

УДК 551.464(262.5)

© Е. Е. Совга<sup>1\*</sup>, И. В. Мезенцева<sup>2</sup>, Т. В. Хмара<sup>1</sup>, 2022

<sup>1</sup>Морской гидрофизический институт РАН, 299011, г. Севастополь, Капитанская ул., д. 2

<sup>2</sup>Севастопольское отделение ФГБУ «Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова», 299011, г. Севастополь, Советская ул., д. 61

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

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЫ И ОЦЕНКИ САМООЧИСТИТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ЕЕ ЭКОСИСТЕМЫ

Статья поступила в редакцию 20.04.2021, после доработки 30.10.2021, принято в печать 11.03.2022

### Аннотация

Приведены результаты численных экспериментов по оценке гидродинамического режима восточной части Севастопольской бухты с учетом влияния стока реки Черной (паводковый и меженный периоды) и Южной бухты с учетом уровня техногенной нагрузки с помощью гидротермодинамического блока численной трехмерной нестационарной модели МЕССА (Model for Estuarine and Coastal Circulation Assessment).

Результаты расчета особенностей гидродинамического режима выделенных акваторий бухты использованы при анализе способности к самоочищению их экосистем путем расчета ассимиляционной емкости в отношении неорганического фосфора, как приоритетного загрязняющего вещества в муниципальных и ливневых стоках акватории бухты и определяющего фактора эвтрофикации водоема. При этом для нивелирования влияния различий в объемах вод исследуемых акваторий при расчетах самоочистительной способности в работе получены оценки удельной ассимиляционной емкости их экосистем.

Показано, что для восточной кутовой части бухты согласно полученным модельным расчетам в периоды паводков циркуляция вод в поверхностном слое вод способствует распространению загрязняющих веществ на всю акваторию бухты. В период межени в восточной части бухты преобладают течения, направленные к устью реки Черной и в поверхностном, и в придонном слое вод как при северо-западном, так и при западном направлениях ветра, что способствует накоплению загрязняющих веществ в этой части бухты, уменьшая таким образом ее способность к самоочищению.

Анализируются возможные причины низкой самоочистительной способности экосистемы восточной части Севастопольской бухты в отношении неорганического фосфора, которые связаны как с объемами поступающих вод реки Черной в периоды зимних паводков и летней межени, а также с особенностями морфометрического строения дна акватории.

Для акватории Южной бухты гидродинамический режим характеризуется затрудненным водообменом с основной акваторией. Вентиляция вод акватории Южной бухты определяется согласно результатам расчета в основном ветровым режимом, в результате которого происходит либо запираание вод в бухте, либо вынос их за ее пределы, что сказывается на способности к самоочищению ее экосистемы.

**Ключевые слова:** Севастопольская бухта, река Черная, Южная бухта, восточная часть бухты, гидродинамический режим, паводки, межень, ассимиляционная емкость, неорганический фосфор, экосистема

© Е. Е. Sovga<sup>1\*</sup>, I. V. Mezentseva<sup>2</sup>, T. V. Khmara<sup>1</sup>, 2022

<sup>1</sup>Marine Hydrophysical Institute of RAS, 299011, Sevastopol, Kapitanskaya Str., 2, Russia

<sup>2</sup>Sevastopol Branch of the N.N. Zubov State Oceanographic Institute, 299011, Sevastopol, Sovetskaya Str., 61, Russia

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

## SIMULATION OF SEASONAL HYDRODYNAMIC REGIME IN THE SEVASTOPOL BAY AND OF ASSESSMENT OF THE SELF-PURIFICATION CAPACITY OF ITS ECOSYSTEM

Received 20.04.2021; Revised 30.10.2021; Accepted 11.03.2022

### Abstract

The numerical experiments were carried out to assess the hydrodynamic regime of the eastern part of the Sevastopol Bay, subject to the Chernaya River runoff (high- and low-water periods) and the Yuzhnaya Bay, subject to the technogenic load using the hydrothermodynamic block of the numerical three-dimensional unsteady model MECCA (Model for Estuarine and Coastal Circulation Assessment).

Ссылка для цитирования: Совга Е.Е., Мезенцева И.В., Хмара Т.В. Моделирование сезонной изменчивости гидродинамического режима Севастопольской бухты и оценки самоочистительной способности ее экосистемы // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 2. С. 110–123. doi:10.48612/fpg/92ge-ahz6-n2pt

For citation: Sovga E.E., Mezentseva I.V., Khmara T.V. Simulation of Seasonal Hydrodynamic Regime in the Sevastopol Bay and of Assessment of the Self-Purification Capacity of its Ecosystem. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 2, 110–123. doi:10.48612/fpg/92ge-ahz6-n2pt

The simulated hydrodynamic parameters of the selected parts of the Sevastopol Bay were used to analyze the self-purification capacity of their water bodies by calculating the assimilation capacity for inorganic phosphorus. Phosphates suggested as a priority pollutant in municipal and storm runoffs in the water area of the bay and a determining factor of its in the bay eutrophication. At the same time, to neutralize the differences in the water volumes of the studied water areas when calculating the self-purification ability, estimates of the specific assimilation capacity of their ecosystems were obtained.

According to the simulations for the eastern apex part of the bay during high-water period, the water circulation in the surface layer contributes to the spread of pollutants throughout the entire water area of the bay. During the low-water period in the eastern part of the bay, currents prevail, directed towards the Chernaya River mouth in the surface and in the bottom water layer both in the northwestern and western wind directions. It contributes to pollutant accumulation in this part of the bay, thus reducing ability to self-purification.

Possible reasons for the low self-purification capacity of the ecosystem of the eastern part of the Sevastopol Bay with respect to inorganic phosphorus are analyzed, which are associated both with the volumes of incoming Chernaya River waters during winter high- and summer low-water periods, as well as with the features of the morphometric structure of the water area bottom.

For the Yuzhnaya Bay water area, the hydrodynamic regime is defined by a difficult water exchange with the main water area. Ventilation of the waters of the Yuzhnaya Bay is mainly determined by the wind regime, as a result of which the waters are either trapped in the bay or carried out of it, which undoubtedly affects the self-purification capacity of its ecosystem.

**Keywords:** Sevastopol Bay, Chernaya River, Yuzhnaya Bay, eastern part of the bay, hydrodynamic regime, high water, low water, self-purification capacity, inorganic phosphorus, ecosystem

## 1. Введение

Севастопольская бухта как часть устьевое взморья реки Черной является полузамкнутой акваторией эстуарного типа с ограниченным водообменом с открытым морем. Бухта относится к числу морских акваторий, которые подвержены постоянному техногенному и антропогенному воздействию.

В зависимости от морфометрических характеристик водоема, гидрометеорологических условий и локализации источников загрязнения в Севастопольской бухте образуются зоны с различным уровнем загрязнения. Ранее было предложено разделить акваторию Севастопольской бухты на четыре района [1, 2]. Географически зоной слабого загрязнения является западная часть бухты W, умеренного — восточная E. Зона сильного загрязнения занимает центральную часть бухты С. Очень сильным загрязнением отличается Южная бухта S, в воды которой поступают рекордные объемы бытовых и ливневых стоков [1], в ее акватории располагаются причалы яхт, кораблей и катеров (рис. 1).

Динамику вод и термохалинный режим бухты определяют климатические особенности прибрежной зоны юго-западной части Крыма, режим ветра, условия водообмена с морем и внутри бухты.

Преобладающие над прибрежной зоной моря северные, северо-восточные и южные, юго-восточные ветры трансформируются над акваторией бухты в северо-восточные, восточные (36 %) и южные (20 %) ветры [1, 3]. Это происходит из-за вытянутой в зональном направлении ориентации бухты, окруженной высокими берегами. Несмотря на общее преобладание восточных ветров, их скорость по сравнению с другими румбами минимальна.



