиляционной емкости (АЕ) экосистемы восточной части бухты по отношению к неорганическим формам азота с учетом их привнесения с водами р. Черной показал недостаточную способность данной экосистемы к самоочищению [9].

Наличие в границах акватории центральной части Севастопольской бухты двух встречных потоков – одного с востока на запад со стороны р. Черной и второго со стороны открытой части моря – способствует формированию в бухте буферной зоны, на которой замыкаются разнонаправленные потоки, содержащие ЗВ, включая биогенные элементы. Однако при этом для центральной части бухты во все сезоны отмечено существенно меньшее содержание неорганических форм азота [4]. Характеристики скорости удаления минерального азота и предельно допустимые объемы его поступления в акваторию центральной части Севастопольской бухты рассмотрены в работе [10].

Концепция АЕ как оценки способности морских акваторий к самоочищению разработана Ю. А. Израэлем и А. В. Цибань на основе разносторонних океанологических исследований [11]. АЕ характеризует способность морской экосистемы выдерживать поступление некоторого количества ЗВ без развития необратимых биологических последствий, единица измерения та же, что и у потока вещества (масса вещества в единице объема, отнесенная к единице времени).

Повышение уровня трофности акватории (водоема) – одно из неблагоприятных последствий воздействия человека на окружающую среду. Для мелководной экосистемы этот показатель определяется содержанием биогенных элементов. Поступление в водные экосистемы биогенных элементов из речного стока и с промышленно-бытовыми сточными водами обычно сопровождается ростом биологической продуктивности и уровня трофности экосистемы. Стандартного метода оценки уровня трофности морских вод не существует. На практике для каждой акватории расчет экологического состояния определяется набором измеряемых параметров и показателей морской среды [12, 13].

Цели работы:

- оценить экологическое состояние экосистем западной, восточной, центральной частей Севастопольской бухты, а также б. Южной путем расчета АЕ по отношению к неорганическому азоту как преобладающему ЗВ в сточных водах, а также по индексу трофности *E-TRIX* экосистем;
- сопоставить значения АЕ различных частей акватории Севастопольской бухты и индекса трофности *E-TRIX* морской экосистемы с учетом уровня техногенной нагрузки и сезонности (теплый и холодный период) биологических процессов;
- выделить акватории, наиболее уязвимые с точки зрения самоочистительной способности и возникновения негативных экологических ситуаций.

Материалы и методы, используемые в работе

Расчет АЕ и индекса *E-TRIX* для экосистем различных частей Севастопольской бухты был проведен с использованием массива натуральных данных о неорганических формах азота за 1998–2012 гг. из банка океанографических данных МГИ РАН. Средние за период наблюдений значения содержания всех форм неорганического азота не превышали соответствующие предельно допустимые концентрации (ПДК) (1.43 мкмоль/л для NO_2^- , 221.4 мкмоль/л для NO_3^- , 20.7 мкмоль/л для NH_4^+) (таблица). Это позволило принять их в качестве порогового значения для оценки АЕ морских экосистем балансовым методом.

Для определения самоочистительной способности отдельных акваторий Севастопольской бухты использован алгоритм оценки АЕ, доработанный для морских акваторий, где ведется многолетний государственный/ведомственный гидрохимический мониторинг. Расчет АЕ осуществлялся по методике [6] с использованием балансового метода [11].

Для оценки уровня трофности вод используется индекс *E-TRIX*, который, согласно работе [12], определяется по формуле

$$E-TRIX = (\lg[Ch D\% O N \cdot P] + 1.5) / 1.2,$$

где *Ch* – концентрация хлорофилла *a*, мкг/дм³, характеризует первичную продукцию фитопланктона; *D%O* – отклонение в абсолютных значениях содержания растворенного кислорода от 100%-ного насыщения; *N* – концентрация растворенной формы минерального азота, мкг/дм³; *P* – концентрация общего фосфора, мкг/дм³.

Необходимые для расчета индекса *E-TRIX* данные вычислялись по одномерному варианту модели качества воды и ее блоку эвтрофикации [14].

