

Зимний пик цветения фитопланктона в Севастопольской бухте по результатам численного моделирования

К. А. Слепчук*, Т. В. Хмара

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

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

Аннотация

В работе воспроизводится зимний пик цветения фитопланктона в Севастопольской бухте с помощью трехмерной модели качества вод *MECCA* с использованием метеоданных за январь 2003 г. Воспроизведена детальная динамическая картина изменчивости течений, температуры, солености, концентрации биомассы фитопланктона и фосфора фосфатов. Показано образование антициклонической вихревой ячейки в центральном районе бухты, которое привело к увеличению концентрации фосфора фосфатов и цветению фитопланктона в этом районе. Максимум цветения фитопланктона (0.056 гС/м^3) наблюдался 23 января в центральном районе, затем максимальная концентрация биомассы снизилась до 0.047 гС/м^3 в центральном и восточном районах бухты. Также прослеживается уменьшение концентрации фосфора фосфатов от максимальных 0.0085 гР/м^3 10 января до 0.0049 гР/м^3 23 января в центральном районе бухты. Концентрация биомассы фитопланктона растет до 23 января, а затем снижается, концентрация фосфора фосфатов снижается на протяжении всего расчетного периода. Оценки, полученные в ходе численного моделирования, в целом соответствуют данным наблюдений. Выполненное исследование может служить основой для развития и применения модельного подхода к мониторингу и управлению экосистемными процессами в мелководных водоемах. С помощью данной модели можно рассчитать различные сценарии эвтрофирования бухты при сбросах в нее биогенных веществ.

Ключевые слова: биомасса фитопланктона, цветение фитопланктона, биогеохимическое моделирование, гидродинамическая модель, Севастопольская бухта

Благодарности: авторы выражают благодарность доктору географических наук Елене Евгеньевне Совге за обсуждение рукописи и ценные замечания. Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме № FNNN-2021-0005 «Прибрежные исследования».

© Слепчук К. А., Хмара Т. В., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Для цитирования: Слечук К. А., Хмара Т. В. Зимний пик цветения фитопланктона в Севастопольской бухте по результатам численного моделирования // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 2. С. 91–104. EDN PLLXAZ. doi:10.29039/2413-5577-2023-2-91-104

Winter Peak of Phytoplankton Bloom in Sevastopol Bay according to Numerical Modelling

К. А. Слечук *, Т. В. Хмара

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

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

Abstract

The winter peak of phytoplankton bloom in the Sevastopol Bay is reproduced using the 3D water quality model MECCA using meteorological data for January 2003. A detailed dynamic pattern of currents' variability, temperature, salinity, concentration of phytoplankton biomass and phosphate phosphorus is reproduced. The formation of an anticyclonic eddy in the central region of the bay is demonstrated, which led to an increase in the phosphorus phosphates concentration and phytoplankton bloom. The maximum of phytoplankton bloom (0.056 gC/m^3) was observed on the 23rd model day in the central part, then the maximum concentration of biomass decreased to 0.047 gC/m^3 in the central and eastern parts of the bay. There was also a decrease in phosphorus phosphates concentration from the maximum 0.0085 gP/m^3 on January, 10 to 0.0049 gP/m^3 on January, 23 in the central part of the bay. The concentration of phytoplankton biomass increased until January, 23, and then decreased, the phosphorus phosphates concentration decreased throughout the whole calculation period. The estimates obtained in the course of numerical modelling generally agree with the observational data. The performed study can serve as a basis for the development and application of a model approach to monitoring and managing of ecosystem processes on shallow water. Using this model, it is possible to calculate various scenarios for the bay eutrophication in case nutrients are discharged.

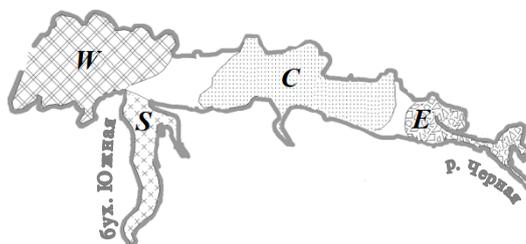
Keywords: phytoplankton biomass, phytoplankton bloom, biogeochemical simulation, hydrodynamic model, Sevastopol Bay

Acknowledgments: The authors are grateful to E. E. Sovga, Dr.Sci. (Geogr.), for discussion of the manuscript and valuable comments. The work was carried out under state assignment of Marine Hydrophysical Institute of RAS on topic no. FNNN-2021-0005 "Coastal research".

For citation: Slepchuk, K.A. and Khmara, T.V., 2023. Winter Peak of Phytoplankton Bloom in Sevastopol Bay according to Numerical Modelling. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 91–104. doi:10.29039/2413-5577-2023-2-91-104

Введение

Прибрежные районы моря, особенно закрытые и полузакрытые акватории, к числу которых относится Севастопольская бухта, испытывают значительную антропогенную нагрузку. Ограниченный водообмен с морем способствует загрязнению бухты и препятствует быстрому самоочищению. Расположенные на берегах бухты хозяйственные и рекреационные объекты, а также стоянки судов являются стационарными источниками загрязнения. Более тридцати временно и постоянно действующих выпусков сточных вод



Р и с . 1 . Районирование акватории Севастопольской бухты по уровню загрязнения [2]: *W* – зона слабого загрязнения; *E* – умеренно; *C* – сильного; *S* – очень сильного

Fig. 1. Sevastopol Bay zoning according to the pollution level [2]: *W* – mild pollution zone; *E* – moderate pollution zone; *C* – strong pollution zone; *S* – very strong pollution zone

тые зоны, так и зоны устойчивого высокого уровня загрязнения (например, Южная бухта) [1]. Акватория Севастопольской бухты была разделена по степени загрязнения на четыре района (рис. 1) [2].