Рис. 1. Деление Севастопольской бухты на районы с различной степенью загрязнения по [1, 2]

Fig. 1. Division of the Sevastopol Bay into areas with different degrees of pollution (according to [1, 2])

Характерными чертами динамики вод бухты являются усиление течений у берегов и вихревые образования в восточной части бухты. Сходящиеся течения замыкаются возле входа в бухту, искусственно суженного молами почти вдвое и соединяющего Севастопольскую бухту с прилегающей частью моря, и компенсируются относительно медленным, но обширным переносом восточного направления.

Установившаяся циркуляция в Севастопольской бухте, обусловленная суточным ходом гидрометеорологических характеристик и стоком реки Черной, нарушается при стгонно-нагонных явлениях, в период паводков и штормов. Наибольшее воздействие на режим течений в Севастопольской бухте оказывают западные и восточные ветры. Под их воздействием формируется баротропная составляющая течений, она сопоставима с амплитудой сейшевых колебаний, период которых составляет около 1 ч.

Особенности сезонной изменчивости гидродинамического режима Севастопольской бухты при конкретных гидрометеоситуациях в регионе оценивались по результатам натурных измерений, а также с использованием методов математического моделирования.

По результатам натурных сезонных измерений [4, 5] в глубоководной части бухты профили скорости течений имели хорошо выраженную двухслойную структуру. В верхнем слое течения направлены на восток, в нижнем — на запад. Скорость водообмена с открытым морем составила около  $100 \text{ м}^3/\text{с}$ . При этом определяющую роль в пространственной структуре динамики вод бухты играет направление и скорость ветра.

Исследование течений в бухте проводилось также с использованием математического моделирования. Некоторые черты общей циркуляции в бухте удалось описать, несмотря на довольно существенные упрощения [6].

Выполнены расчеты циркуляции вод в бухте для летнего и зимнего сезонов с использованием численной модели динамики вод [7]. Показано, что при сохранении общей направленности потока в верхнем слое вод из бухты к морю различные ветровые условия изменяют водообмен между внутренними бухтами. На основе диагностических расчетов циркуляции вод в бухте проведено моделирование процессов переноса загрязняющей примеси, поступающей из разных источников, в том числе с водами реки Черной [8].

В вышеуказанных работах проводилось моделирование циркуляции вод Севастопольской бухты в целом, без детализации в ее отдельных частях. В данной работе с помощью математического моделирования проведено исследование циркуляции вод различных частей Севастопольской бухты, находящихся под антропогенным воздействием. Основное внимание было уделено особенностям циркуляции вод в Южной бухте, наиболее подверженной загрязнению, и кутовой части, находящейся под влиянием стока реки Черной.

Содержание биогенных элементов (соединения азота, фосфора и кремния) в водной толще Севастопольской бухты зависит от источников их поступления (водообмен с морем, речной и ливневый стоки, муниципальные и промышленные сточные воды, атмосферные осадки), а также от степени вовлечения в биологические процессы. Анализ изменчивости содержания биогенных элементов в водах Севастопольской бухты за период 2006–2010 гг. [9] показал, что районы с максимальным содержанием этих элементов приурочены к местам ливневых стоков: районы бухт Южной и Артиллерийской, Инкермана. Делается заключение, что антропогенный фактор, а не естественные биохимические процессы, оказывает большее влияние на содержание биогенных элементов в акватории указанных районов бухты.

Для условий 2015 года проведено сравнение экологического состояния восточной кутовой части Севастопольской бухты в периоды февральского зимне-весеннего паводка и сентябрьской межени [10]. При этом рассмотрены причины и гидрометеословия формирования конкретного зимне-весеннего паводкового режима реки Черной в феврале 2015 г.

Экологическое состояние акватории Севастопольской бухты анализируется по способности к самоочищению экосистем восточной, центральной, западной частей бухты и Южной бухты по отношению к неорганическому азоту, как одному из приоритетных загрязняющих веществ (ЗВ) в муниципальных и ливневых стоках [11, 12]. Показана оценка ассимиляционной емкости (АЕ) выделенных экосистем без учета влияния на процесс самоочищения гидродинамического режима. В литературе отсутствует информация по анализу отличий в поведении неорганического азота и фосфора в зависимости от гидродинамического режима в акватории Севастопольской бухты, включая периоды зимних паводков и летней межени, особенно в ее восточной части, что составляет новизну настоящей работы.

**Цель работы** — с применением методов моделирования оценить сезонную изменчивость гидродинамического режима отдельных частей акватории Севастопольской бухты и его влияние на самоочистительную способность экосистем бухты по отношению к неорганическому фосфору.

В работе решались две задачи:

1) выявить современные особенности циркуляции вод в Южной бухте, а также в восточной части Севастопольской бухты с учетом стока реки Черной (паводковый и меженный периоды) и морфометрических особенностей строения дна;

2) оценить влияние гидродинамического режима бухты на способность к самоочищению вод выделенных частей акваторий бухты по отношению к неорганическому фосфору.

Выбор неорганического фосфора в качестве приоритетного ЗВ мелководных морских акваторий обусловлен следующими обстоятельствами:

– неорганический фосфор в виде фосфатов является одним из приоритетных ЗВ в муниципальных и ливневых стоках, попадающих в море в большинстве случаев без очистки;

– в отличие от неорганического азота, фосфор не имеет газообразных форм в воде и его способность сорбироваться на мелкодисперсных взвешках, особенно на гидроксиде железа общеизвестна, и таким путем осуществляется его накопление в донных отложениях. Однако, при увеличении поступления органического вещества в донные отложения и его разложения в условиях дефицита кислорода, может происходить высвобождение адсорбированных фосфатов и их поступления в водную толщу, так называемое явление вторичного загрязнения вод. Такое явление и имело место в кутовой восточной части Севастопольской бухты летом 2015 г. [13].

Оценка самоочистительной способности экосистем бухты по отношению к неорганическому фосфору осуществляется впервые.

## 2. Материалы и методы

### 2.1. Методы оценки гидродинамического режима бухты

Для оценки сезонной динамики вод в отдельных частях Севастопольской бухты и в выделенных в настоящей работе ее акваториях использовался гидротермодинамический блок численной трехмерной нестационарной модели МЕССА (Model for Estuarine and Coastal Circulation Assessment) [14].

Гидродинамический блок модели представляет собой трехмерную прогностическую гидродинамическую модель, реализованную в криволинейной по вертикали системе координат, с использованием неявных конечно-разностных схем. Базовыми уравнениями модели являются: два уравнения для горизонтальных компонент скорости течений, уравнение гидростатического приближения, уравнение неразрывности, уравнение состояния, уравнения сохранения для температуры и солености. Модель позволяет воспроизводить пространственно-временную изменчивость термохалинной структуры вод, трехмерного поля течений и интенсивности турбулентного обмена на временных отрезках от нескольких суток до годового цикла в акваториях морского шельфа со сложными морфологическими и гидрологическими характеристиками. Имеется возможность выделения ветровой, термохалинной, стоковой составляющих суммарных течений путем оперативного изменения, с помощью управляющих ключей, числа учитываемых факторов. При работе с моделью учет термохалинной структуры вод может производиться как в прогностическом, так и в диагностическом режиме.

