

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

INFORMATION TECHNOLOGIES



УДК 519.6

Оригинальное теоретическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2587-8999-2024-8-4-27-34>


Прогнозирование динамики летних видов фитопланктона на основе методов усвоения спутниковых данных

Ю.В. Белова¹ , А.А. Филина² , А.Е. Чистяков¹ ¹ Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация² ООО «НИЦ супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров», г. Таганрог, Российская Федерация✉ yvbelova@yandex.ru

Аннотация

Введение. В качестве основного инструмента исследований функционирования водных экосистем и прогнозирования изменения концентрации фитопланктона в мелководном водоеме в летний период обычно используется математический инструмент с применением спутниковых данных, что позволяет осуществлять корректный мониторинг, анализ и моделирование динамики протекания биогеохимических процессов в пространстве и во времени с учетом совокупного действия ряда физико-химических, биологических и антропогенных факторов, влияющих на изучаемую водную экосистему. Авторами разработана математическая модель, коррелирующая со спутниковой информацией, позволяющая прогнозировать поведение летних видов фитопланктона в мелководном водоеме в условиях ускоренного времени, описывать окислительно-восстановительные процессы водной среды, сульфатредукции, трансформации биогенных веществ (минерального питания фитопланктона), изучать развитие заморных явлений, возникающих в результате антропогенной эвтрофикации, строить прогнозы изменения кислородного и биогенного режимов функционирования водоема.

Материалы и методы. Для моделирования численности видового состава летнего фитопланктона, коррелирующего с методами усвоения спутниковых данных, разработан оперативный алгоритм восстановления параметров качества вод Азовского моря, который базируется на методе многомерной оптимизации Левенберга-Марквардта. Начальное распределение фитопланктонных популяций было получено в результате применения метода LBP (локальных бинарных шаблонов) к космическим снимкам Таганрогского залива и использовано в качестве входных данных для разработанной математической модели.

Результаты исследования. На основе комплексированных моделей гидродинамики и биологической кинетики, а также методов усвоения спутниковых данных, разработан программный комплекс, который позволяет строить кратко- и среднесрочные прогнозы экологической обстановки мелководных водоемов на основе различных входных данных, коррелирующих со спутниковой информацией.

Обсуждение и заключение. В рамках проводимых исследований состояния водных систем установлено, что одним из механизмов повышения качества прогнозирования биогеохимических процессов морских экосистем является уточнение начальных данных. Установлено, что использование спутниковых данных наряду с методами математического моделирования позволяют изучать пространственно-временное распределение загрязнений различной природы, планктонных популяций исследуемого водного объекта, оценивать характер и масштабы природного или техногенного явления для предотвращения негативных последствий экономического и социального характера.

Ключевые слова: прогнозирование, популяции летнего фитопланктона, прибрежная система, спутниковые данные, численный эксперимент

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22–71–10102, <https://rscf.ru/project/22-71-10102/>

Для цитирования. Белова Ю.В., Филина А.А., Чистяков А.Е. Прогнозирование динамики летних видов фитопланктона на основе методов усвоения спутниковых данных. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2024;8(4):27–34. <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2024-8-4-27-34>

Forecasting the Dynamics of Summer Phytoplankton Species based on Satellite Data Assimilation Methods

Yulia V. Belova¹ , Alena A. Filina² , Alexander E. Chistyakov¹ 

¹ Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

² Supercomputers and Neurocomputers Research Center, Taganrog, Russian Federation

✉ yvbelova@yandex.ru

Abstract

Introduction. Mathematical tools integrated with satellite data are typically employed as the primary means for studying aquatic ecosystems and forecasting changes in phytoplankton concentration in shallow water bodies during summer. This approach facilitates accurate monitoring, analysis, and modeling of the spatiotemporal dynamics of biogeochemical processes, considering the combined effects of various physicochemical, biological, and anthropogenic factors impacting the aquatic ecosystem. The authors have developed a mathematical model aligned with satellite data to predict the behavior of summer phytoplankton species in shallow water under accelerated temporal conditions. The model describes oxidative-reduction processes, sulfate reduction, and nutrient transformations (phytoplankton mineral nutrition), investigates hypoxia events caused by anthropogenic eutrophication, and forecasts changes in the oxygen and nutrient regimes of the water body.