Характеристика содержания неорганических форм азота в отдельных районах акватории Севастопольской бухты

Characteristic of inorganic nitrogen content in separate parts of the Sevastopol Bay water area

Район / Part	Количество определений / Number of determinations	Содержание форм неорганического азота, мкмоль/л / Content of inorganic nitrogen forms, μM					
		NO_2^-		NO_3^-		NH_4^+	
		средн. / mean	макс. / max.	средн. / mean	макс. / max.	средн. / mean	макс. / max.
S	714	0.23	1.48	12.60	142.8	0.95	8.17
W	1117	0.12	0.42	2.46	13.3	0.57	8.18
E	750	0.20	0.96	3.25	43.0	1.05	5.12
C	1563	0.13	1.93	1.71	13.9	0.71	8.31

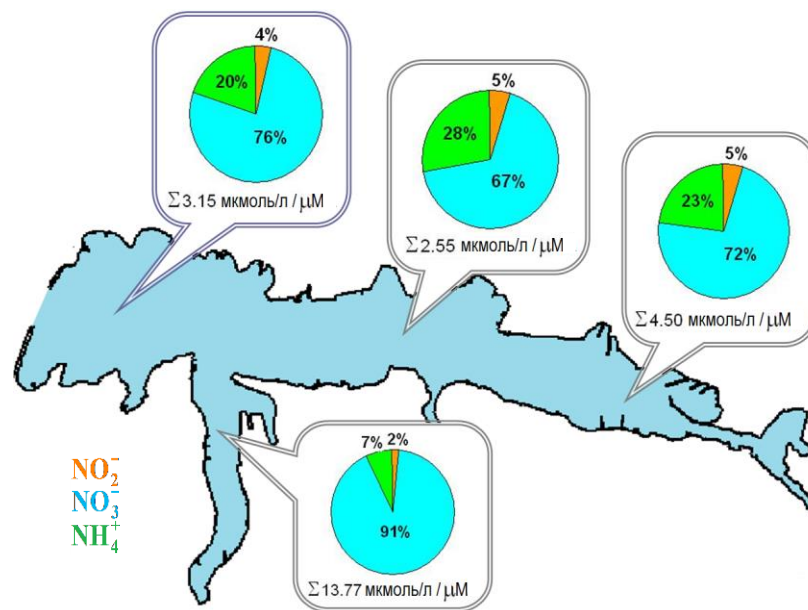
Модель была откалибрована для условий Севастопольской бухты и использовалась при расчетах гидрохимических характеристик бухты в целом и отдельных ее частей [15, 16]. В качестве входных параметров модели использовались данные о скорости и направлении ветра, температуре воздуха, фотосинтетически активной радиации, влажности и облачности, а также данные о годовом расходе и стоке растворенных веществ рек, впадающих в акваторию. Кроме того, использовались данные о годовом ходе прозрачности, значения температуры морской воды, солености, концентрации фитопланктона, биогенных элементов, кислорода, органического фосфора и органического азота, которые задаются на 1 января расчетного года. Для различных районов Севастопольской бухты проведено сравнение годового хода индекса *E-TRIX*.

Результаты исследований и их анализ

В результате анализа содержания и распределения всех неорганических форм азота установлено, что преобладающей формой азота как ЗВ для всех частей Севастопольской бухты являются нитраты (рис. 2), доля которых в общем содержании минерального азота составляет от 67 (центральная часть бухты) до 91 % (Южная бухта). Из рис. 2 следует, что по суммарному содержанию неорганического азота воды центральной части бухты в среднем были в полтора раза чище сопредельных акваторий и более чем в пять раз чище крайне загрязненной акватории б. Южной бухты.

