

Е.Е.Совга¹, И.В.Мезенцева²

¹Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь

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

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ АКВАТОРИИ СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УРОВНЯ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ

По результатам мониторинговых наблюдений за содержанием неорганических форм азота в морских водах отдельных акваторий Севастопольской бухты, в разной степени подверженных антропогенным нагрузкам, выполнена оценка экологического состояния экосистемы Южной бухты, восточной и западной частей бухты и ее центральной части. В зависимости от локализации источников загрязнения, морфометрии и гидрометеорологических условий в Севастопольской бухте образуются как относительно «чистые» зоны, так и зоны устойчивого высокого уровня загрязнения (например, Южная бухта). Центральная часть акватории Севастопольской бухты находится под опосредованным совокупным влиянием береговых источников загрязнения, интенсивного судоходства, стока р.Черной, особенно в периоды паводка, а также зависит от гидродинамических характеристик акватории.

Путем расчета ассимиляционной емкости указанной экосистемы балансовым методом по отношению к неорганическим формам азота оценена ее способность к естественному самоочищению с учетом существующих источников загрязнений. Получены характеристики скорости удаления минерального азота и предельно-допустимые объемы его поступления в рассматриваемую акваторию. На основе рассчитанных величин ассимиляционной емкости получены оценки показателя благополучия экосистемы по усредненным данным за 1998 – 2012 гг. Показано, что по всем формам неорганического азота экосистема центральной части Севастопольской бухты относится к зоне устойчивого экологического благополучия. Нагрузка на рассматриваемую акваторию не превышает ее самоочистительной способности и, соответственно, не нарушает нормальное функционирование системы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *неорганические формы азота, способность к самоочищению, экологическое благополучие, ассимиляционная емкость экосистемы, Севастопольская бухта, центральная часть*

doi: 10.22449/2413-5577-2019-3-52-60

Введение. Севастопольская бухта, являясь одним из градообразующих элементов города Севастополь, вместе с тем служит индикатором экологического здоровья региона. Бухта представляет собой полузамкнутую акваторию эстуарного типа длиной около 7 км, максимальной шириной до 1 км, площадью зеркала более 7 км² с затрудненным водообменом и постоянным активным антропогенным воздействием широкого спектра.

Систематические исследования качества вод Севастопольской бухты начаты с 1975 г. при введении в действие программы Общегосударственной службы наблюдения и контроля окружающей среды (ОГСНК) [1]. По ре-

© Е.Е.Совга, И.В.Мезенцева, 2019

Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. вып.3. С.52-60.

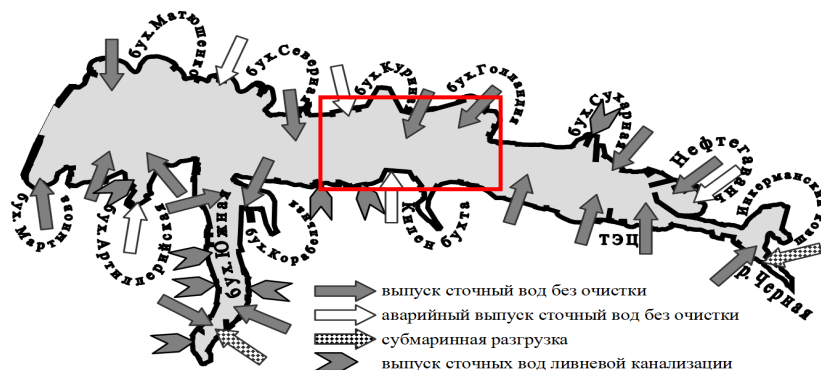
зультатам гидролого-гидрохимических исследований Севастопольской бухты имеется обширная научная информация ([2 – 4] и другие). Как подробно рассмотрено в [5], в бухте наблюдаются стоковые, ветровые и градиентные течения. Стоковые течения обусловлены поступлением вод реки Черной, одной из наиболее многоводных рек юго-запада Крыма, и действуют постоянно, а в период половодья становятся преобладающими. Влияние речного стока дополняется действием ветров, их изменчивостью, которые определяют интенсивность штормового волнения, перестройку вертикальной структуры вод, особенности горизонтальной циркуляции.