При оценке экологического состояния экосистем Севастопольской бухты необходимо учитывать и сезонность биологических процессов (теплый и холодный период), которые определяют включение биогенных элементов в состав первичной продукции водоема, их депонирование в донные отложения и последующую рециркуляцию в результате деструкции органического вещества.

Зимний период является одним из наиболее важных сезонов для экосистемы мелководных акваторий. Цветение фитопланктона зимой в бухте обусловлено увеличением поступления биогенных элементов в результате разложения органических веществ в более глубоких слоях при хорошем вертикальном перемешивании во всей толще вод бухты.

Увеличение уровня эвтрофирования водного объекта является одним из негативных результатов влияния человека на природу вследствие насыщения акватории биогенными элементами, которое сопровождается ростом биомассы фитопланктона. Будучи начальным элементом пищевой цепи водной экосистемы, фитопланктон производит из неорганических веществ с малым содержанием энергии органическое вещество с более высоким содержанием энергии. По фитопланктону можно оценить состояние экосистемы, потому что от него зависит состояние и развитие зоопланктона и рыб.

Задача моделирования биомассы фитопланктона в Севастопольской бухте решалась ранее с помощью двумерной экологической модели класса реакция – диффузия [3], в которой скорость фотосинтеза не зависит от концентрации биогенных элементов ввиду того, что бухта ими чрезмерно обогащена. Кроме того, нет зависимости от температуры воды. Единственным лимитирующим процесс фактором в данной модели является свет. С помощью трехмерной физико-биохимической модели [4] рассчитывали поля концентраций биомассы фитопланктона и биогенных элементов в Севастопольской бухте для ветровых условий июля, при этом в данной работе скорость фотосинтеза зависела от концентрации биогенных элементов и света.

и городской канализации, а также стоки р. Черной поставляют в бухту неочищенные или условно очищенные воды с загрязняющими веществами различной природы. Последствия сбросов зависят от ряда физико-химических и биологических процессов, результатом влияния которых является отклик фитопланктона.

В зависимости от локализации источников загрязнения, морфометрических характеристик и гидрометеорологических условий, в Севастопольской бухте образуются как относительно чистые

Целью настоящей работы является исследование формирования зимнего пика цветения фитопланктона в акватории Севастопольской бухты на основе математического моделирования с учетом изменчивости температуры и динамики вод зимой, а также оценка влияния цветения фитопланктона на изменение уровня эвтрофирования бухты.

Материалы и методы

С помощью численной нестационарной трехмерной модели *MECCA*¹⁾ (*Model for Estuarine and Coastal Assessment*) и химико-биологического блока были рассчитаны поля изменчивости биомассы фитопланктона, фосфора фосфатов, азота аммония, нитратов и нитритов, кислорода в Севастопольской бухте в период с 1 по 31 января расчетного года. Расчетные дни соответствуют дням месяца. Ранее эта модель была откалибрована в одномерном варианте с целью получения удельных скоростей химико-биологических процессов и коэффициентов, отражающих характеристики среды и внешние факторы, в эмпирических уравнениях [5]. С помощью откалиброванного одномерного варианта модели был рассчитан годовой ход биомассы фитопланктона, содержания фосфора фосфатов, азота аммония, азота нитритов и нитратов, кислорода в Севастопольской бухте. Кроме того, был рассчитан годовой ход показателя эвтрофирования *E-TRIX* как во всей бухте, так и в каждом ее районе [6, 7]. Результаты расчетов при использовании гидродинамического блока трехмерного варианта модели *MECCA* представлены в работе [8].

Математическая структура химико-биологического блока модели *MECCA* построена на основе синтеза известных теоретических и прикладных моделей качества вод [9]. При построении блока учитывается, что скорости фосфатизации и аммонификации органического вещества могут быть разными. Включение в качестве переменных в структуру модели концентраций органических и неорганических форм азота и фосфора позволяет автоматически учитывать возможные различия соотношений между азотом и фосфором в составе автохтонного и аллохтонного (в том числе поступающего из антропогенных источников) органического вещества. Объединение фосфорного и азотного циклов в модели производится на основе уравнения динамики фитопланктона, описывающего первичное продуцирование органического вещества фитопланктоном в процессе фотосинтеза, а также пополнение запасов косного органического вещества (в единицах фосфора и азота) в результате процессов дыхания, природной смертности и выедания фитопланктона.

В качестве переменных модели рассматриваются следующие гидрохимические и гидробиологические характеристики: биомасса фитопланктона B_{ph} , постоянная $P_{гpop}$ и лабильная P_{lpop} фракции органического фосфора детрита, постоянная P_{rdop} и лабильная P_{ldop} фракции растворенного органического фосфора, минеральный растворенный фосфор P_{dip} , постоянная N_{lpon} и лабильная $N_{гpop}$ фракции органического азота детрита, постоянная N_{rdon} и лабильная N_{ldon} фракции растворенного органического азота, азот аммония N_{nh4} , азот нитратов

¹⁾ Hess K. W. MECCA Programs documentation. Washington, D.C. : U.S. Department of Commerce, 1989. 266 p. (NOAA technical report NESDIS ; 46). URL: https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/19301/noaa_19301_DS1.pdf (date of access: 08.06.2023).