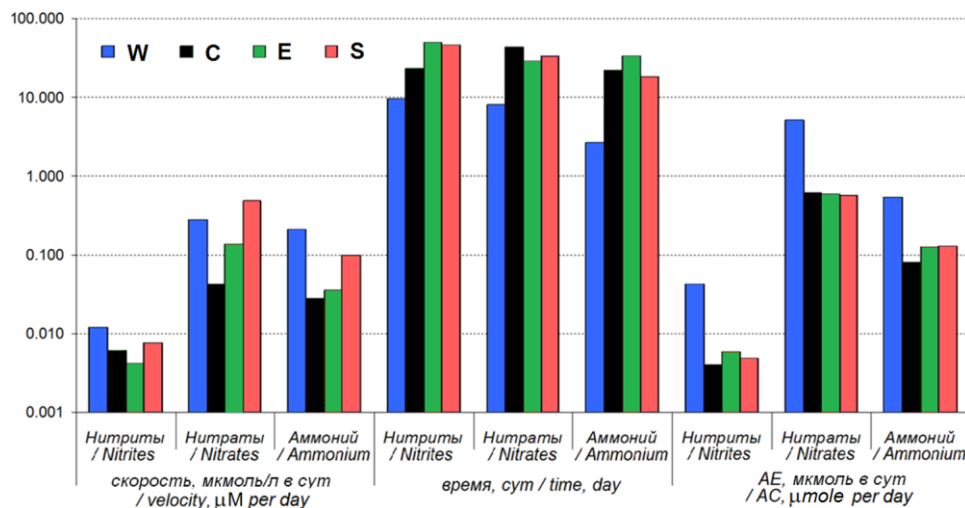
Рассчитанная среднесуточная скорость удаления минеральных комплексов варьировала в широком диапазоне от 0.004 мкмоль/л для нитритов в восточной части Севастопольской бухты до 0.49 мкмоль/л для нитратов в б. Южной (рис. 3). И если средние скорости для южного (преимущественно за счет нитратной формы) и западного районов достигали 0.20 и 0.18 мкмоль/л в сутки соответственно, то для восточной части бухты средняя суточная скорость удаления минерального азота составила только 0.06 мкмоль/л, а для центральной части – менее 0.03 мкмоль/л.

Несмотря на схожее для выделенных районов северной части Севастопольской бухты соотношение содержания в морской воде форм минерального азота и средней скорости элиминации в ряду нитраты → аммоний →



Р и с . 2 . Распределение среднего пропорционального содержания форм минерального азота в морских водах выделенных районов Севастопольской бухты в 1998–2012 гг.

Fig . 2 . Distribution of mean proportional content of mineral nitrogen forms in sea water of the marked out parts of the Sevastopol Bay in 1998–2012



Р и с . 3 . Распределение скорости, времени удаления неорганического азота и ассимиляционной емкости в различных районах Севастопольской бухты в 1998–2012 гг. W – западная часть бухты; C – центральная часть бухты; E – восточная часть бухты; S – Южная бухта

Fig . 3 . Distribution of speed and time of inorganic nitrogen removal and assimilation capacity in different parts of the Sevastopol Bay in 1998–2012. W – western part of the bay; C – central part of the bay; E – eastern part of the bay; S – Yuzhnaya Bay

нитриты, расчетное время пребывания минеральных комплексов азота показало, что удаление азота из экосистемы западной части происходит за 3–10 дней (рис. 3). Нитриты и аммоний из центральной части бухты выводятся в среднем за 22–23 дня. Вдвое медленнее происходит удаление нитратов, а для полного самоочищения в среднем требуется более 44 дней. Из экосистемы восточной части акватории бухты нитраты и аммоний выводятся в среднем за месяц (28 дней для нитратов и 34 дня для аммония). Значительно медленнее происходит удаление нитритов – в среднем требуется более 50 дней. Также медленно выводятся нитриты из акватории б. Южной (47 дней). Примерно полмесяца (18 дней) потребуется на удаление аммонийного азота из акватории Южной бухты, а для нитратного азота – больше месяца (34 дня) (рис. 3).

О степени благополучия экосистем Севастопольской бухты в целом можно было бы судить только в условиях равномерного поступления биогенных элементов в объеме, не превышающем величину АЕ. Однако даже при незначительном дисбалансе между привнесением ЗВ и способностью акватории к самоочищению важно учитывать сезонность вовлечения ЗВ в биологические и физические процессы.

В поступающих в бухту водах р. Черной преобладающая форма неорганического азота – нитратная, минимальные концентрации которой приходятся на вегетационный период (апрель – июнь) [9]. Для осенне-зимних паводков характерно максимальное содержание суммы минеральных соединений азота ΣN ($\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$). И если в паводковый период значительное поступление азота может в некоторой степени компенсироваться усилением динамического выноса за пределы рассматриваемой акватории, то в период летней межени высокое содержание биогенных комплексов может сопровождаться цветением морских вод с последующим развитием гипоксии, приводящим к заморным явлениям. Поэтому для восточной части бухты поток ЗВ только с водами р. Черной превысил АЕ принимающей акватории по отношению к неорганическому азоту.