Materials and Methods. To simulate the population dynamics of summer phytoplankton species correlated with satellite data assimilation methods, an operational algorithm for restoring water quality parameters of the Azov Sea was developed based on the Levenberg-Marquardt multidimensional optimization method. The initial distribution of phytoplankton populations was obtained by applying the Local Binary Patterns (LBP) method to satellite images of the Taganrog Bay and was used as input data for the mathematical model.

Results. Using integrated hydrodynamic and biological kinetics models combined with satellite data assimilation methods, a software suite was developed. This suite enables short- and medium-term forecasts of the ecological state of shallow water bodies based on diverse input data correlated with satellite information.

Discussion and Conclusion. The conducted studies on aquatic systems revealed that improving the accuracy of initial data is one mechanism for enhancing the quality of biogeochemical process forecasting in marine ecosystems. It was established that using satellite data alongside mathematical modeling methods allows for studying the spatiotemporal distribution of pollutants of various origins, plankton populations in the studied water body, and assessing the nature and scale of natural or anthropogenic phenomena to prevent negative economic and social consequences.

Keywords: forecasting, summer phytoplankton populations, coastal system, satellite data, numerical experiment

Funding. The study was supported by the Russian Science Foundation grant no. 22–71–10102, <https://rscf.ru/project/22-71-10102/>

For Citation. Belova Yu.V., Filina A.A., Chistyakov A.E. Forecasting the dynamics of summer phytoplankton species based on satellite Data assimilation methods. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2024;8(4):27–34. <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2024-8-4-27-34>

Введение. Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) представляет собой современный и перспективный способ оценки биологического состояния мелководных водоемов, динамики биогеохимических процессов, в том числе поведения фитопланктонных популяций в летний период в акватории мелководных систем. Существующая на сегодняшний день проблема построения и применения вычислительно-эффективных алгоритмов прогнозирования, а также оснащения их реальными входными данными является основной для получения численного решения задач прогнозного моделирования процессов гидробиологии водоемов Юга России.

Исследования в данной области ведутся многими российскими и зарубежными учеными. Например, в [1] описано применение методов дистанционного зондирования в картировании цветения цианобактерий в озерах на севере Италии. В работе [2] показана эффективность алгоритма максимальной высоты пика (MPH) MERIS при извлечении значений концентрации хлорофилла-«а» (chl-a) как инструмента мониторинга эвтрофикации водоема. Г.И. Марчуком, В.П. Шутяевым, Г.К. Коротаевым, В.Б. Залесным активно развивались методы усвоения данных наблюдений в задачах физики атмосферы и океана [3, 4]. А.А. Зеленко, Ю.Д. Реснянский занимались изучением морских наблюдательных систем [5]. О.И. Криворотко, С.И. Кабанихиным разработаны алгоритмы восстановления источников возмущений в системе нелинейных уравнений мелкой воды [6]. Работы Г.И. Марчука и В.П. Шутяева посвящены разработке итерационных алгоритмов, которые основаны на теории сопряженных уравнений и позволяют решать задачи вариационного усвоения данных [7]. Y. Chao, H. Zhang и др. в [8] предложена трехмерная система моделирования океана в районе Калифорнии с обработкой спутниковых данных в реальном времени. Модель океана имеет горизонтальное разрешение около трех километров и использует многомасштабную трехмерную вариационную методологию обработки данных.