и нитритов $N_{\text{no3+no2}}$, постоянная $C_{\text{грос}}$ и лабильная $C_{\text{лрос}}$ фракции органического углерода детрита, постоянная $C_{\text{рdoc}}$ и лабильная $C_{\text{лdoc}}$ фракции растворенного органического углерода, растворенный органический углерод, выделяемый водорослями C_{exdoc} , растворенный кислород O_2 [10].

В модели используется предположение о постоянстве химического состава органического вещества в соответствии с его стехиометрической моделью $(\text{CH}_2\text{O})_{106}(\text{NH}_3)_{16}\text{H}_3\text{PO}_4$. Таким образом, соотношение между углеродом, азотом и фосфором в органическом веществе составляет C:N:P = 106:16:1 (мкмоль)²⁾. Поскольку лимитирует цветение фитопланктона минеральный фосфор, приведем уравнения биомассы фитопланктона и фосфора фосфатов.

Биомасса фитопланктона B_{ph} (гС/м³):

$$\frac{dB_{\text{ph}}}{dt} = [G_{\text{B}} - k_{\text{pr}}(T) - k_{\text{grz}}(T)]B_{\text{ph}},$$

где t – время, сут; T – температура воды, °С; G_{B} – удельная валовая продукция, 1/сут; k_{pr} – удельная скорость метаболизма (дыхание), 1/сут; k_{grz} – удельная скорость выедания фитопланктона зоопланктоном и природная смертность фитопланктона, 1/сут, которые записываются в виде функциональных зависимостей

$$G_{\text{B}} = G_{\text{Bmax}} G_T(T) G_I(I) G_{\text{NP}}(N_{\text{din}}, P_{\text{dip}}),$$

$$G(I) = \frac{1}{\Delta Z} \int_{Z_i}^{Z_{i+1}} f_Z(I_Z) dZ = \frac{2.718 f_d}{\Delta Z \alpha} [\exp(-R_{Z_i}) - \exp(-R_{Z_{i+1}})],$$

$$R_0 = \frac{I_a}{I_{\text{opt}}}, \quad R_{Z_i} = R_0 \exp(-\alpha Z_i), \quad \Delta z = z_{i+1} - z_i,$$

$$f_Z(I_Z) = \frac{I_Z}{I_{\text{opt}}} \exp\left(1 - \frac{I_Z}{I_{\text{opt}}}\right), \quad I_Z = I_a \exp(-\alpha z),$$

$$G_{\text{NP}}(N_{\text{din}}, P_{\text{dip}}) = \min\left\{\frac{N_{\text{din}}}{K_{\text{mn}} + N_{\text{din}}}, \frac{P_{\text{dip}}}{K_{\text{mp}} + P_{\text{dip}}}\right\},$$

где $N_{\text{din}} = N_{\text{nh4}} + N_{\text{no3+no2}}$;

$$G_T(T) = \begin{cases} e^{\zeta_1(T-T_m)^2}, & \text{если } T \leq T_m, \\ e^{\zeta_2(T_m-T)^2}, & \text{если } T > T_m, \end{cases}$$

$$k_{\text{pr}}(T) = r_g G_{\text{B}} + r_b \theta_{\text{pr}}^{(T-20)},$$

$$k_{\text{grz}}(T) = k_{\text{grz}}(20) \theta_{\text{grz}}^{(T-20)},$$

Здесь G_{Bmax} – максимальная удельная валовая продукция, 1/сут; I_a – средний за световой день поток фотосинтетически активной радиации (ФАР), который

²⁾ Алекин О. А., Ляхин Ю. И. Химия океана : учебное пособие. Ленинград : Гидрометеиздат, 1984. 343 с.

проникает через поверхность моря, Вт/м²; I_{opt} – оптимальная для фотосинтеза облученность, Вт/м²; f_d – доля светового дня в сутках ($0 \leq f_d \leq 1$); I_z – облученность на глубине z , Вт/м²; α – интегральный коэффициент ослабления интенсивности ФАР с глубиной; K_{mn} , K_{mp} – константы полунасыщения интенсивности утилизации фитопланктоном минеральных форм азота и фосфора соответственно, г/м³; T_m – температура воды, оптимальная для роста водорослей, °C; ζ_1 , ζ_2 – коэффициенты, определяющие характер влияния температуры на рост водорослей в диапазонах выше и ниже T_m , 1/°C²; r_g – доля продукции водорослей, которая тратится на энергетическое обеспечение фотосинтеза; r_b – удельная скорость метаболизма водорослей при температуре 20 °C, 1/сут; θ_{pr} – коэффициент влияния температуры на скорость метаболизма; $k_{grz}(20)$ – удельная скорость выедания и гибели фитопланктона при температуре 20 °C, 1/сут; θ_{grz} – коэффициент влияния температуры на скорость выедания и смертности водорослей.