При неоднородном поступлении биогенных элементов опасность для экосистемы представляют сезоны, в которые создается нагрузка, превышающая удельную (рассчитывается на единицу фиксированного объема, в нашем случае на 1 л) величину АЕ, составляющую в западной части Севастопольской бухты для нитратов 5.10; нитритов 0.043; аммония 0.54 мкмоль в сутки, в центральной и восточной частях бухты на порядок меньше: для нитратов 0.61 и 0.58; нитритов 0.004 и 0.006; аммония 0.08 и 0.13 мкмоль в сутки соответственно. Удельная величина АЕ экосистемы б. Южной может быть оценена в 0.58 мкмоль/л для нитратов, 0.13 мкмоль/л для аммония и 0.005 мкмоль/л для нитритов (рис. 3).

Значение индекса *E-TRIX* различных районов Севастопольской бухты как показателя уровня трофности вод было получено по рассчитанному годовому ходу химико-биологических характеристик качества воды (рис. 4).

Анализ годового хода индекса показал, что Южная бухта является наиболее загрязненным районом практически весь расчетный год ($E-TRIX_{\text{mean}} = 4.49$). При этом качество вод Южной бухты можно охарактеризовать как хорошее с минимумом значения индекса трофности ($E-TRIX_{\text{min}} = 3.23$) в августе

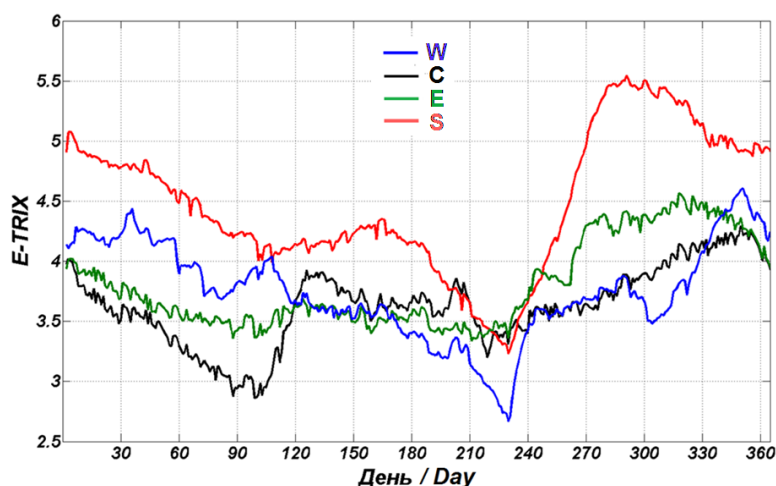


Рис. 4. Годовой ход индекса *E-TRIX* центрального (С), восточного (Е), западного (W) районов и Южной бухты (S)

Fig. 4. Annual variation of *E-TRIX* index for the central (C), eastern (E), western (W) parts and the Yuzhnaya Bay (S)

и максимумом ($E-TRIX_{max} = 5.55$) в октябре, что совпадает с осенним пиком цветения фитопланктона. Качество вод центрального ($E-TRIX_{mean} = 3.63$), восточного ($E-TRIX_{mean} = 3.81$) и западного ($E-TRIX_{mean} = 3.75$) районов Севастопольской бухты высокое с низким уровнем эвтрофирования [17].

Сравнение индекса трофности экосистемы *E-TRIX* с ее природной способностью к самоочищению по значению АЕ является весьма перспективным для достоверной оценки экологического состояния мелководной морской экосистемы. Как показано на рис. 5, по обоим индексам только южная часть Севастопольской бухты (б. Южная) является наиболее подверженной экологическому риску. По величине АЕ для нитратного азота наиболее благополучна западная часть, по индексу трофности – центральная часть. Наблюдаемое несоответствие в распределении по различным частям Севастопольской бухты используемых индексов (АЕ и *E-TRIX*) обусловлено различиями в их природе. Величину АЕ как комплексную определяют разные процессы, связанные и с биологическим круговоротом биогенных элементов, и с их химическим и динамическим выведением за пределы экосистемы. При этом индекс *E-TRIX* зависит в основном от сезонной изменчивости содержания биогенных элементов в экосистеме.