В работе [9] учеными R. Robertson и C. Dong проводится сравнение следующих алгоритмов параметризации вертикального перемешивания воды в океане: модификации Nakanishi-Niino алгоритма Mellor-Yamada (NN), алгоритма Large-McWilliams-Doney's Kpp (LMD), Mellor-Yamada 2.5 (MY), а также четырех версий алгоритма Generic Length Scale (GLS). Активно развиваются алгоритмы обработки спутниковых снимков для параметризации моделей гидродинамики и гидробиологии, выявления зон загрязнения и пр. В исследовании [10] описаны алгоритмы и приведён код для автоматического обнаружения нитей апвеллинга (AFD), основанного на обработке изображений и распознавании образов. В исследовании [11] изучается вопрос о возможности использования спутниковых изображений Sentinel-2 с беспилотным летательным аппаратом для получения многоспектральных аэрофотоснимков и выявления наличия мусора на поверхности моря для его мониторинга, сбора и удаления.

Целью данного исследования является совместное использование эффективных методов математического моделирования и методов усвоения спутниковых данных для проведения детальных исследований функционирования водных экосистем, прогнозирования динамики изменения численности видового состава летнего фитопланктона в мелководном водоеме, что, в свою очередь, позволит наблюдать и анализировать динамику протекания биогеохимических процессов мелководных систем в пространстве и во времени, с учетом совокупного действия физико-химических, биологических и антропогенных факторов, влияющих на изучаемую водную экосистему.

Материалы и методы. Разработанная математическая 4D-модель эволюции летнего фитопланктона в прибрежных системах основана на системе нестационарных уравнений в частных производных с нелинейными функциями правых частей ψ_i :

$$\frac{\partial q_i}{\partial t} + u \frac{\partial q_i}{\partial x} + v \frac{\partial q_i}{\partial y} + (w - w_{gi}) \frac{\partial q_i}{\partial z} = \mu_i \Delta q_i + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_i \frac{\partial q_i}{\partial z} \right) + \psi_i, \quad (1)$$

где u, v, w — компоненты вектора скорости конвективного переноса; μ_i, ν_i — коэффициенты турбулентного переноса в горизонтальном и вертикальном направлении соответственно; w_{gi} — скорость гравитационного осаждения i -ой компоненты, находящейся во взвешенном состоянии; Δ — двумерный оператор Лапласа; ψ_i — нелинейные функции источников, описывающие химико-биологические процессы; i — вид субстанции, $i \in M = \{P, MP, N, D, BT, BD, H_2S, S, SO_4, O_2\}$. Расшифровка множества моделируемых субстанций представлена в таблице 1.

Таблица 1

Множество моделируемых субстанций

№	Обозначение	Описание
1	P	Виды летнего фитопланктона
2	MP	Метаболит фитопланктона
3	N	Питательные вещества
4	D	Детрит
5	BT	Аэробные бактерии <i>Thiobacillus</i>
6	BD	Анаэробные бактерии рода <i>Desulfovibrio</i>
7	H_2S	Сероводород
8	S	Элементарная сера
9	SO_4	Сульфаты
10	O_2	Растворенный кислород

Функции источников и параметры модели описаны в работе [12]. К модели добавляются соответственные начальные и граничные условия. Представленная математическая модель основана на работах выдающихся ученых А.И. Сухинова, Б.Н. Четверушкина, Г.Г. Матишова, Е.В. Якушева, Е.Р. Weiner и др. [13, 14].

Разработка программного комплекса для исследований и прогнозирования. Прогнозирование динамики поведения фитопланктона в мелководном водоеме в летний период осуществлялось на базе разработанного исследовательско-прогнозного комплекса (ИПК) с интегрируемым алгоритмом его взаимодействия с геоинформационными системами (ГИС). В специфику программно-алгоритмического аппарата входит возможность анализа и оценки масштабов развития стихийных катаклизмов (включая процессы эвтрофирования, «цветения», загрязнения водной среды компонентами различной этиологии и пр.), построения кратко- и среднесрочных прогнозов их развития в ускоренном масштабе времени с возможностью дальнейшего предотвращения негативного влияния экономического и социального характера. Ввиду быстрого развития факторов, отрицательно влияющих на процесс протекания опасных и чрезвычайных явлений (климатические, техногенные), использование современных и эффективных методик прогнозирования и интеграция с ГИС и спутниковыми данными на сегодняшний день являются очень актуальными.