В зависимости от локализации источников загрязнения, морфометрии и гидрометеорологических условий в Севастопольской бухте образуются как относительно «чистые» зоны, так и зоны устойчивого высокого уровня загрязнения (например, Южная бухта) [6].

Высокую неравномерную нагрузку на морскую акваторию оказывают расположенные на прилегающей территории городские промышленные предприятия, хозяйственные и рекреационные объекты. Более тридцати временных и постоянно действующих выпусков поставляют в Севастопольскую бухту ливневые воды с площади водосбора. Ежедневно в бухту сбрасывается до 10 – 15 тыс. м³ неочищенных или условно-чистых вод с широким спектром загрязняющих веществ в концентрациях, значительно превышающих допустимые нормы. Основные источники загрязнения морской среды Севастопольского региона, а также предварительная оценка масштаба и характера загрязнения рассмотрены в ряде работ, в том числе [7, 8]. Схема расположения основных источников загрязнений бухты представлена на рис.1 [7].

Рассматриваемая в настоящей работе центральная часть акватории Севастопольской бухты (рис.1) находится под опосредованным совокупным влиянием береговых источников загрязнения, интенсивного судоходства, стока р.Черной, особенно в периоды паводка, а также зависит от гидродинамических характеристик акватории.

Как показано на рис.1, вдоль побережья центральной части Севастопольской бухты расположено значительно меньшее количество ливневых стоков и выпусков сточных вод без очистки, чем в других ее частях (например, в Южной бухте).



Р и с . 1 . Источники загрязнения вод Севастопольской бухты. Красной линией обозначен район исследования в центральной части Севастопольской бухты в 1998 – 2012 гг.

Оценки водного баланса Севастопольской бухты показывают, что атмосферные осадки, хозяйственно-бытовые и ливневые стоки в сумме составляют около 30 %, в то время как годовой объем стока р.Черной – 70 % объема приходной части [1].

Уровни загрязнения бухты в значительной мере определяются динамикой вод и термохалинным режимом, которые зависят от климатических особенностей прибрежной зоны юго-западной части Крыма, режима ветра, изменений условий водообмена с морем и внутри бухты [9].

По предварительной оценке, исходя из нормы атмосферных осадков для г.Севастополя 421 мм в год и состава ливневых вод, с 1 км² площади городской застройки в Севастопольскую бухту ежегодно поступает: 1,2 т углеводов, 1680 т взвеси, 21,5 кг фосфатов, 47,6 кг нитратов. Данная оценка, основанная на единичных анализах состава ливневых стоков одного из районов г.Севастополя [10], является ориентировочной и, по-видимому, заниженной.

Динамика биогенных элементов (группы азоты, фосфора и кремния) в Севастопольской бухте за период с 2006 – 2010 гг. рассмотрена в [11]. Определено, что в большинстве случаев поступление биогенных элементов является результатом антропогенной деятельности. Акватории с максимальным содержанием этих элементов приурочены к местам сброса ливневых стоков: Южная бухта и район Инкермана. Выявлено, что антропогенный вклад оказывает большее влияние на содержание биогенных элементов в акватории бухты, чем естественные биохимические процессы. Содержание в водной толще Севастопольской бухты биогенных элементов (фосфатов, кремнекислоты, аммония, нитратов и нитритов) находится в прямой зависимости от источников их поступления (речной и ливневый стоки, муниципальные и промышленные сточные воды и пр.), а также от степени их вовлечения в биологические процессы [11]. В основном, максимальное содержание биогенных веществ наблюдается в зимний период, когда их потребление фитопланктоном резко снижается.

Наличие в границах акватории двух встречных потоков – одного с востока на запад со стороны р.Черной и второго со стороны открытой части моря – способствует формированию в центральной части Севастопольской бухты буферной зоны, на которой как бы замыкаются разнонаправленные потоки, в том числе и «обогащенные» загрязнением. Существенно меньшие содержания неорганических форм азота для центральной части бухты во все сезоны года показаны в [5].