Минеральный растворенный фосфор P_{dip} (гР/м³):

$$\frac{dP_{dip}}{dt} = \alpha_{pc} f_{dip} (k_{pr}(T) + k_{grz}(T)) B_{ph} + (k_{mrdp} \theta_{mrdp}^{T-20} P_{rdop} + k_{mldp} \theta_{mldp}^{T-20} P_{ldop}) \frac{O_2}{K_{O_2} + O_2} - \alpha_{pc} (1 - f_{exB}) G_B B_{ph},$$

где α_{pc} – коэффициент, выражающий стехиометрическое соотношение между углеродом и фосфором в органическом веществе, гР/гС; k_{mrdp} – удельная скорость минерализации устойчивой фракции растворенного органического фосфора при температуре воды 20 °C, 1/сут; θ_{mrdp} – температурный коэффициент; k_{mldp} – удельная скорость минерализации лабильной фракции растворенного органического фосфора при температуре воды 20 °C, 1/сут; θ_{mldp} – температурный коэффициент; K_{O_2} – константа полунасыщения процесса в отношении наличной концентрации кислорода, гО₂/м³; f_{dip} – доля минерального фосфора в метаболических выделениях водорослей, остатках отмерших и выеданных водорослей; f_{exB} – доля первичной продукции водорослей, которая выделяется в виде растворенного органического вещества. Ниже представлены параметры и эмпирические коэффициенты, используемые в расчетах:

G_{Bmax}	1.88 1/сут	θ_{grz}	1.1
ζ_1	0.006 1/°C ²	α_{pc}	0.022 гР/гС
ζ_2	0.006 1/°C ²	f_{dip}	0.2
T_m	9.5 °C	k_{mrdp}	0.01
K_{mn}	0.025 гN/м ³	θ_{mrdp}	1.08
K_{mp}	0.0025 гР/м ³	k_{mldp}	0.1
r_g	0.2	θ_{mldp}	1.08
r_b	0.01	K_{O_2}	1 гC/м ³
θ_{pr}	1.067	f_{exB}	0.1
k_{grz}	0.05 1/сут		

При расчетах акватория бухты покрывалась сеткой 47 × 97 узлов с шагом 80 м и была разделена на 10 расчетных уровней по вертикали в σ -системе

координат. Данные о температуре воздуха и ветровом воздействии оценивались по измерениям на гидрометеопосту, установленном на м. Павловском на южном берегу Севастопольской бухты. Для моделирования использовались срочные данные о скорости ветра и его направлении, температуре воздуха за 2003 г. с 6-часовым интервалом, среднемесячные данные о влажности и балле облачности за 2003 г.

На границе бухты с открытым морем задавались среднемесячные значения температуры, солёности, биомассы фитопланктона, содержания фосфора фосфатов, азота нитратов, нитритов и аммония, кислорода на поверхности и на дне. На границе бухты и реки задавались ежедневные значения температуры, солёности, биомассы фитопланктона, содержания фосфора фосфатов, азота нитратов, нитритов и аммония, кислорода на поверхности и дне реки. Начальные поля температуры, солёности, биомассы фитопланктона, содержания биогенных элементов и кислорода задавались горизонтально-однородными.

Результаты

Совокупное воздействие ряда факторов, среди которых существенное значение имеют температура воздуха и воды, гидродинамический режим водоема, концентрация биогенных веществ (преимущественно неорганического фосфора), играет значительную роль в развитии фитопланктона в мелководных акваториях.

Температура воздуха в январе 2003 г. характеризовалась сильными колебаниями (от -5 до 15 °C) в первой половине месяца и была относительно стабильной (около 5 °C) в 20-х числах января (рис. 2). Такие изменения температуры воздуха отразились на поверхностной температуре воды в бухте. Анализ натурных данных показал, что низкая температура воздуха в январе 2003 г. привела к выхолаживанию верхнего слоя вод [11].

В январе отмечалась пониженная солёность, основной причиной ее изменения в исследуемой акватории является понижение солёности в поверхностном слое, вызванное дождями в период съемок и накануне [11].

Ветровой режим является основным фактором, определяющим динамику вод в мелководных акваториях. На рис. 3 представлены розы ветров в Севастопольской бухте для января 2003 г.: 1–19, 20–26 и 27–31 января. В первой

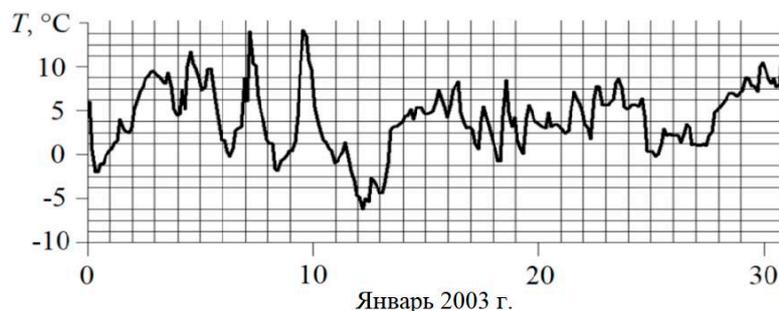
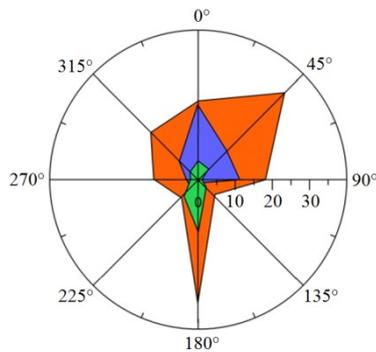


Рис. 2. Температура воздуха в районе Севастопольской бухты в январе 2003 г.