Моделирование динамики биологических и геохимических показателей мелководного водоема (Азовское море и Таганрогский залив) осуществлялось с помощью решения прямой и обратной задач ДЗЗ, водной среды. Для решения прямой задачи дистанционного зондирования в видимом диапазоне требуется нахождение спектральной зависимости коэффициента отражения $R_{rsw} = (\lambda, -0, \theta_0, \beta)$ от концентраций компонентов водной системы и их оптических свойств [15]:

$$R_{rsw}(\lambda, -0, \theta_0, \beta) = T_{surf} L_w(+0, \theta_v, \beta_v, \lambda) / E_d(+0, \lambda), \quad (8)$$

где λ — длина волны; β — угол визирования водной поверхности спутниковым датчиком; θ_0 — солнечный зенитный угол; T_{surf} — фактор ослабления солнечного света при прохождении через раздел сред «вода — воздух»; $E_d(+0, \lambda)$ — освещенность водной поверхности; $L_w(+0, \theta_v, \beta_v, \lambda)$ — яркость водной поверхности, определяемая с помощью данных дистанционного зондирования.

Решение обратной задачи основано на создании алгоритма восстановления водных параметров по спутниковым данным. На оптические свойства воды могут влиять живые организмы, растворенные и взвешенные вещества, микротурбулентные неоднородности, пузырьковые газы. В данной работе выделены основные цветообразующие компоненты (вода, растворенное органическое вещество (ров); хлорофилл фитопланктона (хл), минеральная взвесь (мв)); первичные гидрооптические параметры воды (a — коэффициент поглощения; b_b — коэффициент обратного рассеяния, которые являются свертками оптических свойств цветообразующих компонент, характеризующихся свойствами аддитивности):

$$a = \sum_{k=1}^K C_k a_k^*; \quad b = \sum_{k=1}^K C_k b_{bk}^*, \quad (9)$$

где a_k^*, b_{bk}^* — первичные гидрооптические характеристики k -ой компоненты; C_k — удельные концентрации k -ой компоненты. Совокупность спектральных значений коэффициентов a^*, b_b^* составляет гидрооптическую модель Азовского моря. Коэффициент $R_{rsw} = (\lambda, -0, \theta_0, \beta)$ был определен как вторичная гидрооптическая характеристика водной среды, характеризующая свойства воды, свойства яркости света, определяемый на горизонте по поверхностным слоем водной толщи, слабо зависящий от θ_0 и β :

$$R_{rsw}(\lambda, C, a, b_b) = a_0 + a_1 \{b_b(\lambda) / a(\lambda)\} + a_2 \{b_b(\lambda) / a(\lambda)\}^2, \quad (10)$$

где $a_k, k = \overline{0, 2}, b_b(\lambda), a(\lambda)$ — известные коэффициенты для каждого компонента водной среды (гидрооптическая модель Азовского моря).

Опишем разработанный алгоритм восстановления водных параметров Азовского моря, который основан на эффективном методе многомерной оптимизации Левенберга-Марквардта (ЛМ). Вектор концентраций цветообразующих компонент задавался в виде:

$$C = (C_{chl}, C_{mв}, C_{pov})^T.$$

Для нахождения оптимального вектора концентрации C осуществлен поиск абсолютного минимума функции невязки $f(C)$:

$$f(C) = \sum_j [S_j - R_{rsw}(\lambda, C, a, b_b)]^2. \quad (11)$$

Выражение для расчета оптимального вектора C имеет вид:

$$C_{k+1} = C_k + \lambda_k (F_k^T F_k + \mu_k D_k)^{-1} F_k R_{rsw}(\lambda, C_k, a, b_b), \quad (12)$$

где $F_k = \left(\frac{\partial R_{rsw}(\lambda, C_k, a, b_b)}{\partial C_k} \right)$ — матрица; μ_k — направление минимизации; D_k — диагональ матрицы $F_k^T F_k$; λ_k — длина шага оптимизации; τ — операция транспонирования.