Как указывалось ранее [12 – 13], экологическое благополучие экосистем морских мелководных акваторий, не зависимо от проводимых природоохранных мероприятий, в первую очередь, определяется их самоочищительной способностью. Активность природного самоочищения морских акваторий определяется взаимно обусловленными процессами, в том числе различным по масштабам и составу поступлением в них загрязняющих веществ (ЗВ), взаимодействием вод с донными отложениями и морским аэрозолем, перераспределением и трансформацией вещества биологической компонентой водоема, включая процессы самоочищения и накопления в гидробионтах, динамическим переносом. Оценка способности мелководных акваторий к самоочищению может быть выполнена через расчет их ассими-

ляционной емкости (АЕ) по отношению к приоритетному ЗВ или комплексу.

Цель настоящей работы состояла в оценке экологического состояния центральной части Севастопольской бухты путем расчета ассимиляционной емкости по отношению к формам неорганического азота с учетом интегрального времени их элиминации через изменение валового содержания в воде за счет воздействия динамических, физических, химических и биологических процессов. На основе рассчитанной величины АЕ определить уровень экологического благополучия исследуемой акватории.

Ранее в [12] осуществлен сравнительный анализ способности к самоочищению и экологического благополучия наиболее экологически неблагополучной части Севастопольской бухты (Южная бухта) с более чистой частью акватории, граничащей с открытым морем, без рассмотрения экологического состояния центральной части бухты.

Материалы и методы исследования. В работе использованы результаты мониторинговых гидрохимических наблюдений Морского гидрофизического института РАН (БОД МГИ) за содержанием минеральных форм азота (нитриты, нитраты, аммоний) в поверхностных и придонных водах центральной части акватории Севастопольской бухты в период с мая 1998 г. по апрель 2012 г. За рассматриваемый период массив натуральных данных представлен результатами 1563 определений содержания неорганического азота в морских водах, выполненных фотометрическим методом в стационарной химлаборатории МГИ (табл.1).

Оценка способности морской экосистемы к самоочищению выполнялась балансовым методом, в основу которого положена концепция, представленная в [15]. Методика расчета величины АЕ морской экосистемы приведена в [16]. Скорость удаления загрязняющего вещества из экосистемы определялась по оригинальному алгоритму [17]. Расчет величины АЕ экосистемы акватории центральной 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 использованы данные морфометрических параметров [14]. Исследуемая центральная часть Севастопольской бухты в целом наиболее глубоководная, имеет среднюю глубину 13,1 м с максимальными значениями по фарватеру до 19,5 м.

Для диагностики экологического благополучия акватории с учетом АЕ использовали показатель P_i , характеризующий степень отклонения нагрузки

Т а б л и ц а 1. Характеристика массива данных, полученных в результате наблюдений за содержанием форм минерального азота в водах центральной 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	0,13	1,71	0,71
диапазон концентраций	0 – 1,93	0 – 13,90	0 – 8,31
пороговое значение концентраций / ПДК	1,43	221,43	20,71
количество определений	544	522	497

для i -го компонента в год от AE_i и рассчитываемый по формуле [18]:

$$P_i = \frac{(C_i - ПДК_i) \cdot V_i}{M_i} - 1,$$

где C_i – среднее содержание i -го ЗВ, V_i – объем воды в расчетной области, M_i – расчетная допустимая согласно АЕ масса вещества для акватории в год.

Результаты и обсуждение. Рассматриваемая в работе центральная часть Севастопольской бухты находится на значительном удалении от устьевоего стока реки Черная, выпусков сточных вод (без очистки) и аварийных выпусков в Южной бухте, в районе Нефтегавани, ТЭЦ и в кутовой восточной части Севастопольской бухты, где также имеются источники субмаринной разгрузки. По суммарному содержанию неорганического азота в среднем для периода 1998 – 2012 гг. согласно нашим данным воды района были в полтора раза чище сопредельных акваторий и в 5,4 раза чище, чем в крайне загрязненной акватории Южной бухты (рис.2).