Характерная особенность используемой термогидродинамической модели — возможность ее использования для расчета динамики вод в морских акваториях, отдельные участки которых имеют меньший (подсеточный) размер в одном из горизонтальных направлений, чем шаг расчетной сетки (например, проливы, каналы, устья рек). Программная реализация модели позволяет рассчитывать ветровые и стоковые течения. С заданной временной дискретностью в ходе счета модель усваивает новую информацию о скорости и направлении ветра, величинах осадков и испарения, расходах воды рек. С помощью данной модели были проведены расчеты термохалинной структуры и циркуляции вод в Одесском и Приднепровско-Бугском районах северо-западной части Черного моря [14], выполнено моделирование гидроэкологических процессов в Тилигульском лимане [15, 16] и в морских водоемах колумбийского побережья Карибского моря [17]. По результатам численных экспериментов был сделан вывод, что модель адекватно отражает природные процессы и полученные результаты хорошо согласуются с данными других источников информации.

### 2.2. Материалы наблюдений и методы оценки самоочистительной способности вод Севастопольской бухты по отношению к неорганическому фосфору

В работе использованы данные наблюдений МГИ РАН за содержанием минерального фосфора в водах акватории Севастопольской бухты, проведенных в период с мая 1998 г. по апрель 2012 г. Массив данных составил 1597 измерений, выполненных спектрофотометрическим методом. Концентрация минерального фосфора изменялась в пределах от «не обнаружено» до 1,43 мкМ/л, не превышая предельно допустимого уровня (ПДК 2,63 мкМ/л). Исключения составили два единичных случая, когда в поверхностных водах центрального (ноябрь 2003 г.) и восточного (июль 2000 г.) районов максимальное загрязнение фиксировалось на уровне 2,11 и 2,26 мкМ/л соответственно. Характеристика концентрации по выделенным районам Севастопольской бухты (рис. 1) представлена в табл. 1.

**Концентрация неорганического фосфора в различных частях Севастопольской бухты (по данным МГИ РАН)**  
**Inorganic phosphorus concentration in different parts of the Sevastopol Bay (based on MHI RAS data)**

Характеристика	Южная бухта S	Западная часть W	Центральная часть С	Восточная часть E
Среднее содержание за период, мкМ/л	0,146	0,132	0,090	0,154
Диапазон концентрации, мкМ/л	0–1,23	0–1,39	0–1,19 (2,11)	0–1,43 (2,26)
Диапазон среднегодового содержания, мкМ/л	0,0257–0,327	0,039–0,376	0,007–0,244	0,0375–0,330
Количество определений	277	424	607	289

В соответствии с данными табл. 1, среднесуточное содержание минерального фосфора достаточно равномерно распределялось по акватории Севастопольской бухты.

Экологическое состояние акватории Севастопольской бухты анализируется путем сравнительной оценки АЕ экосистем восточной, центральной, западной частей бухты и Южной бухты по отношению к неорганическому фосфору. Для определения самоочистительной способности отдельных акваторий Севастопольской бухты использован алгоритм оценки АЕ [18] с использованием балансового метода [19, 20]. АЕ характеризует способность морской экосистемы выдерживать добавление некоторого количества ЗВ без развития необратимых биологических последствий, имеет размерность потока вещества — массы вещества в единице объема, отнесенной к единице времени [18]. Расчет скорости удаления определенного ЗВ является наиболее сложным, т.к. интегральное время пребывания его в экосистеме определяется как гидродинамическими параметрами акватории, так и комплексом физических, химических, микробиологических процессов, отвечающих за деструкцию ЗВ или его вынос за пределы акватории. Для районов государственного мониторинга предложено оценивать интегральное время пребывания ЗВ через изменение концентрации в единицу времени [20]. Расчет удельной (в пересчете на 1 л) величины АЕ ( $AE_{уд}$ ) экосистемы выделенных районов Севастопольской бухты проводится исходя из допущения о пространственной однородности полей распространения фосфатов в ее границах.

Для Севастопольской бухты способность к самоочищению в отношении неорганического азота оценивается для экосистемы наиболее экологически неблагополучной Южной бухты в сравнении с экосистемой более чистой западной части акватории Севастопольской бухты, примыкающей к открытому морю [21]. Показано, что самоочистительная способность экосистемы Южной бухты определяется в основном уровнем антропогенных нагрузок. Для экосистемы акватории, граничащей с открытым морем, эта способность зависит от биологических продукционно-деструкционных процессов. Полученная расчетным путем величина АЕ позволяет также оценить экологическое благополучие исследуемой акватории. Такой метод оценки в отношении неорганического фосфора был впервые предложен в работе [22]. Экологическое благополучие водной акватории с учетом АЕ оценивалось, согласно [21, 22] при использовании показателя  $\Pi_i$ , характеризующего степень отклонения нагрузки для  $i$ -го компонента в год от  $AE_i$  и рассчитываемого по формуле [22]:

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

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

При использовании метода [22] состояние системы рассматривается как благополучное, если  $\Pi_i \leq -1$ . При этом  $C_i \leq ПДК_i$ , т.е. уровень загрязнения не превышает допустимый. При относительном благополучии  $-1 \leq \Pi_i \leq 0$ , исходный уровень загрязнения нивелируется с помощью процессов самоочищения до допустимого уровня. Состояние экосистемы с  $\Pi_i > 0$  является экологически неблагополучным.

### 3. Результаты и обсуждение

#### 3.1. Особенности гидродинамического режима в отдельных районах Севастопольской бухты

Уровень загрязнения Севастопольской бухты как прибрежной морской акватории зависит от интенсивности источников поступления ЗВ и течений, переносящих их из одной части эстуария в другую. Поэтому для оценки ее экологического состояния определение концентрации ЗВ необходимо дополнять характеристикой гидродинамических условий в анализируемой акватории.

Особые условия динамики вод отмечены в створе молв на входе в Севастопольскую бухту (глубина моря 19 м). После постройки защитного мола в 1976 г. ширина входа в бухту сузилась с 940 до 550 м. Величина водообмена вследствие этого уменьшилась в среднем за год на 40–70 %, время «полного» обмена воды в бухте увеличилось почти вдвое. После построения мола расчет интенсивности водообмена в бухте был осуществлен в работе [23]. В подавляющем числе случаев (92 %) отмечалась двухслойность с разнонаправленными течениями [5]. В верхнем 10-метровом слое моря здесь преобладают западные течения, т.е. из бухты. В слое глубже 13 м возникают градиентные течения, которые направлены в придонных слоях в бухту. После действия сильных сгонных ветров возникают компенсационные течения, совпадающие по направлению с градиентными.

Центральную часть бухты, где встречаются разнонаправленные потоки вод, можно назвать буферной зоной. Здесь наблюдаются два потока. Один несет воды реки Черной, которые создают уклон водной поверхности и обуславливают стоковые течения. Второй — со стороны открытой части моря, который в основном определяется воздействием западного ветра, также наблюдается при южном ветре. Это объясняется ориентацией, морфометрией бухты и из-за того, что бухта окружена высокими берегами. На отмелях участках наблюдаются разного рода вихревые образования.

В восточную часть Севастопольской бухты поступают воды реки Черной, основная часть стока (до 80 %) которой приходится на зимний и весенний периоды. Во время половодья при слабых ветрах стоковые течения, обусловленные поступлением вод реки Черной, становятся преобладающими. В период паводков и сбросов из Чернореченского водохранилища, а также под влиянием сгонных ветров скорости течений имеют более существенные значения (0,5–0,7 м/с). При ветрах скоростью более 2–5 м/с чаще всего наблюдаются разнонаправленные течения.

При нагонных ветрах уровень воды в этой части бухты увеличивается и в поверхностном слое наблюдается поток западного направления, обратный стоку реки. При сгонных ветрах уровень понижается, на поверхности поток направлен в бухту и в придонном слое отмечаются течения обратного направления. Такое же направление поток имеет при слабых ветрах, когда преобладает стоковое течение реки Черной. В период паводков и штормов, а также при развитии сгонно-нагонного ветра течения меняют установившуюся циркуляцию.