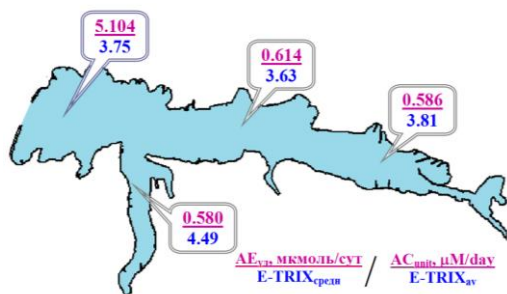


Рис. 5. Распределение величины АЕ и среднегодового индекса *E-TRIX* для нитратного азота в выделенных районах Севастопольской бухты

Fig. 5. Distribution of assimilative capacity values and annual mean *E-TRIX* index for nitrate nitrogen in the marked out parts of the Sevastopol Bay

Заключение

Впервые выполнено сопоставление значений АЕ различных частей акватории Севастопольской бухты и индекса трофности *E-TRIX* морской экосистемы с учетом уровня техногенной нагрузки и сезонности биологических процессов (теплый и холодный период). Показаны отличия АЕ отдельных районов Севастопольской бухты по отношению к неорганическим формам азота. Выделены акватории, наиболее уязвимые с точки зрения самоочистительной способности и возникновения неблагоприятных экологических ситуаций, вплоть до катастрофических. Согласно результатам настоящей работы, это прежде всего акватория Южной бухты. Второй по уязвимости является акватория восточной кутовой части бухты, находящаяся под влиянием стока р. Черной, особенно в периоды зимне-весенних паводков с увеличением содержания неорганических форм азота.

Наблюдаемое несоответствие в распределении расчетных индексов трофности *E-TRIX* по различным частям Севастопольской бухты и значений АЕ обусловлено различной природой этих величин. АЕ экосистемы определяется физическими, химическими, биологическими процессами с учетом динамического выведения ЗВ за пределы экосистемы, а индекс *E-TRIX* – в основном сезонной изменчивостью поступления в экосистему биогенных элементов.

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. Рябининой. 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.
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/gidrologo-gidrohimicheskij_rezhim_sevastopolskoj_buhty_2006.pdf (дата обращения: 25.05.2020).
4. О перспективах и возможностях оценки самоочистительной способности акватории Севастопольской бухты / Е. Е. Совга [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. Вып. 28. С. 153–164.
5. Основные источники загрязнения морской среды Севастопольского региона / Е. И. Овсяный [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2001. Вып. 2. С. 138–152.
6. Оценки самоочищающей способности экосистемы Севастопольской бухты по отношению к неорганическим формам азота / В. А. Иванов [и др.] // Процессы в геосредах. 2015. № 2 (2). С. 55–65.
7. 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. XXVIII, № 4. С. 38–51.

8. *Совга Е. Е., Мезенцева И. В., Котельянец Е. А.* Оценка экологического состояния акватории Севастопольской бухты в зоне влияния стока реки Черной // Материалы I Международного экологического форума в Крыму «Крым – эколого-экономический регион. Пространство ноосферного развития» 2017 года. Севастополь : Филиал МГУ им. М.В. Ломоносова в г. Севастополе, 2017. С. 236–240.
9. *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 Севастополь 2019. № 1. С. 71–77. doi:10.22449/2413-5577-2019-1-71-77
10. *Совга Е. Е., Мезенцева И. В.* Экологическое состояние центральной части акватории Севастопольской бухты в зависимости от уровня антропогенной нагрузки // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 3. С. 52–60. doi:10.22449/2413-5577-2019-3-52-60
11. *Израэль Ю. А., Цыбань А. В.* Антропогенная экология океана. Л. : Гидрометеоздат, 1989. 528 с.
12. Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic Sea: proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index / R. A. Vollenweider [et al.] // *Environmetrics*. 1998. Vol. 9, Iss. 3. P. 329–357. doi:10.1002/(SICI)1099-095X(199805/06)9:3<329::AID-ENV308>3.0.CO;2-9
13. A Model of the Sevastopol'skaya Bay. Reproduction of the Vertical Structure of Temperature and Salinity Fields in 1997–1999 / V. A. Ivanov [et al.] // *Physical Oceanography*. 2003. Vol. 13, iss. 4. P. 201–222. <https://doi.org/10.1023/A:1025850016768>
14. *Иванов В. А., Тучковенко Ю. С.* Прикладное математическое моделирование качества вод шельфовых морских экосистем. Севастополь, 2006. 368 с.
15. *Слепчук К. А.* Моделирование годовой динамики фитопланктона и биогенных элементов в акватории Севастопольской бухты с применением оптимизационного метода калибровки биогеохимической модели // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. Вып. 28. С. 231–236.
16. *Слепчук К. А.* Оценка уровня эвтрофирования районов Севастопольской бухты по результатам численного моделирования индекса E-TRIX // Процессы в гео-средах. 2019. № 1. С. 91–96.
17. *Slepchuk K. A., Khmara T. V., Man'kovskaya E. V.* Comparative assessment of the trophic level of the Sevastopol and Yuzhnaya Bays using E-TRIX index // *Physical Oceanography*. 2017. Iss. 5. P. 60–70. doi:10.22449/1573-160X-2017-5-60-70