Средние за период наблюдений значения содержания всех форм неорганического азота не превышали соответствующие ПДК, величины которых были использованы в качестве порогового значения, что отвечает условиям применения выбранного метода оценки АЕ морской экосистемы. Полученные расчетным путем удельные (в пересчете на 1 л) величины АЕ для каждой из форм неорганического азота отличаются от соответствующих ПДК (табл.1), позволяя более точно оценить предел способности конкретной экосистемы к самоочищению.

Расчетная скорость удаления варьировала в широком диапазоне, максимальные суточные значения достигали 0,12 мкМ/л для нитратов и нитритов, 0,20 мкМ/л – для аммония.

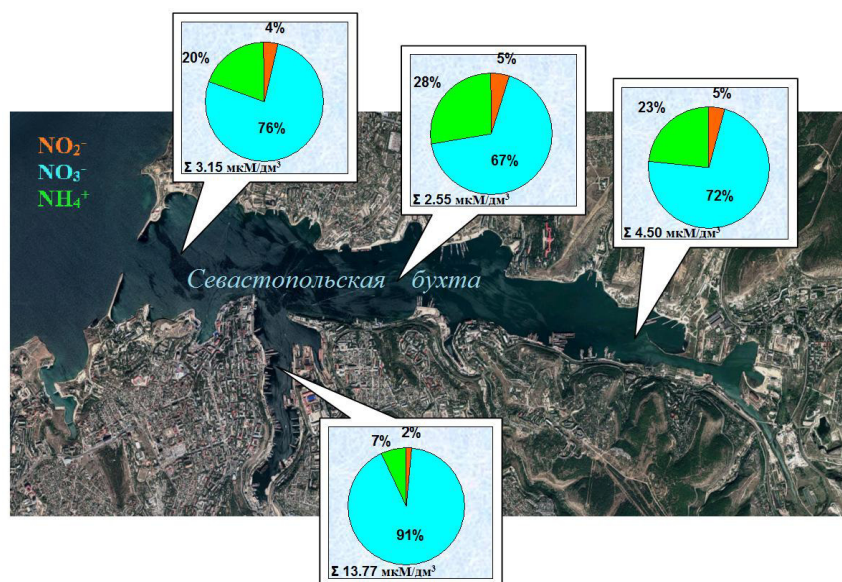


Рис. 2. Распределение среднего пропорционального содержания форм неорганического азота в морских водах отдельных районов Севастопольской бухты в 1998 – 2012 гг.

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

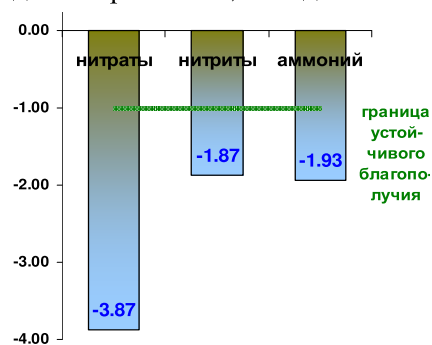
формы азота	среднее содержание, мкМ/дм ³	скорость удаления, мкМ/(дм ³ ·год)	время удаления, час	удельная (дм ³) величина АЕ, мкМ/год
нитриты	0,13	2,22	555	1,49
нитраты	1,71	15,66	1066	224,15
аммоний	0,71	10,37	528	29,24

Несмотря на то, что средняя для периода наблюдений скорость элиминации нитратов превышает соответствующий показатель для нитритов и аммония (табл.2), расчетное время пребывания минеральных комплексов азота в водах исследуемой акватории показало, что нитриты и аммоний выводятся из экосистемы в среднем за 22 – 23 дня. Удаление нитратов происходит вдвое медленнее, для полного самоочищения в среднем требуется более 44 дней.

Согласно морфометрическим параметрам отдельных частей Севастопольской бухты, представленным в [14], и полученной оценке способности исследуемой морской экосистемы к самоочищению для периода мониторинговых наблюдений 1998 – 2012 гг. количество поступающего за год в центральную акваторию Севастопольской бухты неорганического азота не должно превышать 0,48 т для нитритов, 71,56 т для нитратов и 9,33 т для аммонийного азота. Необходимо обратить внимание, что показанное количественное ограничение сбросов неорганического азота допустимо исключительно при равномерном (плановом) поступлении их в акваторию. В условиях аварийных залповых сбросов или сезонного увеличения поступления биогенных комплексов при оценке способности к самоочищению рассматриваемой экосистемы следует ориентироваться на удельную величину АЕ, составляющую для нитритов – 0,004, для нитратов – 0,61 и для аммонийного азота – 0,08 мкМ/л в сутки.