Выражение (9) и приведенная параметризация (10) использовались для расчета спектрального значения коэффициента отражения водной толщи $R_{rsw} = (\lambda, C, a, b_b)$ по векторам концентраций цветообразующих компонент. Расчет выполнен для длин волн 412, 443, 490, 510, 590, 670 нм (положение каналов Sea Viewing Wide Field Sensor (SeaWiFS)).

Наряду с синхронными данными ДЗЗ датчиков SeaWiFS и спектрометра MODIS, для верификации точности восстановления вектора, полученного на основе алгоритма ЛМ, использовались подспутниковые измерения гидродинамических, гидрооптических, биогеохимических параметров исследуемого водоема, включая коэффициенты рассеяния, поглощения, ослабления для 9 длин волн спектрального диапазона 412–715 нм, измеряемые на каждой станции в ходе проведения экспедиционных работ. При сопоставлении полученных результатов, измеренных и восстановленных по данным спутникового мониторинга, получено согласование концентраций цветообразующих компонент, показатель корреляции между которыми в среднем составил 0,75.

Результаты исследования. На основе комплексированных моделей гидродинамики и биологической кинетики был проведен вычислительный эксперимент. В качестве реальной области моделирования был выбран

Таганрогский залив, так как в этой части Азовского моря в летний период производится основная доля биомассы фитопланктона. Для этого разработан и встроен в программный комплекс «Azov3D» модуль для расчета процессов биологической кинетики [16–18]. Входными данными для расчетов являются распределения солёности и температуры, полученные по картографической информации, скорости течения водной среды, рассчитанные на основе математической модели гидродинамики, обработанные данные многолетних наблюдений о концентрациях биогенных веществ и основных видов фитопланктона [19]. Также в качестве входных данных использовано пространственное распределение фитопланктонных популяций, являющееся результатом применения метода локальных бинарных шаблонов (Local Binary Patterns, LBP) к спутниковым снимкам, полученным авторами данного метода [20]. Данный метод позволяет получить границы фитопланктонных «пятен», загрязняющих веществ, в том числе нефти и нефтепродуктов, на спутниковых снимках. На рис. 1 *а* изображен начальный спутниковый снимок, полученный 6 августа 2020 г. с помощью спутника Sentinel-2 L2A [21], на рис. 1 *б* — начальное распределение фитопланктонных популяций, полученное в результате применения метода LBP, поступающее в качестве начальных данных в программный модуль. Значение концентрации характерно для фитопланктона в летний период по данным многолетних наблюдений.

Результаты работы программного комплекса для временного интервала 30 суток и равномерного распределения рассчитываемых субстанций фитопланктона и биогенных веществ изображены на рис. 2.