Fig. 2. Changes in air temperature in Sevastopol Bay area in January 2003



Р и с . 3 . Розы ветров с 1 по 19 января (красный цвет), с 20 по 26 января (синий цвет) и с 27 по 31 января (зеленый цвет) 2003 г.

Fig. 3. Windroses from 1 to 19 January (red colour), from 20 to 26 January (blue colour) and from 27 to 31 January (green colour) 2003

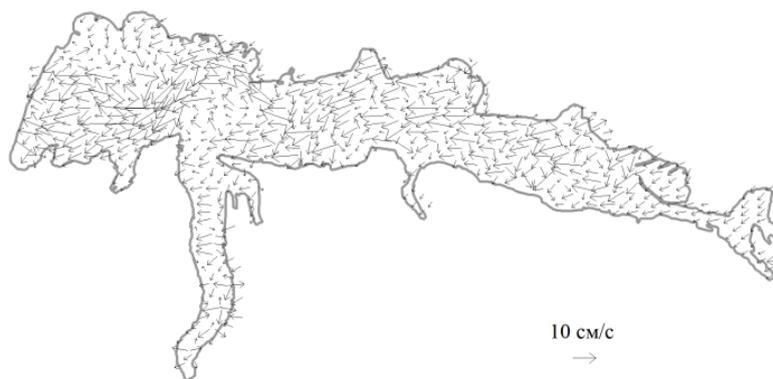
половине месяца ветровой режим был очень изменчив. Наблюдались ветры всех направлений с преобладанием ветров южного направления. С 20 января наблюдались ветры в основном северного и северо-восточного направлений, которые с 27 января сменили направление на южное, юго-западное.

Структура и скорость течений в водоеме влияют на продукционные процессы как прямо, так и косвенно. Прямое влияние проявляется в механическом воздействии на рост и развитие фитопланктона, а косвенное осуществляется через изменение физических и химических условий вегетации водорослей.

Распределение течений и температуры воды в Севастопольской бухте получено с помощью трехмерной гидротермодинамической модели. На картину течений в бухте влияют малые глубины, а также большая протяженность и изрезанность береговой линии. Структура течений соответствует среднеклиматической для зимнего периода, полученной в работе [12] при ветре восточного направления. По результатам расчета, течение направлено из бухты в открытое море, наибольшая завихренность характерна для восточной части бухты (рис. 4).

Направление ветра и рельеф дна оказывают основное воздействие на формирование течений на центральном участке бухты. Зимой пресная вода из р. Черной почти не поступает. В период зимнего выхолаживания резкое охлаждение поверхностных вод и активизация конвективного перемешивания приводят к возникновению множества нерегулярных структур в общей картине течения. Одна из вихревых ячеек наблюдается на центральном участке.

На рис. 5 и 6 показана динамика биомассы фитопланктона, фосфора фосфатов за 10-й, 17-й, 23-й, 29-й расчетные дни. В таблице представлены значения



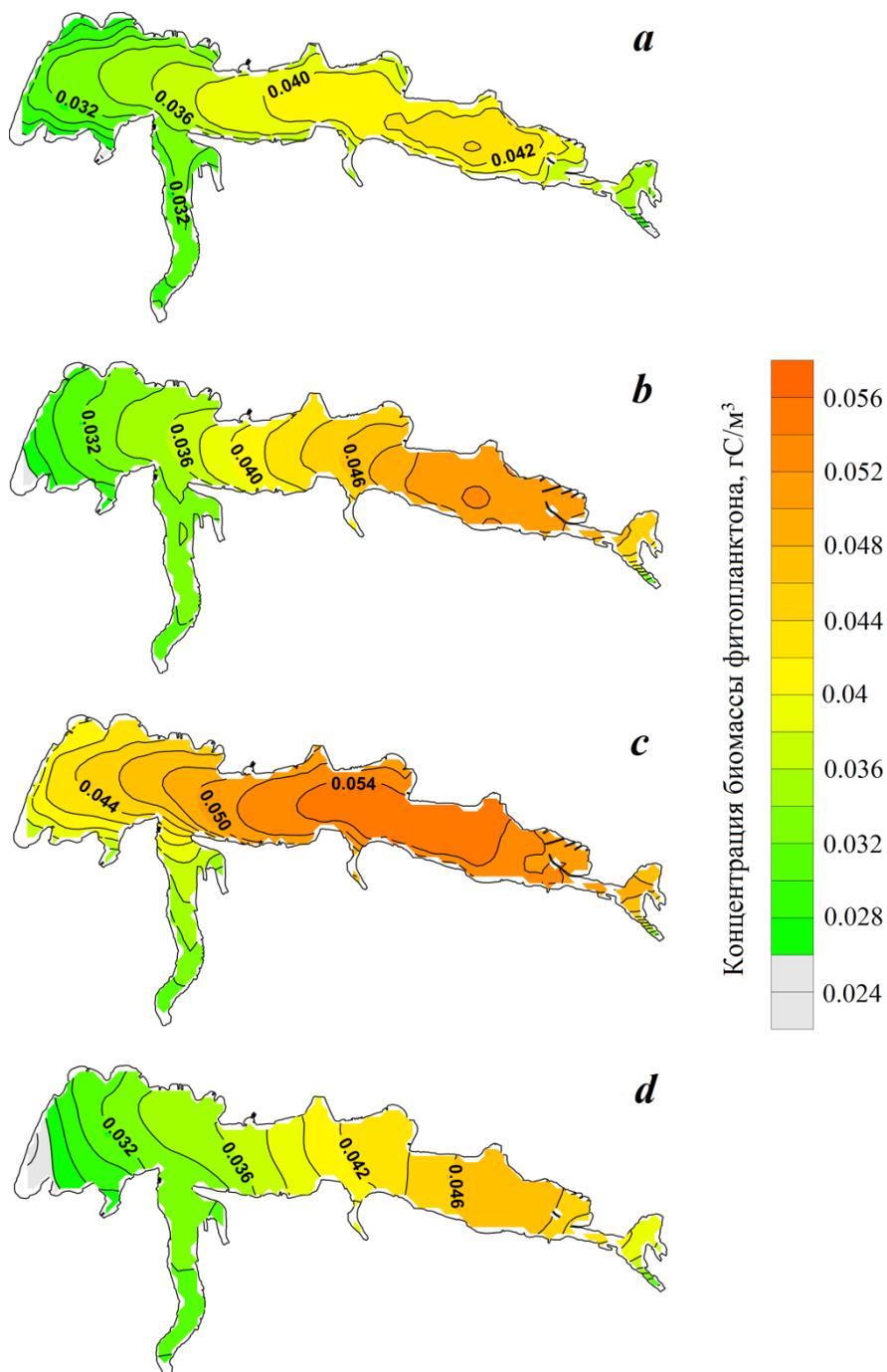
Р и с . 4 . Схема течений на поверхности вод бухты на 23-й расчетный день