Согласно [18] состояние системы рассматривается как благополучное, если $P_i \leq -1$. При этом $C_i \leq ПДК_i$, т.е. уровень загрязнения не превышает допустимый. При относительном благополучии $-1 \leq P_i \leq 0$, исходный уровень загрязнения нивелируется с помощью процессов самоочищения до допустимого уровня. Состояние экосистемы с $P_i > 0$ является экологически неблагополучным.

Расчет показателя экологического благополучия экосистемы центральной части Севастопольской бухты позволил установить, что по всем формам неорганического азота экосистема выделенного



Р и с . 3. Величины показателя экологического благополучия экосистемы центральной части Севастопольской бухты для форм неорганического азота в 1998 – 2012 гг.

района попадает в зону устойчивого благополучия (рис.3). Нагрузка на акваторию не превышает ее самоочистительную способность и, соответственно, не нарушает ее нормальное функционирование.

Заключение. Сравнительный анализ содержания неорганического азота в водах Севастопольской бухты показал, что воды центральной ее части, находящейся на достаточном удалении от характерных источников биогенного загрязнения (сток р.Черной, субмаринная разгрузка в восточной части Севастопольской бухты и бухте Южная, вдольбереговой перенос с КОС «Южные»), характеризуются наименьшим суммарным содержанием минерального азота, преимущественно за счет нитратной составляющей.

Несмотря на наибольшую для неорганических компонентов азота среднюю скорость элиминации нитратов, требуемое на их удаление время вдвое превышает соответствующий показатель для нитритов и аммония.

При равномерном (плановом) поступлении в центральную акваторию Севастопольской бухты количество неорганического азота за год не должно превышать 0,48 т для нитритов, 71,56 т для нитратов и 9,33 т для аммонийного азота.

Рассчитанное по величине АЕ экологическое благополучие исследуемой акватории центральной части Севастопольской бухты показало устойчивое экологическое благополучие по отношению к неорганическим формам азота, связанное как с расположением акватории вдали от источников биогенных элементов, таких как устье р.Черной [19], так и уменьшением количества неочищенных и ливневых стоков, образованием в акватории так называемой «буферной» зоны, что, возможно, не оправдается при исследовании таких консервативных загрязнителей, как нефтепродукты. В центральной части бухты было установлено экологическое неблагополучие данной акватории по отношению к нефтепродуктам при расчете АЕ синоптическим методом по результатам конкретной океанографической съемки данной акватории.

