

И.В.Мезенцева¹, Е.Е.Совга²

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

²Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь

САМООЧИСТИТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ ЭКОСИСТЕМЫ ВОСТОЧНОЙ ОКОНЕЧНОСТИ СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЫ ПО ОТНОШЕНИЮ К НЕОРГАНИЧЕСКИМ ФОРМАМ АЗОТА

На основе данных мониторинговых наблюдений за содержанием биогенных элементов в морских водах восточной оконечности Севастопольской бухты, находящейся под влиянием стока реки Черной как доминирующего источника поступления биогенных элементов, выполнен расчет скорости удаления минерального азота. Дана оценка способности экосистемы выделенного района к самоочищению в отношении отдельных форм неорганического азота. Сравнительный анализ полученной величины ассимиляционной емкости исследуемой экосистемы с привносом неорганического азота водами реки Черной показал недостаточность способности к самоочищению экосистемы предустьевой акватории Севастопольской бухты.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *неорганические формы азота, способность к самоочищению, ассимиляционная емкость экосистемы, восточная часть Севастопольской бухты, река Черная*

doi: 10.22449/2413-5577-2019-1-71-77

Введение. Экологическое благополучие экосистем морских мелководных акваторий, независимо от проводимых природоохранных мероприятий, в первую очередь, определяется их самоочистительной способностью. Оценка способности мелководных акваторий к самоочищению может быть выполнена через расчет их ассимиляционной емкости (АЕ) по отношению к приоритетному загрязняющему веществу (ЗВ) или комплексу.

Основными природными путями удаления ЗВ, обеспечивающими процесс самоочищения экосистемы, являются гидродинамический перенос, физико-химическая и биохимическая трансформация и депонирование в донные отложения. Независимо от доминирования любого из указанных путей в различных районах моря, в целом все они способствуют снижению уровня загрязнения морской воды до естественного состояния экосистемы.

Севастопольская бухта представляет собой полузамкнутую акваторию эстуарного типа с затрудненным водообменом, активным судоходством, с высокой неравномерной нагрузкой со стороны береговой промышленно-производственной и хозяйственной инфраструктуры. Восточная часть бухты, как объект проводимого исследования, дополнительно находится под существенным влиянием стока реки Черной, с которым в акваторию бухты поступает дополнительное количество биогенных элементов. Это особенно актуально в связи с тем, что, несмотря на зарегулированность, в период паводка объем речного стока может быть сопоставим с объемом воды в самой

© И.В.Мезенцева, Е.Е.Совга, 2019

бухте [1]. В условиях интенсивной антропогенной нагрузки особую актуальность приобретает решение задач контроля и эмиссии ЗВ, минимизации их поступления с целью предупреждения возможных природных и техногенных катастроф.

По гидролого-гидрохимическим исследованиям Севастопольской бухты имеется обширная научная информация, однако довольно разрозненная по направлению исследований и по видам антропогенной нагрузки, без комплексного рассмотрения состояния с учетом динамической ситуации и изменения природно-климатических факторов [2, 3].



Р и с . 1 . Районирование Севастопольской бухты по уровням загрязнения вод (по [4]): районы слабого (западный район, W), умеренного (восточный район, E), сильного (центральный район, C), очень сильного (южный район, S) загрязнения.

Рассматриваемый в работе восточный район Севастопольской бухты, находясь на значительном удалении от открытой части моря, согласно [4], характеризуется как умеренно загрязненный (рис. 1).

Исследуемая часть Севастопольской бухты мелководна, по данным [5] ее средняя глубина составляет 4,7 м, максимальная – 10,8 м. Загрязнение акватории происходит за счет выпуска сточных вод (без очистки) и аварийных выпусков в районе Нефтегавани, ТЭЦ и в устье реки Черная, где также имеются источники субмаринной разгрузки. Анализ экологического состояния исследуемой акватории Севастопольской бухты в зависимости от сезона, как первый шаг при оценке самоочистительной способности морской экосистемы, представлен в [6].

Стоковые воды реки Черной, существенно отличаясь от морских вод бухты по гидролого-гидрохимическим параметрам, их сезонной динамике, в значительной мере оказывают влияние как на гидродинамические характеристики принимающей акватории, так и на ее биопродуктивность (изменяя трофический статус), что в комплексе и определяет потенциал морской акватории к самоочищению.