Fig. 4. Map of currents on the bay water surface on the 23th model day

Диапазон изменчивости (над чертой) и средние значения (под чертой) концентрации биомассы фитопланктона B_{Ph} , $гС/м^3$, и фосфора фосфатов PO_4 , $гP/м^3$, в районах Севастопольской бухты

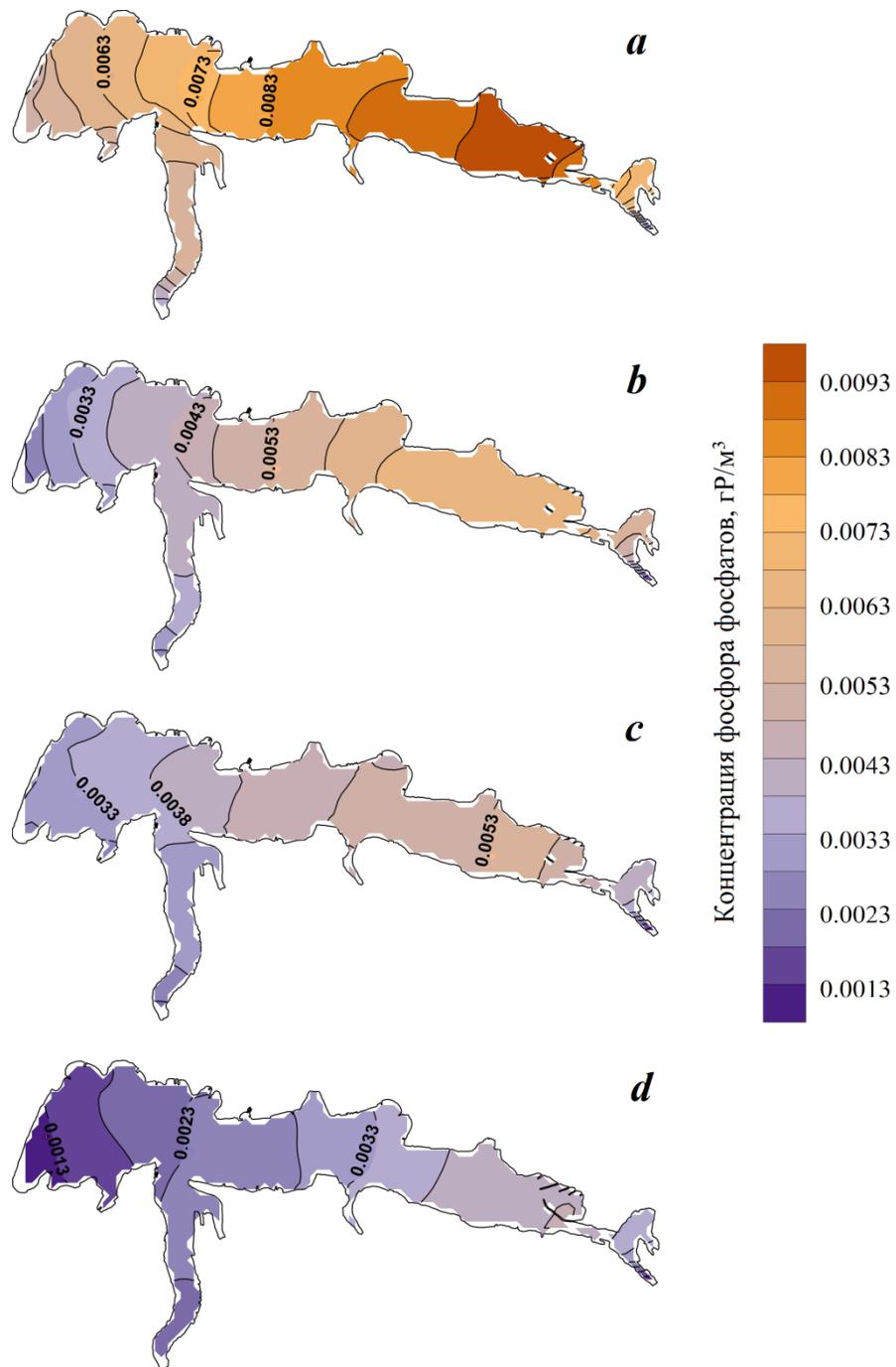
Variability range (above the line) and average values (under the line) of the phytoplankton biomass concentration B_{Ph} , $гC/m^3$, and phosphate phosphorus PO_4 , $гP/m^3$, in the Sevastopol Bay areas