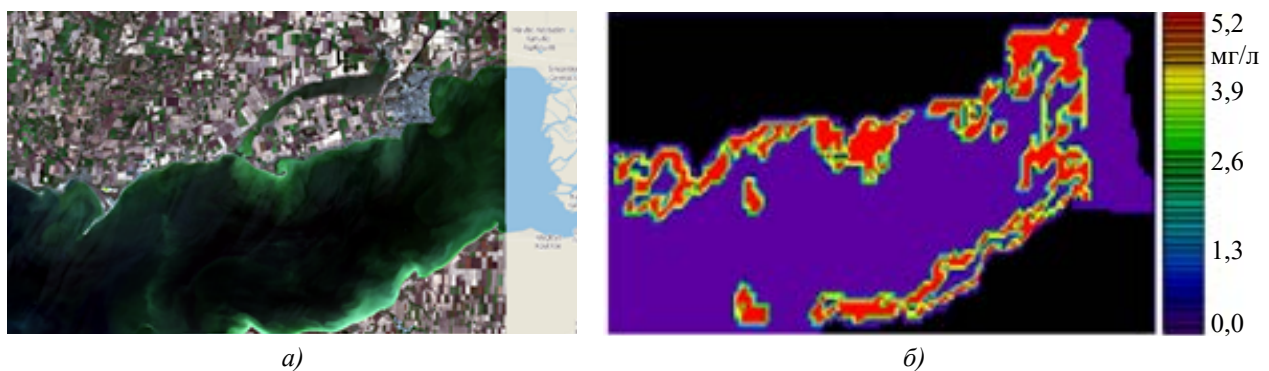


Рис. 1. Изображения фитопланктона: *а* — спутниковый снимок моделируемой области; *б* — первоначальное распределение популяций фитопланктона

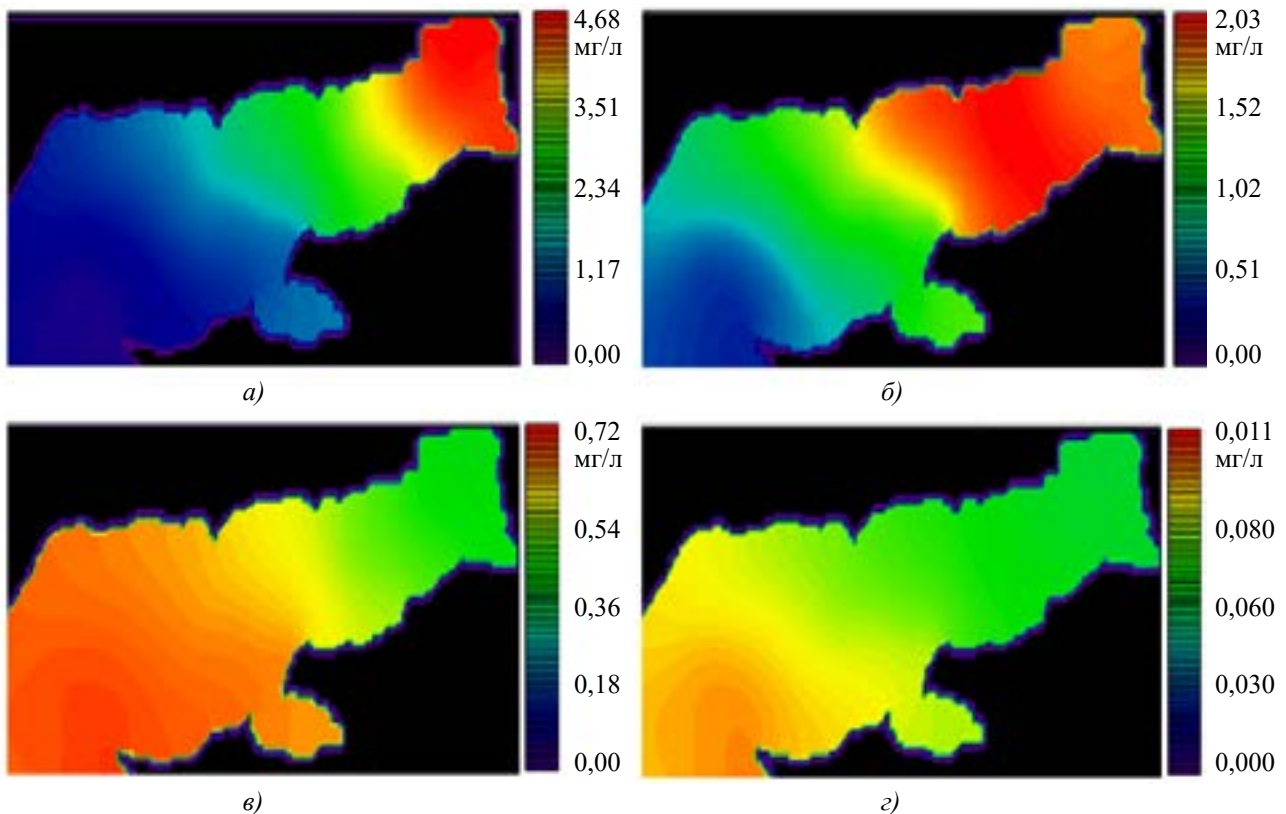


Рис. 2. Распределение концентраций зеленых водорослей: *а* — *Chlorella vulgaris* green algae; *б* — сине-зеленого *Aphanizomenon flos-aquae*; *в* — фосфатов; *г* — нитратов в Таганрогском заливе в летний период