На рис. 2 приведена схема поверхностных и придонных течений в восточной части Севастопольской бухты, рассчитанная для условий меженного периода при стационарных ветрах 5 м/с северо-западного и западного направлений.

Видно, что картина течений определяется направлением ветра. Из-за малого стока реки Черной направление течений по всей толще вод совпадает. При развитии нагона поток со стороны моря распространяется по всей ширине бухты от поверхности до дна, а в придонном слое устьевого района возникает компенсационный поток, связанный со стоком реки Черной. При воздействии ветров, направленных поперёк бухты, на мелководье могут возникать локальные «винтовые» циркуляции.

Из полученных расчетных данных, представленных на рис. 2, следует, что в период межени в восточной части бухты преобладают течения, направленные к устью реки Черной как в поверхностном, так в придонном слое вод при северо-западном и западном ветре.

На рис. 3 показана картина течений для гидрометеоусловий, которые характерны для паводкового периода на реке Черной. Проведены расчеты для южного и северо-восточного ветра 5 м/с. В отличие от режима межени система течений в восточной части бухты в период паводков противоположная. Течение имеет двухслойную структуру, в поверхностном и придонном слоях движение происходит в противоположных направлениях. В поверхностном слое течение направлено в бухту, в придонном из бухты к вершине устья реки Черной. Эта зависимость сохраняется как при южных, так и северо-восточных ветрах.

Существенная изменчивость динамических процессов наблюдается и в зоне смешения морских и речных вод. Так, в вершине Инкерманского ковша (рис. 1) направление течения меняется на противоположное, что свидетельствует о существенной изменчивости динамических процессов в зоне смешения морских и речных вод. При ветрах южных направлений поток запирается в Инкерманском ковше (рис. 3, а). Вдоль узкого судоходного канала скорость потока в поверхностном слое увеличивается.

В вершине Южной бухты, характеризующейся затрудненным водообменом с прилегающей акваторией, с одинаковой повторяемостью наблюдается юго-восточное, северо-восточное и северо-западное течения. Ветры всех направлений, кроме южного, способствуют, как правило, поступлению воды в Южную бухту или подпору её вод. На рис. 4 и 5 представлены результаты расчета поверхностных и придонных течений в Южной бухте при стационарных ветрах перечисленных выше направлений.

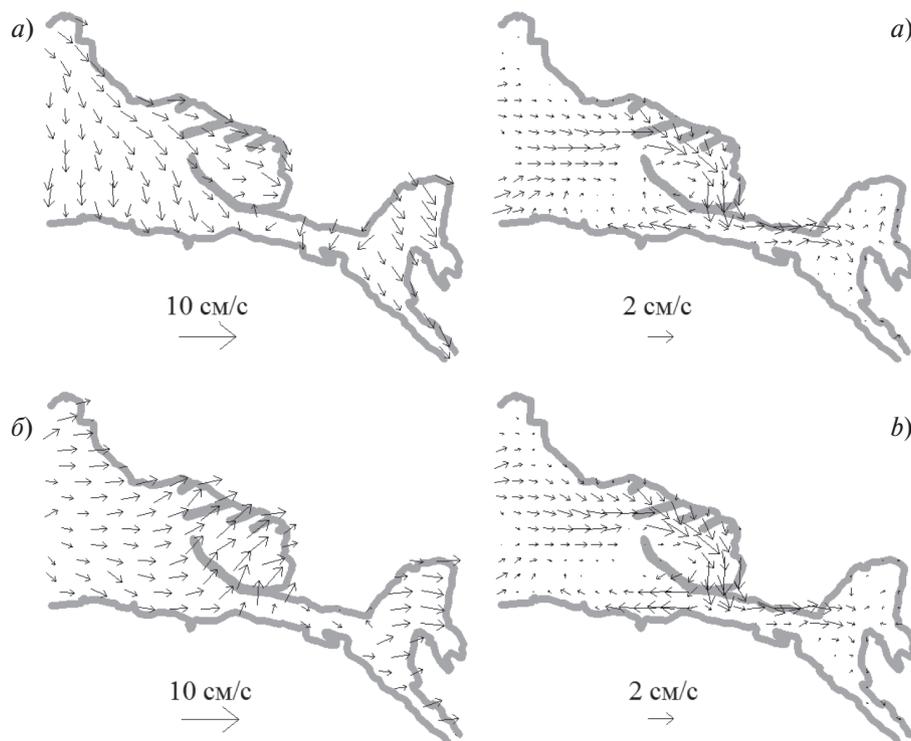


Рис. 2. Структура поверхностных (слева) и придонных (справа) течений в восточной части бухты, рассчитанная для периода межени при северо-западном (а) и западном (б) ветрах 5 м/с

Fig. 2. Structure of surface (left) and bottom (right) currents in the eastern part of the bay for the dry season at northwestern (a) and western (b) winds of 5 m/s

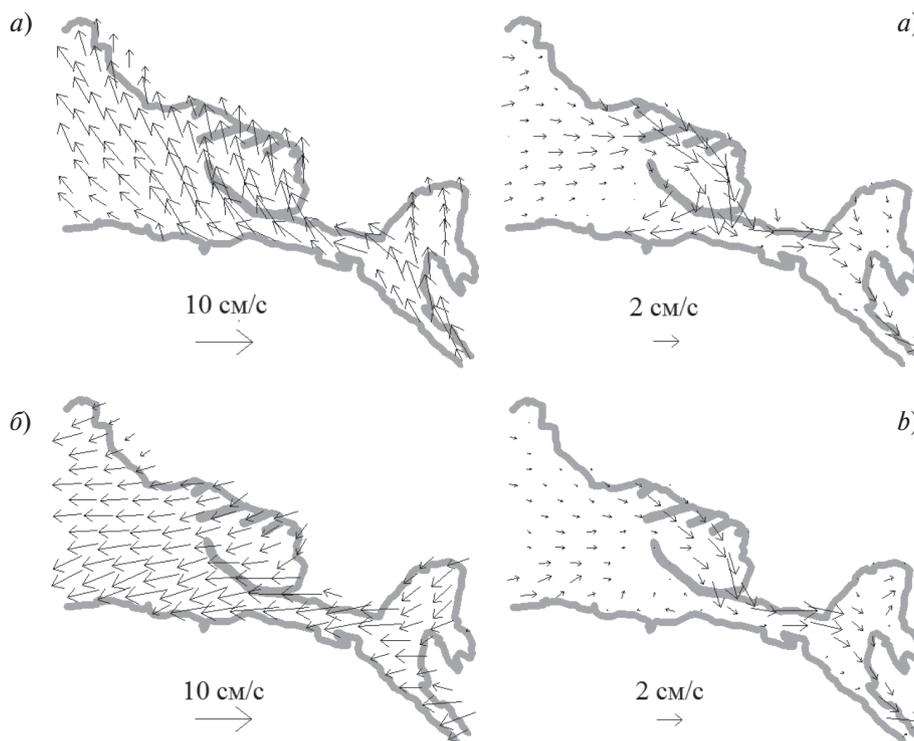


Рис. 3. Структура поверхностных (слева) и придонных (справа) течений в восточной части бухты, рассчитанная для паводкового периода при южном (а) и северо-восточном (б) ветрах 5 м/с

Fig. 3. Structure of surface (left) and bottom (right) currents in the eastern part of the bay for the fall period at southern (a) and northeastern (b) winds of 5 m/s