Расчетный день / Model day	Район / Area	Концентрация / Concentration	
		B_{Ph}	PO_4
10	<i>W</i>	<u>0.0222–0.0355</u> 0.0307	<u>0.0011–0.0069</u> 0.0059
	<i>S</i>	<u>0.0272–0.0385</u> 0.0332	<u>0.0032–0.0078</u> 0.0064
	<i>C</i>	<u>0.0325–0.0444</u> 0.0404	<u>0.00590.0094</u> 0.0086
	<i>E</i>	<u>0.0238–0.0432</u> 0.0383	<u>0.0009–0.0094</u> 0.0085
17	<i>W</i>	<u>0.0235–0.035</u> 0.0306	<u>0.0014–0.0041</u> 0.0033
	<i>S</i>	<u>0.0306–0.0387</u> 0.0343	<u>0.0025–0.0048</u> 0.004
	<i>C</i>	<u>0.0401–0.0526</u> 0.047	<u>0.0053–0.0067</u> 0.0061
	<i>E</i>	<u>0.0282–0.0525</u> 0.0488	<u>0.0007–0.0068</u> 0.0061
23	<i>W</i>	<u>0.0242–0.0472</u> 0.0416	<u>0.0012–0.0038</u> 0.0032
	<i>S</i>	<u>0.0301–0.051</u> 0.0411	<u>0.0022–0.0042</u> 0.0034
	<i>C</i>	<u>0.0455–0.056</u> 0.0537	<u>0.0045–0.0053</u> 0.0049
	<i>E</i>	<u>0.0294–0.0553</u> 0.0504	<u>0.0006–0.0053</u> 0.0048
29	<i>W</i>	<u>0.0221–0.0343</u> 0.0291	<u>0.0009–0.0021</u> 0.0016
	<i>S</i>	<u>0.0294–0.036</u> 0.0332	<u>0.0009–0.0021</u> 0.0016
	<i>C</i>	<u>0.0377–0.0472</u> 0.0429	<u>0.0027–0.0041</u> 0.0033
	<i>E</i>	<u>0.029–0.0474</u> 0.0436	<u>0.0006–0.0043</u> 0.0039



Р и с . 5 . Концентрация биомассы фитопланктона, $\text{гC}/\text{м}^3$, на 10 (*a*), 17 (*b*), 23 (*c*) и 29-й (*d*) расчетные дни в Севастопольской бухте

Fig . 5 . Phytoplankton biomass concentration, gC/m^3 , on the 10th (*a*), 17th (*b*), 23rd (*c*) and 29th (*d*) model days in Sevastopol Bay



Р и с . 6 . Концентрация фосфора фосфатов, гP/м³, на 10 (a), 17 (b), 23 (c), 29-й (d) расчетные дни в Севастопольской бухте

Fig. 6. Phosphate phosphorus concentration, gP/m³, on the 10th (a), 17th (b), 23rd (c) and 29th (d) model days in Sevastopol Bay

этих показателей в среднем, а также их диапазон изменчивости в западном (*W*), южном (*S*), центральном (*C*), восточном (*E*) районах бухты согласно районированию в работе [2] (см. рис. 1). Наибольшие концентрации биомассы фитопланктона и фосфора фосфатов за весь расчетный период отмечаются в восточном и центральном районах. Максимум цветения фитопланктона наблюдается на 23-й расчетный день – 0.056 гС/м^3 в центральном районе, затем максимальная концентрация биомассы снижается до 0.047 гС/м^3 в центральном и восточном районах. Кроме того, в центральном районе бухты прослеживается уменьшение концентрации фосфора фосфатов с максимальных 0.0085 гР/м^3 на 10-й расчетный день до 0.0049 гР/м^3 в 23-й расчетный день. Это говорит о том, что фосфор, будучи лимитирующим элементом, потребляется фитопланктоном.

Область цветения в центральном районе можно объяснить образовавшейся вихревой ячейкой, из-за которой возникла область с повышенной концентрацией фосфора фосфатов, а также повышенной, по сравнению с другими районами бухты, температурой, что является благоприятным фактором для развития водорослей. Если концентрация биомассы фитопланктона растет в среднем по бухте от 0.0357 гС/м^3 в 10-й расчетный день до 0.0467 гС/м^3 в 23-й расчетный день, а затем снижается до 0.0372 гС/м^3 в 29-й расчетный день, то концентрация фосфора фосфатов в течение всего расчетного периода снижается от 0.0074 гР/м^3 в 10-й расчетный день до 0.0028 гР/м^3 в 29-й расчетный день. Этот факт также говорит о потреблении фитопланктоном фосфора фосфатов и, ввиду его нехватки к концу расчетного периода, снижению концентрации биомассы фитопланктона. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными, описанными в работах [11, 13, 14].