Об авторах:

Совга Елена Евгеньевна, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, 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

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, **ORCID ID: 0000-0001-9771-0380**, mez-irina@mail.ru

Слепчук Кира Александровна, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0001-5437-4866, ResearcherID: H-9366-2017, skira@mhi-ras.ru**

Заявленный вклад авторов:

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

Мезенцева Ирина Владимировна – проведение расчета ассимиляционной емкости экосистем западной центральной и восточной частей Севастопольской бухты, анализ результатов расчета

Слепчук Кира Александровна – расчет индекса E-TRIX экосистем западной, центральной и восточной частей Севастопольской бухты и Южной бухты, анализ сезонной динамики

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Simonov, A.I. and Ryabinin, A.I., eds., 1996. [*Hydrometeorology and Hydrochemistry of Seas. Vol. 4. The Black Sea. Iss. 3. Modern State of the Black Sea Waters Pollution*]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika, 230 p. (in Russian).
2. Lopukhin, A.S., Ovsyany, E.I., Romanov, A.S., Kovardakov, S.A., Bryanzeva, Yu., Rylkova, O.A., Gavrilova, N.A., Gubanov, V.V., Lopukhin, S.A. [et al.], 2007. Seasonal Peculiarities of Hydrologic-Hydrochemical Structure of Sevastopol Bay Water, Microplankton and Distribution of its Biochemical Components (the Black Sea, Observations of 2004 – 2005). In: MHI, 2007. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]*. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 15, pp. 74–109 (in Russian).
3. Ivanov, V.A., Ovsyany, E.I., Repetin, L.N., Romanov, A.S. and Ignatyeva, O.G., 2006. *Hydrological and Hydrochemical Regime of the Sebastopol Bay and Its Changing under Influence of Climatic and Anthropogenic Factors*. Sevastopol: MHI NAS of Ukraine, 90 p. (in Russian).
4. Sovga, E.E., Mezentseva, I.V., Khmara, T.V. and Slepchuk, K.A., 2014. [On Prospects and Possibilities of Assessment of Self-Purification Ability of the Sevastopol Bay Water Area] In: MHI, 2014. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]*. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 28, pp. 153–164 (in Russian).
5. Ovsyany, E.J., Romanov, A.S., Min'kovskaya, R.Ya., Krasnovid, I.I., Ozyumenko, B.A. and Zymbal, I.M., 2001. The Most Important Sources of Pollution for the Marine Environment of the Coastal Zone of Sevastopol. In: MHI, 2001. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]*. Sevastopol, ECOSI-Gidrofizika. Iss. 2, pp. 138–152 (in Russian).