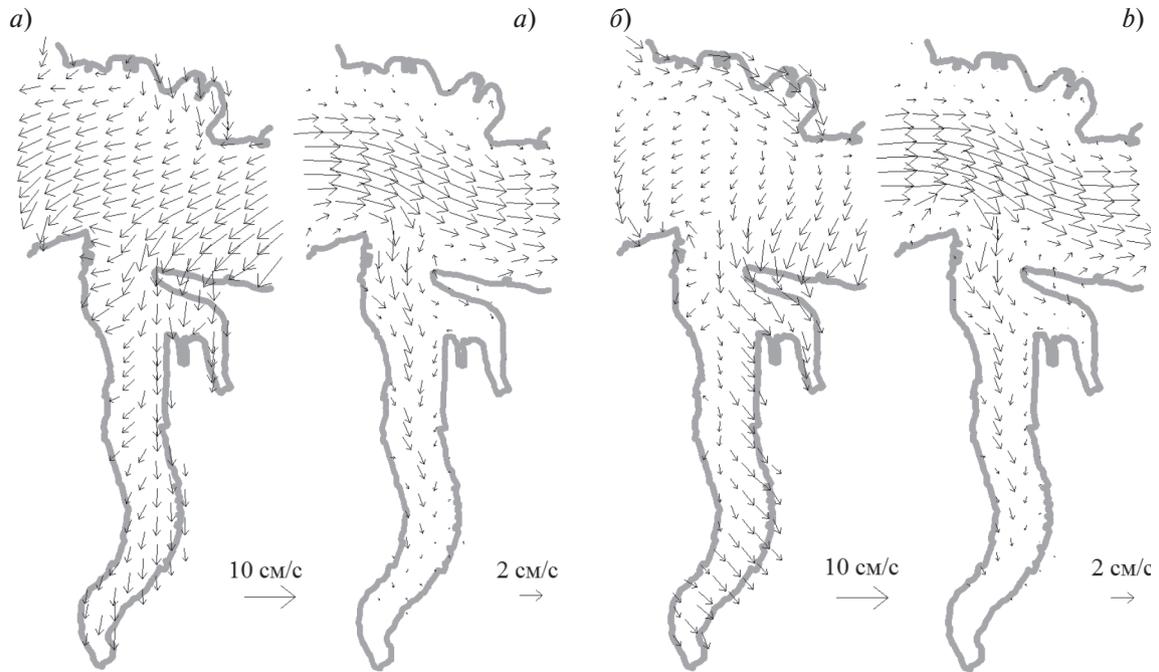


Рис. 4. Структура поверхностных (слева) и придонных (справа) течений в Южной бухте, рассчитанная при северном (а) и северо-западном (б) ветрах 5 м/с

Fig. 4. The structure of surface (left) and bottom (right) currents in the Yuzhnaya Bay at the northern (a) and northwestern (b) winds of 5 m/s

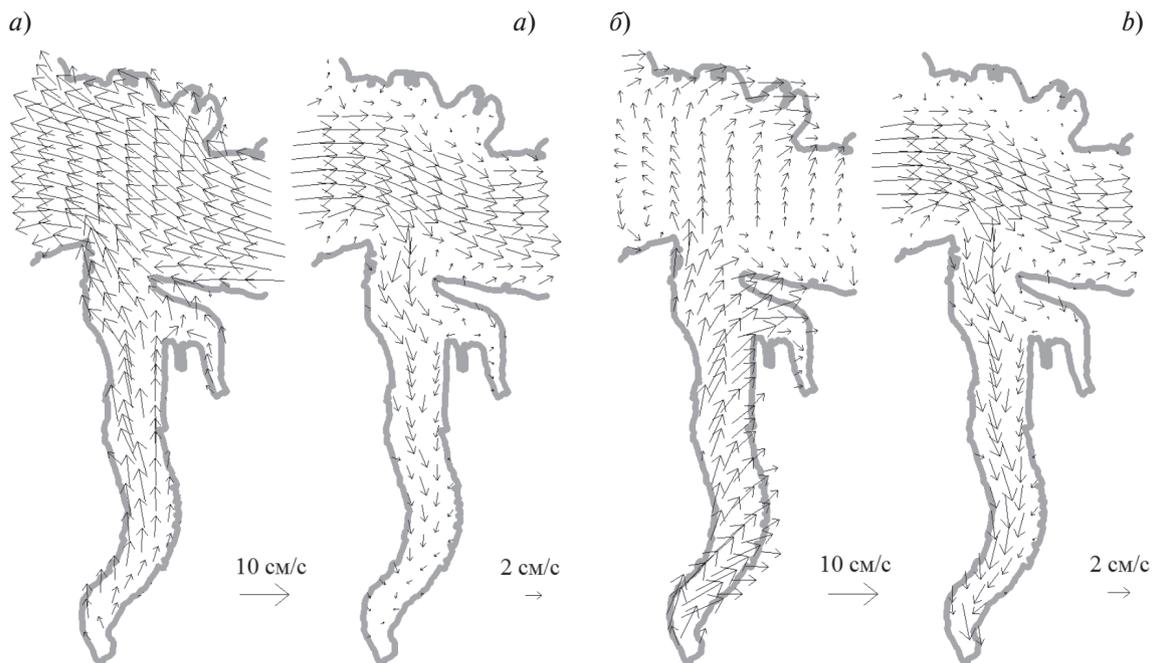


Рис. 5. Структура поверхностных (слева) и придонных (справа) течений в Южной бухте, рассчитанная при южном ветре 10 м/с (а) и западном ветре 5 м/с (б)

Fig. 5. Structure of surface (left) and bottom (right) currents in the Yuzhnaya Bay at a southern wind of 10 m/s (a) and a western wind of 5 m/s (b)

Как следует из данных, представленных на рис. 4, при преобладании над акваторией бухты северных и северо-восточных ветров формируется поверхностное дрейфовое течение, направленное вдоль оси бухты на запад, что способствует поступлению воды в Южную бухту как в поверхностном слое вод, так и в придонном. Эти воды, распространяясь в Южную бухту, могут затруднять водообмен с Севастопольской бухтой и создавать неблагоприятную гидрохимическую ситуацию вплоть до образования зон гипоксии.

При преобладании ветров южных румбов происходит перестройка циркуляции и термогалинных полей (рис. 5), из Южной бухты могут выноситься воды, загрязненные бытовыми стоками, а в результате направленным на север поверхностным течением выносимые загрязненные воды могут достигать северных берегов бухты.

При поперечном ветре отмечено появление устойчивых струйных течений вдоль берега в Южной бухте.

Северо-северо-западный ветер вызывает нагонный эффект и соответствующий компенсационный подъем вод с придонных горизонтов кутовой области к поверхности срединной части Южной бухты.

Для ее кутовой части характерны распресненные области, при этом интенсивность распреснения вод непостоянна в течение года, она регистрируется по пониженной солености и повышенному содержанию кремнекислоты [24].

### 3.2. Изменение самоочистительной способности экосистемы Севастопольской бухты в отношении неорганического фосфора под влиянием гидродинамического режима отдельных ее акваторий

Основные источники фосфатов — это хозяйственные стоки, в основном стиральные порошки и моющие средства, а также смывы с полей с/х угодий и ливневые стоки. Еще один источник — донные отложения, где фосфаты в результате высокой способности сорбироваться на взвешках, могут накапливаться годами, а при увеличении поступления органического вещества в донные отложения и его разложения в условиях дефицита кислорода, может происходить высвобождение адсорбированных фосфатов и их поступление в водную толщу, так называемое явление вторичного загрязнения вод.

Поскольку неорганический фосфор практически не образует летучих форм (за исключением образования фосфинов) и не выводится в атмосферу, основными факторами удаления его из экосистемы, помимо биологических процессов, являются динамический вынос за пределы акватории или депонирование в донные отложения.

Многолетнее изменение концентрации фосфатов в выделенных районах Севастопольской бухты наряду со значительной амплитудой среднегодовых значений показало постепенное снижение его содержания (рис. 6), что косвенно может характеризовать стабилизацию трофности всей экосистемы.