Выводы

Выполненное численное моделирование зимнего цветения фитопланктона в Севастопольской бухте при метеоусловиях января 2003 г. позволяет проследить динамику фитопланктона и фосфора фосфатов в различных частях бухты. Пик цветения фитопланктона наблюдается на 23-й расчетный день в центральной части бухты, концентрация фосфора фосфатов снижается на протяжении всего расчетного периода. Максимальные значения концентраций этих параметров в центральной части бухты обусловлены образовавшейся вихревой ячейкой и повышенной температурой воды. Оценки, полученные в ходе численного моделирования, в целом соответствуют данным наблюдений.

Несмотря на то что в отсутствие данных наблюдений результаты моделирования служат лишь косвенной оценкой, их использование поможет продвинуться в понимании механизмов экологических процессов, наметить направление будущих уточняющих исследований. Благодаря моделированию можно также рассчитать различные сценарии эвтрофирования бухты при увеличении объема сбросов в нее биогенных веществ.

Выполненное исследование может служить основой для дальнейшего развития модельного подхода и его применения к мониторингу и управлению экосистемными процессами в мелководных водоемах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современное состояние и тенденции изменения экосистемы Севастопольской бухты / Е. В. Павлова [и др.] // Акватория и берега Севастополя: экосистемные процессы и услуги обществу. Севастополь : Аквавита, 1999. С. 70–94.
2. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов / В. А. Иванов [и др.]. Севастополь : МГИ НАНУ, 2006. 90 с. URL: http://mhi-ras.ru/assets/files/gidrologo-gidrohimicheskij_rezhim_sevastopolskoj_buhty_2006.pdf (дата обращения: 17.05.2023).
3. Любарцев В. Г., Любарцева С. П. Конструирование двумерных экологических моделей класса реакция-диффузия // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. Вып. 16. С. 314–322. EDN YUNNVN.
4. Филиппова Т. А., Васечкина Е. Ф., Кубряков А. И. Численное моделирование химико-биологических процессов в прибрежной зоне моря // Актуальные вопросы рыболовства, рыбоводства (аквакультуры) и экологического мониторинга водных экосистем. Ростов-на-Дону. 11–12 декабря 2018 г. Ростов-на-Дону : Изд-во ФГБНУ «АзНИИРХ», 2018. С. 357–361. URL: http://aquacultura.org/upload/files/pdf/library/conf/Конференция_АзНИИРХ_2018.pdf (дата обращения: 17.05.2023).
5. Слепчук К. А., Хмара Т. В. Использование оптимизационного метода в калибровке биогеохимической модели // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2017. № 2. С. 90–97. EDN WPIONE.
6. Слепчук К. А., Хмара Т. В., Маньковская Е. В. Сравнительная оценка уровня трофности Севастопольской и Южной бухт с использованием индекса E-TRIX // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 5. С. 67–78. EDN ZQKYZT. doi:10.22449/0233-7584-2017-5-67-78
7. Slepchuk K. A. Comparative Analysis of Eutrophication Level of the Sevastopol Bay Areas Based on the Results of E-TRIX Index Numerical Modeling // Processes in Geo-Media. Vol. I. Springer Cham. P. 101–107. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38177-6_12
8. 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. EDN AWWRHN. doi:10.48612/fpg/92ge-ahz6-n2pt
9. Иванов В. А., Тучковенко Ю. С. Прикладное математическое моделирование качества вод шельфовых морских экосистем. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. 386 с.
10. Тучковенко Ю. С. Трехмерная математическая модель качества вод Днепровско-Бугского приустьевого района северо-западной части Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. Вып. 12. С. 374–391. EDN YUCGCK.
11. Экологическая оценка современного состояния вод в районе взаимодействия Севастопольской бухты с прилегающей частью моря / Е. А. Куфтаркова [и др.] // Морской экологический журнал. 2006. Т. 5, № 1. С. 72–91. EDN UJLDSN.
12. 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. EDN HJJGAF.

13. Лопухина О. А., Манжос Л. А. Фитопланктон Севастопольской бухты (Черное море) в теплый и холодный периоды 2001–2002 гг. // Экология моря. 2005. Т. 69. С. 25–31. EDN UMCNDJ.
14. Биологическое разнообразие фитопланктона прибрежной зоны Черного моря в районе Севастополя (2001–2003 гг.) / И. Г. Поликарпов [и др.] // Современное состояние биоразнообразия прибрежных вод Крыма / В. Н. Еремеев, А. В. Гаевская. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. С. 16–42.

Поступила 10.02.2023 г.; одобрена после рецензирования 25.03.2023 г.; принята к публикации 03.05.2023 г.; опубликована 26.06.2023 г.

Об авторах:

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

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

Заявленный вклад авторов:

Слепчук Кира Александровна – постановка проблемы, проведение численных экспериментов, обработка и интерпретация результатов моделирования, подготовка текста и графических материалов статьи

Хмара Татьяна Викторовна – проведение численных экспериментов, анализ и описание результатов исследования, подготовка текста

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.