Работа выполнена по гранту РФФИ проект № 18-45-920002 «Самоочистительная способность экосистем акваторий Севастопольской бухты в зависимости от уровня антропогенной нагрузки» и в рамках государственного задания по теме 0827-2018-0004 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей» (шифр «Прибрежные исследования»)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Современное состояние загрязнения вод Черного моря* / Под ред. Симонова А.И., Рябина А.И. / Гидрометеорология и гидрохимия морей. т.IV. Черное море. вып.3.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 1996.– 230 с.
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* / Коновалов С.К., Романов А.С., Моисеенко О.Г. и др.– Севастополь, ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010.– 320 с.
4. *Иванов В.А., Овсяный Е.И., Репетин Л.Н. и др.* Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов / Препринт.– Севастополь: МГИ НАН Украины, 2006.– 90 с.
5. *Совга Е.Е., Мезенцева И.В., Хмара Т.В., Слепчук К.А.* О перспективах и возможностях оценки самоочистительной способности акватории Севастопольской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь, 2014.– вып.28.– С.153-164.
6. *Павлова Е.В., Овсяный Е.И., Гордина А.Д., Романов А.С.* Современное состояние и тенденции изменения экосистемы Севастопольской бухты // Акватория и берега Севастополя: экосистемные процессы и услуги обществу.– Севастополь: Аквавита, 1999.– С.70-94.
7. *Овсяный Е.И., Романов А.С., Миньковская Р.Я.* и др. Основные источники загрязнения морской среды Севастопольского региона // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь, 2001.– вып.2.– С.138-152.
8. *Курфтаркова Е.А., Губанов В.И., Ковригина Н.П.* и др. Экологическая оценка современного состояния вод в районе взаимодействия Севастопольской бухты с прилегающей частью моря // Морской экологический журнал.– 2006.– № 1.– С.72-91.
9. *Иванов В.А., Мезенцева И.В., Совга Е.Е. и др.* Оценка самоочищающей способности экосистемы Севастопольской бухты по отношению к неорганическим формам азота // Процессы в геосредах.– 2015.– № 2(2).– С.55-65.
10. *Мионов О.Г.* Состав органической компоненты ливневых стоков в районе г.Севастополя // Междунар. конф. АСОПС «Оценка расположенных на суше источников загрязнения морей, омывающих страны СНГ». Севастополь, 6-10 апреля 1992 г.– Севастополь, 1992.– т.1.– С.48-49.
11. *Орехова Н.А., Романов А.С., Хоружий Д.С.* Межгодовые изменения концентрации биогенных элементов в Севастопольской бухте за период 2006 – 2010 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011.– вып.25.– С.192-199.
12. *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.ХХVIII, № 4.– С.38-51.
13. *Мезенцева И.В., Совга Е.Е.* Самоочистительная способность экосистемы восточной оконечности Севастопольской бухты по отношению к неорганическим формам азота // Журнал // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря.– 2019.– вып.1.– С.71-77.
14. *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.
15. *Израэль Ю.А., Цыбань А.В.* Антропогенная экология океана.– Л.: Гидрометеопиздат, 1989.– 528 с.

16. *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.
17. *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 October 2015.– Varna, Bulgaria, 2015.– v.1.– P.317-326.
18. *Шаврак Е.И.* Ассимиляционная емкость Цимлянского водохранилища и устойчивость аккумуляционных процессов // Вестник ВГУ. Серия география, геоэкология– 2013.– № 2.– С.93-98.
19. *Ovsyany E.I., Orekhova N.A.* Hydrochemical regime of the River Chernaya (Crimea): environmental aspects // Physical Oceanography.– 2018.– v.25, iss.1.– P.77-89.

Матеріал поступив в редакцію 10.08.2019 г.

E.E.Sovga, I.V.Mezentseva

ECOLOGICAL CONDITION OF THE CENTRAL PART OF SEVASTOPOL BAY DEPENDING ON THE ANTHROPOGENIC LOAD LEVEL

Based on monitoring observations of inorganic nitrogen content in the sea water of separated parts of the Sevastopol Bay, which are subject to various anthropogenic impact, the ecological state of the ecosystems of the Yugnaya Bay, the eastern and western parts of the bay and its central part is estimated. Depending on pollution sources localition, morphometry and meteorological conditions, in the Sevastopol Bay there are both relatively «pure» areas and areas of persistently high pollution levels (for example, the Yugnaya Bay). The central part of the Sevastopol Bay is under indirect influence as all coastal sources of pollution, intensive navigation, the Chernaya River runoff, especially during floods, it also depends on the hydrodynamic regime of the water area.

Taking into account existing sources of pollution the ecosystem ability to naturally self-purification has been estimated by calculating the assimilation capacity of this ecosystem in relation to inorganic nitrogen using the balance method. The rate of removal of mineral nitrogen and the maximum permissible volumes of its entry into the considered water area are obtained. Based on the calculated assimilation capacity, the ecosystem well-being indicator is estimated from averaged data for 1998 – 2012. It is shown that in all forms of inorganic nitrogen, the ecosystem of the central part of the Sevastopol Bay belongs to the area of sustainable ecological well-being. The load on the considered water area does not exceed its self-purification ability and, accordingly, does not disturb the normal functioning of the system.

KEYWORDS: inorganic forms of nitrogen, self-purification ability, ecological well-being, ecosystem assimilation capacity, the Sevastopol Bay, central part