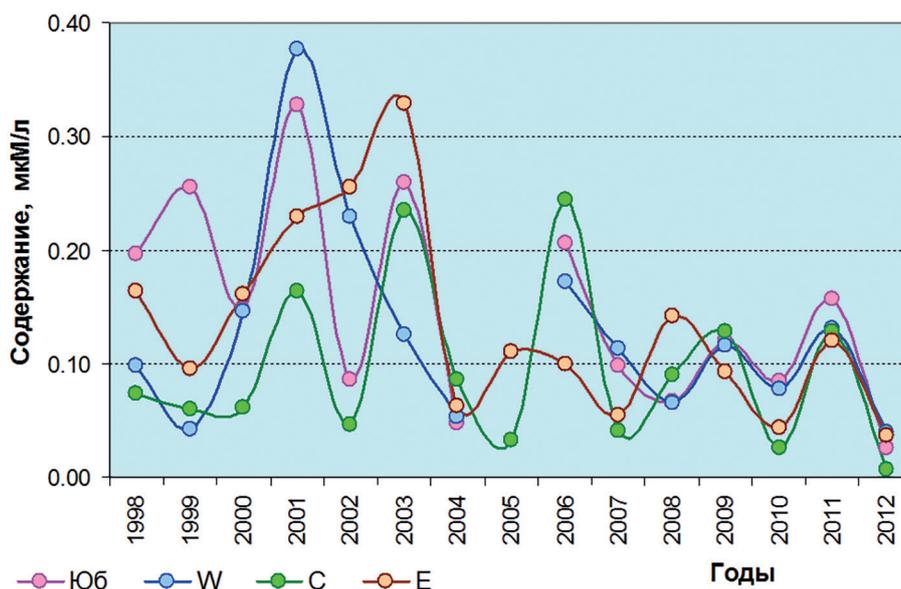


Рис. 6. Межгодовое изменение среднего содержания фосфатов в выделенных районах Севастопольской бухты в 1998–2012 гг. по материалам Банка океанографических данных МГИ РАН

Fig. 6. Interannual change in the average content of phosphates in selected areas of the Sevastopol Bay in 1998–2012 based on the Oceanographic data bank of the Marine Hydrophysical Institute of RAS

Таблица 2

Table 2

Содержание основных гидрохимических параметров в районе плавучего дока  
в период межени по материалам съемки 8 сентября 2015 г. [10]  
Content of the base hydrochemical parameters in the area of the floating dock during the  
low water based on survey data on September 8, 2015 [10]

Координаты места отбора проб		Глубина, м	S, ‰	O <sub>2</sub> , мл/л	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , мкМ/л	SiO <sub>2</sub> , мкМ/л	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мкМ/л	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , мкМ/л	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , мкМ/л
44,614° с.ш.	33,573° в.д.	0,5	17,92	5,03	0,00	1,9	1,59	0,03	0,45
		19,5	17,98	0,71	5,2	29,7	1,47	0,01	35,19

Таблица 3

Table 3

Среднее содержание, скорость и время удаления фосфатов из акватории разных частей  
Севастопольской бухты, АЕ выделенных акваторий  
Average content, time of phosphates removal from the different water area of the Sevastopol Bay  
and AC of the allocated water areas

Характеристика	Южная бухта S	Западная часть W	Центральная часть С	Восточная часть E
Среднее содержание, мкМ/л	0,146	0,132	0,090	0,154
Средняя скорость удаления, мкМ/л в сут.	0,0070	0,0038	0,0040	0,0040
Максимальная скорость удаления, мкМ/л в сут.	0,0195	0,0242	0,0236	0,0114
Время удаления, сут.	21–24	29–35	22–27	38–39
АЕ <sub>уд.</sub> , мкМ в год	2,92	1,91	1,66	1,60
АЕ акватории, кг/год	930	2000	1173	643

Результаты сезонных отличий в содержании фосфатов в водах Севастопольской бухты в последующий период вплоть до 2017 года приведены в [25]. Отмечается некоторое увеличение содержания фосфатов в летний период особенно в придонном слое вод, когда средняя концентрация на придонном горизонте превышала концентрацию на поверхности более чем на 60 %. Авторы [25] объясняют это усвоением фосфатов фитопланктоном и сезонной стратификацией вод бухты.

Растянутое во времени удаление фосфатов в восточной части Севастопольской бухты может свидетельствовать о накоплении их в донных грунтах и повышении риска возникновения вторичного загрязнения акватории. Это подтверждается в работе [13], где по результатам экспедицией МГИ РАН в сентябре 2009 г. приведена информация об искусственном углублении дна (глубины 19–20 м) в районе плавучего дока, расположенного у южного берега в восточной части Севастопольской бухты (обозначено звездочкой на рис. 1). По мнению авторов [13] такой рельеф дна в теплый период года должен способствовать возникновению придонной гипоксии, а иногда и образованию сероводорода и, как следствие, увеличению содержания фосфатов. Такая ситуация по результатам съемки в период межени 8 сентября 2015 года отражена в работе [10]. В этой работе приведены данные о содержании фосфатов в районе плавучего дока на поверхности и повышении концентрации до 5,2 мкМ/л в придонном слое с одновременным уменьшением содержания окисленных форм азота (нитритов и нитратов), за счет которых происходит окисление органического вещества в условиях дефицита кислорода, и увеличением содержания аммония (восстановленной формы азота) (табл. 2).

Расчет скорости удаления фосфатов из морской среды показал, что в южной части Севастопольской бухты (Южная бухта — район S) она почти вдвое выше, чем в ее северной акватории (районы W, С и E). Вместе с тем, при относительно равной скорости элиминации в выделенных районах Севастопольской бухты (за исключением района S) на удаление минерального фосфора из восточного района E требуется больше времени, чем из центрального С и западного W районов акватории (табл. 3).

С учетом фактического объема выделенных акваторий [2] при равномерном (плановом) поступлении фосфатов в воды Севастопольской бухты, согласно полученным нами результатам, количество его за год не должно превышать 0,6 т в восточной части акватории (район E), 0,9 т в Южной бухте, 1,2 т в центральной части (район С) и 2,0 т в западной части (район W) (табл. 3). Таким образом, по нашим расчетам наиболее проблемной акваторией Севастопольской бухты в отношении неорганического фосфора является восточная

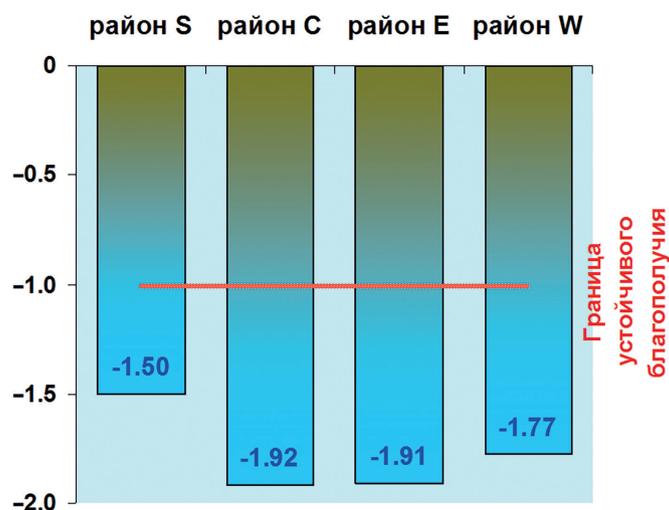


Рис. 7. Величины показателя экологического благополучия экосистем выделенных районов акватории Севастопольской бухты для неорганического фосфора в 1998–2012 гг.