Обсуждение и заключение. В рамках проводимых исследований состояния водных систем установлено, что одним из механизмов повышения качества прогнозирования биогеохимических процессов морских экосистем является уточнение начальных данных. В системах усвоения данных наблюдений наряду со стационарными измерениями большую значимость приобретают методы обработки и усвоения спутниковой информации, активно развивающиеся в стране в течение последних десятилетий. Установлено, что использование спутниковых данных наряду с методами математического моделирования позволяют изучать пространственно-временное распределение загрязнений различной природы, планктонных популяций исследуемого водного объекта, оценивать характер и масштабы природного или техногенного явления для предотвращения негативных последствий экономического и социального характера.

Авторами построена пространственно-неоднородная математическая модель эволюции летнего фитопланктона в мелководной водоеме, численно реализованная в ИПК, взаимодействующего с разного рода ГИС и спутниковой информацией. Модель позволяет в оперативном режиме прогнозировать динамику изменения плотности и пространственного распределения рассматриваемых планктонных популяций, проводить изучение и анализ окислительно-восстановительных процессов, трансформации биогенных веществ (минерального питания фитопланктона), сульфатредукции, протекающих в водной толще, изучать развитие заморных явлений, возникающих в результате антропогенной эвтрофикации, строить прогнозы изменения кислородного и биогенного режимов функционирования водоема.

ИПК позволяет разрабатывать комплекс превентивных мер для обеспечения экологической безопасности и сокращения экономического ущерба исследуемого региона. В работе также построен эффективный и быстро реализуемый алгоритм восстановления водных параметров мелководного региона (Азовское море), основанный на эффективном методе многомерной оптимизации ЛМ.

Разработанный ИПК может быть успешно применен для построения кратко- и среднесрочных прогнозов экологической обстановки мелководных водоемов Юга России на базе различной входной информации, например, данных о пространственном распределении фитопланктона в летний период, полученных в результате применения метода локальных бинарных шаблонов к спутниковым снимкам.

Список литературы / References

1. Bresciani M., Giardino C., Lauceri R., Matta E., Cazzaniga I., Pinardi M., et al. Earth observation for monitoring and mapping of cyanobacteria blooms. Case studies on five Italian lakes. *Journal of Limnology*. 2017;76:127–139. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2016.1565>
2. Pitarch J., Ruiz-Verdú A., Sendra M.D., and Santoleri R. Evaluation and reformulation of the maximum peak height algorithm (MPH) and application in a hypertrophic lagoon. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017;122(2):1206–1221. <https://doi.org/10.1002/2016JC012174>
3. Shutyaev V.P. Methods for observation data assimilation in problems of physics of atmosphere and ocean. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019;55(1):17–31. <https://doi.org/10.1134/S0001433819010080>
4. Коротаев Г.К., Шутяев В.П. Численное моделирование циркуляции океана со сверхвысоким пространственным разрешением. *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2020;56(3):334–346. <https://doi.org/10.31857/S0002351520030104>
- Korotaev G.K., Shutyaev V.P. Numerical simulation of ocean circulation with ultrahigh spatial resolution. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Physics of the atmosphere and ocean*. 2020;56(3):334–346. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0002351520030104>
5. Зеленько А.А., Реснянский Ю.Д. Морские наблюдательные системы как составная часть оперативной океанологии (обзор). *Метеорология и гидрология*. 2018;12:5–30.
- Zelenko A.A., Resnyansky Yu.D. Marine observation systems as an integral part of operational oceanology (review). *Meteorology and hydrology*. 2018;12:5–30. (In Russ.)
6. Кабанихин С.И., Криворотко О.И. Алгоритм восстановления источника возмущений в системе нелинейных уравнений мелкой воды. *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2018;58(8):138–147. <https://doi.org/10.31857/S004446690002008-9>
- Kabanikhin S.I., Krivorotko O.I. Algorithm for restoring the source of disturbances in a system of nonlinear shallow water equations. *Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2018;58(8):138–147. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S004446690002008-9>
7. Марчук Г.И., Шутяев В.П. Сопряженные уравнения и итерационные алгоритмы в задачах вариационного усвоения данных. *Труды института математики и механики УрО РАН*. 2011;17(2):136–150.
- Marchuk G.I., Shutyaev V.P. Conjugate equations and iterative algorithms in problems of variational data assimilation. *Proceedings of the Institute of Mathematics and Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2011;17(2):136–150. (In Russ.)
8. Chao Y., Farrara J.D., Zhang H., Armenta K.J., Centurioni L., Chavez F., et al. Development, Implementation, and Validation of a California Coastal Ocean Modeling, Data Assimilation, and Forecasting System. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2018;151:49–63. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.04.013>