Как показано в [7], поступающие в бухту воды реки Черной под влиянием антропогенной нагрузки на площадь водосборного бассейна и интенсивного загрязнения русла (особенно в нижнем течении реки) содержат весьма значительные количества биогенных веществ. В устьевых водах максимальные концентрации биогенных элементов выше, чем в морской воде: аммония в 5 – 7 раз, нитритов в 1,5 – 2 раза, нитратов в 1,6 раза [4].

Цель настоящей работы состояла в оценке АЕ акватории восточной части Севастопольской бухты путем имитационного математического моделирования по отношению к формам неорганического азота с учетом их физико-химических свойств, интегрального времени элиминации через изменение валового содержания в воде за счет воздействия динамических, физических, химических и биологических процессов, что позволяет количественно определить активность природного процесса самоочищения экосистемы.

72



Р и с . 2. Район исследования в восточной части Севастопольской бухты, включая акваторию Нефтегавани.

Материалы и методы исследования. В основу работы легли результаты мониторинговых наблюдений Морского гидрофизического института (Банк океанографических данных МГИ) за содержанием минеральных форм азота (нитриты, нитраты, аммоний) в поверхностных и придонных водах восточной части акватории Севастопольской бухты (рис.2) в период с мая 1998 г. по апрель 2012 г. Рассматриваемая кутовая акватория бухты, подверженная влиянию стока реки Черной, имеет глубины до 22 м, площадь поверхности до 0,8 км², объем ориентировочно до 0,0058 км³.

В целом за указанный выше период массив натуральных данных представлен результатами 750 определений содержания неорганического азота в морских водах, выполненных фотометрическим методом в стационарной химической лаборатории МГИ (табл.1).

Оценка АЕ экосистем выделенных районов Севастопольской бухты осуществлялась с использованием балансового метода [8]. При указанном методе наиболее сложным является расчет интегрального времени пребывания ЗВ в исследуемой экосистеме, которое 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.

Методика расчета величины АЕ морской экосистемы приведена в [9]. Итоговые формулы для оценки среднего значения АЕ и среднеквадратичного отклонения АЕ морской экосистемы по отношению к приоритетному ЗВ

Т а б л и ц а 1. Характеристика массива данных, полученных в результате наблюдений за содержанием форм неорганического азота в водах восточной части Севастопольской бухты в 1998 – 2012 гг.

показатель характеристика	NO ₂ ⁻ , мкМ/дм ³	NO ₃ ⁻ , мкМ/дм ³	NH ₄ ⁺ , мкМ/дм ³
среднее содержание	0,20	3,25	1,05
диапазон концентраций	0 – 0,96	0 – 43,00	0 – 5,12
пороговое значение концентраций	1,43	221,43	20,71
количество определений	262	258	230

представлены в [10]. Скорость удаления загрязняющего вещества из экосистемы определялась по оригинальному алгоритму [11]. Расчет величины АЕ экосистемы акватории восточной части Севастопольской бухты проводился, исходя из допущения о пространственной однородности полей распространения биогенных элементов в ее границах.

При расчете АЕ исследуемой в работе акватории бухты использовались морфометрические параметры из [5].

Результаты и обсуждение. Несмотря на то, что в процессе многолетних наблюдений было выявлено значительное поступление азота со стоком реки Черной в восточной части Севастопольской бухты для периода 1998 – 2012 гг. [7], его среднее содержание было значительно ниже соответствующих ПДК, что отвечает условиям использования выбранного метода оценки АЕ морской экосистемы.

Для определения скорости удаления неорганического азота временной ряд, выбранный из данных по исследуемому району, содержал 55 значений концентрации нитратов, 56 – нитритов и 49 – аммония. Расчетная скорость удаления варьировала в широком диапазоне, максимальные суточные значения достигали 0,781; 0,015 и 0,194 мкМ/л для нитратов, нитритов и аммония соответственно.

Как показано в табл.2, в среднем скорость удаления минерального азота изменялась от 1,5 мкМ/(дм³·год) (для нитритов) до 50 мкМ/(дм³·год) (для нитратов) за период исследования. Очевидно, разница в скорости элиминации разных форм азота при равных гидрометеорологических условиях определялась в первую очередь их исходным содержанием в морских водах акватории.