Fig. 7. Values of the indicator of ecological well-being of ecosystems of the selected areas of the Sevastopol Bay water area for inorganic phosphorus in 1998–2012

кутовая часть бухты, особенно в периоды межени. Обращаем внимание, что приведенное количественное ограничение поступления фосфатов возможно только при равномерном (плановом) поступлении их в акваторию, а в условиях аварийных сбросов при оценке способности к самоочищению следует ориентироваться на удельную величину АЕ (табл. 3), которая позволяет оценить допустимую нагрузку на исследуемую акваторию вне зависимости от объема ее вод.

Полученная расчетным путем величина АЕ позволяет также оценить экологическое благополучие исследуемой акватории. Результаты расчета показателя экологического благополучия по содержанию фосфатов для всех выделенных районов акватории Севастопольской бухты (рис. 7) показали, что величина показателя  $P_p$  находится в диапазоне от  $-1,50$  до  $-1,92$  (формула расчета см. в разделе «Материалы и методы»). Это свидетельствует об устойчивом благополучии всей экосистемы бухты в отношении минерального фосфора. Нагрузка на акваторию не превышает ее самоочистительной способности и, соответственно, не нарушает ее нормального функционирования.

Анализируя самоочистительную способность исследуемых акваторий Севастопольской бухты с учетом их гидродинамического режима, следует отметить следующее: для восточной кутовой части бухты согласно полученным модельным расчетам в периоды паводков циркуляция в поверхностном слое вод способствует распространению ЗВ на всю акваторию бухты. В период межени в восточной части бухты преобладают течения, направленные к устью реки Черной и в поверхностном, и в придонном слое вод как при северо-западном, так и при западном направлении ветра, что способствует накоплению ЗВ в этой части бухты, уменьшая таким образом ее способность к самоочищению (табл. 3).

#### 4. Заключение

Показано, что уменьшение самоочистительной способности экосистем выделенных акваторий Севастопольской бухты в отношении неорганического фосфора определяется как наличием и количеством его поступления, так и спецификой гидродинамического режима выделенных акваторий и морфометрическими особенностями строения дна.

Для экосистемы Южной бухты, согласно проведенным численным экспериментам, гидродинамический режим характеризуется затрудненным водообменом с основной акваторией. Вентиляция вод акватории Южной бухты определяется в основном ветровым режимом, в результате которого происходит либо запираание вод, либо вынос их за ее пределы, что, безусловно, сказывается на способности к самоочищению.

Наиболее проблемной по способности к самоочищению в отношении неорганического фосфора оказалась восточная кутовая часть Севастопольской бухты. Используемый при расчетах анализ многолетних экспедиционных данных МГИ показал, что основное влияние оказали объемы поступающих вод реки Черной в периоды зимних паводков и летней межени, а также морфометрическое строение дна акватории. В результате антропогенного углубления дна на одной из станций в восточной части бухты проявилась характерная для неорганического фосфора способность накопления в донных отложениях и вторичного поступления его в водную акваторию в результате гипоксии и восстановительных условий в период межени.

В соответствии с результатами расчетов ассимиляционной емкости воды выделенных районов Севастопольской бухты попадают в зону устойчивого экологического благополучия в отношении неорганического фосфора, несмотря на разную способность к самоочищению, отличия в их гидродинамическом режиме, морфометрические особенности дна.

## 5. Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0005 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей» (шифр «Прибрежные исследования»).

## Литература

1. Иванов В.А., Овсяный Е.И., Репетин Л.Н., Романов А.С., Игнатьева О.Г. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов. Препринт. Севастополь: МГИ НАНУ, 2006. 90 с.
2. Стокозов Н.А. Морфометрические характеристики Севастопольской и Балаклавской бухт // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. Вып. 23. С. 198–208.
3. Репетин Л.Н., Белокопытов В.Н., Липченко М.М. Ветры и волнение в прибрежной зоне юго-западной части Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. Вып. 9. С. 13–28.
4. Морозов А.Н., Лемешко Е.М., Шутов С.А., Зима В.В. Течения в Севастопольской бухте по данным ADCP-наблюдений (июнь 2008 года) // Морской гидрофизический журнал. 2012. № 3. С. 31–43.
5. Лемешко Е.М., Морозов А.Н., Шутов С.А., Зима В.В., Чепыженко А.А. Течения в Севастопольской бухте по данным ADCP-наблюдений, ноябрь 2014 г. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. Вып. 28. С. 25–30.
6. Шапиро Н.Б., Ющенко С.А. Моделирование ветровых течений в севастопольских бухтах // Морской гидрофизический журнал. 1999. № 1. С. 42–57.
7. Кубряков А.И., Белокопытов В.Н., Пряхина С.Ф. Диагностические расчеты климатической зимней и летней циркуляции в Севастопольской бухте // Труды Государственного океанографического института. 2019. № 220. С. 189–208.
8. Белокопытов В.Н., Кубряков А.И., Пряхина С.Ф. Моделирование распространения загрязняющей примеси в Севастопольской бухте // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 1. С. 5–15. doi:10.22449/0233-7584-2019-1-5-15
9. 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.
10. Совга Е.Е., Хмара Т.В. Влияние стока реки Черной в периоды паводка и межени на экологическое состояние кутовой части акватории Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 1. С. 31–40. doi:10.22449/0233-7584-2020-1-31-40
11. 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: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. Вып. 28. С. 153–164.
12. Иванов В.А., Мезенцева И.В., Совга Е.Е., Слепчук К.А., Хмара Т.В. Оценки самоочищающей способности экосистемы Севастопольской бухты по отношению к неорганическим формам азота // Процессы в геосредах. 2015. № 2 (2). С. 55–65.
13. Кондратьев С.И., Видничук А.В. Локальная сезонная гипоксия и образование сероводорода в придонных водах Севастопольской бухты в 2009–2019 годах // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 2. С. 107–121. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-107-121

14. Иванов В.А., Тучковенко Ю.С. Прикладное математическое моделирование качества вод шельфовых морских экосистем. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. 368 с.
15. Tuchkovenko Yu., Tuchkovenko O., Khokhlov V. Modelling water exchange between coastal elongated lagoon and sea: influence of the morphometric characteristics of connecting channel on water renewal in lagoon // EUREKA: Physics and Engineering. 2019. Number 5. P. 37–46. doi:10.21303/2461-4262.2019.00979
16. Bielecka M., Tuchkovenko Yu., Lloret J., Lillebo A.I., Dias J.M., Robakiewicz M., Zalewski M., Krysanova V., Chubarenko B., Stalnacke P. The challenges to improve integrated catchment and lagoon modelling in the context of climate change. Chapter 12 / Coastal Lagoons in Europe. Integrated Water Resource Strategies / Edited by Ana I. Lillebo, Per Stalnacke and Geoffrey D. Gooch. London: IWA Publishing, 2016. P. 107–114.
17. Lonin S.A., Tuchkovenko Yu.S. Water quality modelling for the ecosystem of the Cienaga de Tesca coastal lagoon // Ecological modelling. Published by Elsevier Science B.V. 2001. Vol. 144. P. 279–293.
18. Израэль Ю.А., Цыбань А.В. Антропогенная экология океана. М.: Гидрометеиздат, 1989. 528 с.
19. Sovga E., Mezentseva I., Verzhvetskaia L. Assimilation Capacity of the Ecosystem of Sevastopol Bay // Proceedings of the Twelfth International Conference on the Mediterranean Coastal Environment MEDCOAST' 2015, 6–10 October 2015. Varna, Bulgaria, Vol. 1. (Ed. E. Ozhan). P. 317–326.
20. 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.
21. Совга Е.Е., Мезенцева И.В., Котельянец Е.А. Ассимиляционная емкость экосистем морских мелководных акваторий с различным уровнем антропогенной нагрузки как метод оценки их самоочистительной способности // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2017. Т. 28, № 4. С. 38–51. doi:10.21513/0207-2564-2017-4-38-51
22. Шаврак Е.И. Ассимиляционная емкость Цимлянского водохранилища и устойчивость аккумуляционных процессов // Вестник ВГУ. Серия география, геоэкология. 2013. № 2. С. 93–98.
23. Хоролит Н.Г. Расчет водообмена мелководного залива (бухты) с морем // Труды ГОИН. 1986. Вып. 168. С. 113–118.
24. Геворгиз Н.С., Кондратьев С.И., Ляшенко С.В., Овсяный Е.И., Романов А.С. Результаты мониторинга гидрохимической структуры Севастопольской бухты в теплый период года // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2002. Вып. 6. С. 131–148.
25. Орехова Н.А., Вареник А.В. Современный гидрохимический режим Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 2. С. 134–146. doi:10.22449/0233-7584-2018-2-134-146