6. Ivanov, V.A., Mezentseva, I.V., Sovga, E.E., Slepchuk, K.A. and Khmara, T.V., 2015. Assessment Self-Purification Ability of the Sevastopol Bay Ecosystem in Relation to Inorganic Forms of Nitrogen. *Processes in GeoMedia*, (2), pp. 55–65 (in Russian).
7. Sovga, E.E., Mezentseva, I.V. and Kotelyanets, E.A., 2017. Assimilation Capacity of the Marine Shallow Water Ecosystems with Various Anthropogenic Impacts as the Estimation Method of its Self-Purification Ability. *Problems of Ecological Monitoring and Ecosystem Modelling*, 28(4), pp. 38–51 (in Russian).
8. Sovga, E.E., Mezentseva, I.V. and Kotelyanets, E.A., 2017. [Assessment of the Ecological State of the Sevastopol Bay Water Area in the Zone of Influence of the River Chernaya]. In: Sevastopol Branch of MSU, 2017. [*Proceedings of the 1st International Ecological Forum in Crimea “Crimea is Ecological and Economical Region. Zone of Nospheric Development” 2017*]. Sevastopol: Sevastopol Branch of MSU, pp. 236–240.
9. Mezentseva, I.V. and Sovga, E.E., 2019. Self-Purification Ability of the Ecosystem of the East Part of the Sevastopol Bay with Respect to Inorganic Nitrogen. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 71–77. doi:10.22449/2413-5577-2019-1-71-77 (in Russian).
10. Sovga, E.E. and Mezentseva, I.V., 2019. Ecological Condition of the Central Paer of Secastopol Bay depending on the Anthropogenic Load Level. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 52–60. doi:10.22449/2413-5577-2019-3-52-60 (in Russian)
11. Izrael, Yu.A. and Tsyban, A.V., 1989. *Anthropogenic Ecology of the Ocean*. Moscow: Gidrometeoizdat, 528 p. (in Russian)
12. Vollenweider, R.A., Giovanardi, F., Montanari, G. and Rinaldi, A., 1998. Characterization of the Trophic Conditions of Marine Coastal Waters with Special Reference to the NW Adriatic Sea: Proposal for a Trophic Scale, Turbidity and Generalized Water Quality Index. *Environmetrics*, 9(3), pp. 329–357. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-095X\(199805/06\)9:3<329::AID-ENV308>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-095X(199805/06)9:3<329::AID-ENV308>3.0.CO;2-9)
13. Ivanov, V.A., Mikhailova, É.N., Repetin, L.N. and Shapiro, N.B., 2003. A Model of the Sevastopol'skaya Bay. Reproduction of the Vertical Structure of Temperature and Salinity Fields in 1997–1999. *Physical Oceanography*, (4), pp. 201–222. <https://doi.org/10.1023/A:1025850016768>
14. Ivanov, V.A. and Tuchkovenko, Yu.S., 2006. *Applied Mathematical Modelling of Water Quallity of Shelf Marine Ecosystems*. Sevastopol: MHI, NAS of Ukraine, 368 p.
15. Slepchuk, K.A., 2014. Modelling of Annual Phytoplankton and Biogenic Element Dynamics in the Sevastopol Bay Water Area Using an Optimization Method for Biogeochemical Model Calibration. In: MHI, 2014. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]*. Sevastopol, ECOSI-Gidrofizika. Iss. 28, pp. 231–236 (in Russian).
16. Slepchuk, K.A., 2019. Estimation of Eutrophication Level of the Sevastopol Bay Areas Based on the Results of E-Trix Index Numerical Modelling. *Processes in GeoMedia*, (1), pp. 91–96 (in Russian).
17. Slepchuk, K.A., Khmara, T.V. and Man'kovskaya E.V., 2017. Comparative Assessment of the Trophic Level of the Sevastopol and Yuzhnaya Bays Using E-TRIX Index. *Physical Oceanography*, (5), pp. 60–70. doi:10.22449/1573-160X-2017-5-60-70

About the authors:

Elena E. Sovga, Leading Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Dr.Sci. (Geogr.), **ORCID ID: 0000-0002-0670-4573**, **SPIN-code: 8675-2443**, **ResearcherID: A-9774-2018**, *esovga@mhi-ras.ru*

Irina V. Mezentseva, Senior Research Associate, Sevastopol Branch of the N. N. Zubov State Oceanographic Institute (61 Sovetskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Geogr.), **ORCID ID: 0000-0001-9771-0380**, *mez-irina@mail.ru*

Kira A. Slepchuk, Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0001-5437-4866**, **ResearcherID: H-9366-2017**, *skira@mhi-ras.ru*

Contribution of the authors:

Elena E. Sovga – research task setting, analysis of methods of assimilative capacity calculation, comparison of assimilative capacity and trophic index for ecosystems of various parts of the Sevastopol Bay, article formation

Irina V. Mezentseva – calculation of assimilative capacity of the ecosystems of the western, central and eastern parts of the Sevastopol Bay, calculation results analysis

Kira A. Slepchuk – calculation of E-TRIX index for the ecosystems of the western, central and eastern parts of the Sevastopol Bay and Yuzhnaya Bay, seasonal dynamics analysis

All the authors have read and approved the final manuscript.