Расчетное время пребывания минеральных комплексов азота в водах исследуемой акватории показало, что нитраты и аммоний выводятся из экосистемы в среднем за месяц (28 дней для нитратов и 34 дня для аммония). Удаление нитритов происходит значительно медленнее, в среднем требуется более 50 дней.

Опираясь на данные мониторинговых наблюдений за 1998 – 2012 гг. и морфометрические параметры отдельных частей Севастопольской бухты в целом и ее восточной части, в частности, [5], можно дать оценку способности к самоочищению рассматриваемой в работе экосистемы. Среднегодовое расчетное удаление минерального азота из акватории восточной части Севастопольской бухты показано в табл.3.

Представленный в [7] расчет выноса биогенных веществ по замыкающему створу, находящемуся на расстоянии 11 км от устья реки Черной (г/п Хмель-

Т а б л и ц а 2. Характеристика способности экосистемы восточной части Севастопольской бухты к самоочищению в отношении форм неорганического азота в период исследований 1998 – 2012 гг.

формы азота	среднее содержание, мкМ/дм ³	скорость удаления, мкМ/(дм ³ ·год)	удельная (дм ³) величина АЕ, мкМ/год
нитраты	3,25	49,66	213,77
нитриты	0,20	1,52	2,17
аммоний	1,05	13,12	46,16

Т а б л и ц а 3. Сравнительная характеристика способности экосистемы восточной части Севастопольской бухты к самоочищению в отношении форм неорганического азота в период исследований 1998 – 2012 гг. и выноса их в Севастопольскую бухту с речным стоком [7].

формы азота характеристика	NO ₂ ⁻ , т/год	NO ₃ ⁻ , т/год	NH ₄ ⁺ , т/год
АЕ	0,18	17,36	3,75
г/п Хмельницкое, замыкающий створ р.Черной	0,17	9,5	9,4
нижнее течение р.Черной	0,23	42,9	7,5

ницкое), показал, что с речным стоком Севастопольская бухта ежегодно получает в среднем около 20 т минерального азота. Более того, учитывая факт существенной трансформации вод в нижнем течении реки, фактическая поставка азота может превышать 50 т. К этому следует добавить, что, согласно [7], вклад антропогенных источников в поставку биогенных веществ в Севастопольскую бухту составляет до 52 % общего поступления в бухту минерального азота. Таким образом, сравнительный анализ величины АЕ экосистемы восточной части Севастопольской бухты с поступлением неорганического азота только с водами реки Черной показывает значительное превышение потока ЗВ над способностью принимающей акватории к самоочищению (табл.3).

Вместе с тем, несмотря на значительный дисбаланс между привнесом биогенных комплексов с речными водами и расчетной способностью акватории к самоочищению, важно учитывать их неравномерное внутригодовое поступление в акваторию бухты, т.е. сезонность их вовлечения в биологические процессы. Так, согласно [11], в поступающих в бухту водах реки Черной преобладающая форма неорганического азота – нитратная, минимальные концентрации которой приходится на вегетационный период (апрель – июнь). Максимальное содержание суммы минеральных соединений азота ΣN (NO₂⁻ + NO₃⁻ + NH₄⁺) характерно для осенне-зимних паводков и также прослеживается в меженный период. 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 и заморных явлений.

Таким образом, о степени благополучия экосистемы исследуемого района Севастопольской бухты можно было бы судить только в условиях равномерного поступления биогенных элементов в объеме, не превышающем величину АЕ. При неоднородном их поступлении опасность для экосистемы представляют сезоны, в которые создается нагрузка, превышающую удельную величину АЕ (рассчитывается на единицу фиксированного объема, в нашем случае на дм³), составляющую 0,58; 0,006 и 0,13 мкМ в сутки для нитратов, нитритов и аммония соответственно.

Заключение. По данным мониторинговых наблюдений за содержанием неорганического азота в морских водах восточной части Севастопольской бухты выполнена оценка АЕ ее экосистемы по отношению к нитритам, нитратам и аммонии как приоритетным элементам биогенного комплекса, поступающим с выносом вод реки Черной.

Сравнительный анализ расчетной величины АЕ исследуемой экосистемы с привносом неорганического азота с речными водами показал недостаточность способности к самоочищению предустьевой акватории Севастопольской бухты.