## References

1. Ivanov V.A., Ovsyany E.I., Repetin L.N., Romanov A.S., Ignatieva O.G. Hydrological and hydrochemical regime of the Sevastopol Bay and its changes under the influence of climatic and anthropogenic factors. Preprint. *Sevastopol, MHI NASU*, 2006. 90 p. (in Russian).
2. Stokozov N.A. Morphometric characteristics of Sevastopol and Balaklava bays. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa. Sevastopol, ECOSI-Hydrophysics*, 2010, 23, 198–208 (in Russian).
3. Repetin L.N., Belokopytov V.N., Lipchenko M.M. Winds and waves in the coastal zone of the southwestern part of Crimea. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa. Sevastopol, ECOSI-Hydrophysics*, 2003, 9, 13–28 (in Russian).
4. Morozov A.N., Lemeshko E.M., Shutov S.A., Zima V.V. Currents in the Sevastopol Bay according to ADCP observations (June 2008). *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*. 2012, 3, 31–43 (in Russian).
5. Lemeshko E.M., Morozov A.N., Shutov S.A., Zima V.V., Chepyzhenko A.A. Currents in the Sevastopol Bay according to ADCP observations, November 2014. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa. Sevastopol, ECOSI-Hydrophysics*, 2014, 28, 25–30 (in Russian).
6. Shapiro N.B., Yushchenko S.A. Modeling of wind currents in the Sevastopol Bays. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*. 1999, 1, 42–57 (in Russian).
7. Kubryakov A.I., Belokopytov V.N., Pryakhina S.F. Diagnostic calculations of climatic winter and summer circulation in the Sevastopol Bay. *Trudy Gosudarstvennogo Okeanograficheskogo Instituta*. 2019, 220, 189–208 (in Russian).
8. Belokopytov V.N., Kubryakov A.I., Pryakhina S.F. 2019. Modelling of water pollution propagation in the Sevastopol Bay. *Physical Oceanography*. 2019, 26(1), 3–12. doi:10.22449/1573-160X-2019-1-3-12
9. Orekhova N.A., Romanov A.S., Horuzhy D.S. Interannual changes in the concentration of nutrients in the Sevastopol Bay for the period 2006–2010. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa. Sevastopol, ECOSI-Hydrophysics*, 2011, 25, 192–199 (in Russian).

**Моделирование сезонной изменчивости гидродинамического режима Севастопольской бухты...**  
**Simulation of seasonal hydrodynamic regime in the Sevastopol Bay and of assessment of the self-purification...**

10. Sovga E.E., Khmara T.V. Influence of the Chernaya River runoff during high and low water on the ecological state of the apex of the Sevastopol Bay water area. *Physical Oceanography*. 2020, 27(1), 28–36. doi:10.22449/1573-160X-2020-1-28-36
11. Sovga E.E., Mezentsseva I.V., Khmara T.V., Slepchuk K.A. On the prospects and possibilities of assessing the self-cleaning capacity of the water area of the Sevastopol Bay. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa*. Sevastopol, ECOSI-Hydrophysics, 2014, 28, 153–164 (in Russian).
12. Ivanov V.A., Mezentsseva I.V., Sovga E.E., Slepchuk K.A., Khmara T.V. Estimates of the self-cleaning capacity of the ecosystem of the Sevastopol Bay in relation to inorganic forms of nitrogen. *Protsessy v Geosredakh*. 2015, 2(2), 55–65 (in Russian).
13. Kondratev S.I., Vidnichuk A.V. Local seasonal hypoxia and hydrogen sulphide formation in the bottom waters of the Sevastopol Bay in 2009–2019. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*. 2020, 2, 107–121. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-107-121 (in Russian).
14. Ivanov V.A., Tuchkovenko Yu.S. Applied mathematical modeling of water quality in shelf marine ecosystems. Sevastopol, ECOSI-Hydrophysics, 2006. 368 p. (in Russian).
15. Tuchkovenko Yu., Tuchkovenko O., Khokhlov V. Modelling water exchange between coastal elongated lagoon and sea: influence of the morphometric characteristics of connecting channel on water renewal in lagoon. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2019, Number 5, 37–46. doi:10.21303/2461-4262.2019.00979
16. Bielecka M., Tuchkovenko Yu., Lloret J., Lillebo A.I., Dias J.M., Robakiewicz M., Zalewski M., Krysanova V., Chubarenko B., Stalnacke P. The challenges to improve integrated catchment and lagoon modelling in the context of climate change. Chapter 12 / Coastal Lagoons in Europe. *Integrated Water Resource Strategies* / Edited by Ana I. Lillebo, Per Stalnacke and Geoffrey D. Gooch. London, IWA Publishing, 2016, 107–114.
17. Lonin S.A., Tuchkovenko Yu.S. Water quality modelling for the ecosystem of the Cienaga de Tesca coastal lagoon. *Ecological Modelling*. Published by Elsevier Science B.V. 2001, 144, 279–293.
18. Israel Yu.A., Tsyban A.V. Anthropogenic ecology of the ocean. Moscow, *Gidrometeoizdat*, 1989. 528 p. (in Russian).
19. Sovga E., Mezentsseva I., Verzhnevskaya 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. (Ed. E. Ozhan) Varna, Bulgaria, Vol. 1, 317–326.
20. Sovga E.E., Mezentsseva I.V. Methodological aspects of estimates of self-purifying ability of marine shallow water ecosystems (gulfs, bays, ports). *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon Morya*. 2017, 3, 57–68 (in Russian). doi:10.22449/2413-5577-2020-3-63-76
21. Sovga E.E., Mezentsseva I.V., Kotelianets E.A. Assimilation capacity of the marine shallow water ecosystems with various anthropogenic impacts as the estimation method of its self-purification ability. *Problemy Ekologicheskogo Monitoringa i Modelirovaniya Ekosistem*. 2017, 28, 4, 38–51 (In Russian). doi:10.21513/0207-2564-2017-4-38-51
22. Shavrak E.I. Assimilation capacity of the Tsimlyansk reservoir and the stability of accumulation processes. *Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Series geography, geocology*. 2013, 2, 93–98 (in Russian).
23. Khorolich N.G. Calculation of water exchange between a shallow gulf (bay) and the sea. *Proceedings of the State Oceanographic Institute*. 1986, 168, 113–118 (in Russian).
24. Gevorgiz N.S., Kondratyev S.I., Lyashenko S.V., Ovsyany E.I., Romanov A.S. Results of monitoring the hydrochemical structure of the Sevastopol Bay in the warm season. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa*. Sevastopol, ECOSI-Hydrophysics, 2002. 6, 131–148 (in Russian).
25. Orekhova N.A., Varenik A.V. Current hydrochemical regime of the Sevastopol Bay. *Physical Oceanography*. 2018, 25(2), 124–135. doi:10.22449/1573-160X-2018-2-124-135