Учитывая неравномерность внутригодового стока реки с выраженными периодами паводка и межени, актуально выполнение сезонной оценки АЕ экосистемы восточной части Севастопольской бухты с привязкой к гидролого-гидрохимическим характеристикам реки Черной как приоритетного источника поступления ЗВ.

Работа выполнена по гранту РФФИ проект № 18-45-920002 «Самоочистительная способность экосистем акваторий Севастопольской бухты в зависимости от уровня антропогенной нагрузки».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Репетин Л.Н., Гордина А.Д., Павлова Е.В., Романов А.С., Овсяный Е.И.* Влияние океанографических факторов на экологическое состояние Севастопольской бухты (Черное море) // *Морской гидрофизический журнал.*– 2003.– № 2.– С.66-80.
2. *Лопухин А.С., Овсяный Е.И., Романов А.С. и др.* Сезонные особенности гидролого-гидрохимической структуры вод Севастопольской бухты, микропланктон и распределение его биохимических компонент» (Черное море, наблюдения 2004 – 2005 гг.) // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.*– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007.– вып.15.– С.74-109.
3. *Атлас океанографических характеристик Севастопольской бухты / С.К.Коновалов, А.С.Романов, О.Г.Моисеенко и др.*– Севастополь, ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010.– 320 с.
4. *Иванов В.А., Овсяный Е.И., Репетин Л.Н., Романов А.С., Игнатъева О.Г.* Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов / *Препринт.*– Севастополь: МГИ НАН Украины, 2006.– 90 с.
5. *Стокозов Н.А.* Морфометрические характеристики Севастопольской и Балаклавской бухт // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.*– Севастополь, 2010.– вып.23.– С.198-208.
6. *Совга Е.Е., Мезенцева И.В., Котельянец Е.А.* Оценка экологического состояния акватории Севастопольской бухты в зоне влияния стока реки Черной // 1-й Международный экологический форум в Крыму «Крым эколого-экономический регион. Пространство ноосферного развития». Севастополь, 20-24 июня 2017 г.– С.236-240.
7. *Овсяный Е.И., Артеменко В.М., Романов А.С., Орехова Н.А.* Сток реки Черной как фактор формирования водно-солевого режима и экологического состояния Севастопольской бухты // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.*– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007.– вып.15.– С.57-65.

8. *Израэль Ю.А., Цыбань А.В.* Антропогенная экология океана.– Л.: Гидрометеоздат, 1989.– 528 с.
9. *Совга О.Є., Мезенцева І.В., Любарцева С.П.* Оцінка асиміляційної місткості екосистеми Дніпровського лиману щодо нафтопродуктів як метод нормування їх скиду в акваторію лиману // Доп. НАН України. Математика, природознавство, технічні науки.– 2011.– № 10.– С.105-109.
10. *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.– вып.3.– С.57-68.
11. *Sovga E., Mezentseva I., Verzhavskaia L.* Assimilation capacity of the ecosystem of Sevastopol Bay // Proc. 12th Intern. Conf. on the Mediterranean Coastal Environment MEDCOAST' 2015, 6-10 Oct. 2015.– Varna, Bulgaria, 2015.– v.1.– P.317-326.
12. *Овсяный Е.И., Орехова Н.А.* Гидрохимический режим реки Черной (Крым): экологические аспекты // Морской гидрофизический журнал.– 2018.– т.34, № 1.– С.82-94.

Матеріал поступил в редакцию 18.01.2019 г.

I.V.Mezentseva, E.E.Sovga

SELF-PURIFICATION ABILITY OF THE ECOSYSTEM OF THE EAST PART OF THE SEVASTOPOL BAY WITH RESPECT TO INORGANIC NITROGEN

The rate of removal of mineral nitrogen is calculated based on monitoring data on biogenic elements in the marine waters of the eastern part of the Sevastopol Bay, which is influenced by the Chernaya River runoff as the dominant source of nutrients. The ecosystem's ability of the selected area to self-purification with respect to certain forms of inorganic nitrogen is assessed. Comparative analysis of the assimilation capacity of the ecosystem under study with inorganic nitrogen introduced by the Chernaya River waters was showed a lack of accuracy in the ability to self-purify the ecosystem of the mouth of the Sevastopol Bay.

KEYWORDS: inorganic forms of nitrogen, self-purification ability, assimilation capacity of the ecosystem, eastern part of the Sevastopol Bay, the Chernaya River