9. Robertson R., Dong C. An evaluation of the performance of vertical mixing parameterizations for tidal mixing in the Regional Ocean Modeling System (ROMS). *Geoscience Letters*. 2019;6(15). <https://doi.org/10.1186/s40562-019-0146-y>
10. Artal O., Sepúlveda H.H., Mery D., Pieringer C. Detecting and characterizing upwelling filaments in a numerical ocean model. *Computers and Geosciences*. 2019;122:25–34. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.10.005>
11. Themistocleous K., Papoutsas C., Michaelides S., Hadjimitsis D. Investigating Detection of Floating Plastic Litter from Space Using Sentinel-2 Imagery. *Remote Sensing*. 2020;12(16):2648. <https://doi.org/10.3390/RS12162648>
12. Никитина А.В., Филина А.А. Математическое моделирование процессов эволюции микроорганизмов мелководного водоема в кислород-дефицитных условиях. В: *Труды международной научной конференции «Интеллектуальные информационные технологии и математическое моделирование»*. Ростов-на-Дону. 2022. С. 66–75.
- Nikitina A.V., Filina A.A. Mathematical modeling of the processes of evolution of microorganisms in a shallow reservoir in oxygen-deficient conditions. Intelligent information technologies and mathematical modeling. *Proceedings of the International Scientific Conference*. Edited by V.V. Dolgov. Rostov-on-Don. 2022:66–75. (In Russ.)
13. Четверушкин Б.Н. Пределы детализации и формулировка моделей уравнений сплошных сред. *Математическое моделирование*. 2012;24(11):33–52. <https://doi.org/10.1134/S2070048213030034>
- Chetverushkin B.N. Resolution limits of continuous media mode and their mathematical formulations. *Math Models Comput Simul*. 2013;5:266–279. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S2070048213030034>
14. Yakushev E.V., Mikhailovsky G.E. Mathematical modeling of the influence of marine biota on the carbon dioxide ocean-atmosphere exchange in high latitudes. *Air-Water Gas Transfer, Sel. Papers, Third Int. Symp., Heidelberg University*, ed. by B. Jaehne and E.C. Monahan. Hanau: AEON Verlag & Studio. 1995:37–48.
15. Haltrin V.I., Kattawar G.W. Self-consistent solutions to the equation of transfer with elastic and inelastic scattering in oceanic optics: I. Model. *Applied Optics*. 1993;32(27):5356–5367. <https://doi.org/10.1364/AO.32.005356>
16. Сухинов А.И., Проценко Е.А., Чистяков А.Е., Шретер С.А. Сравнение вычислительных эффективностей явной и неявной схем для задачи транспорта наносов в прибрежных водных системах. Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2015). *Труды международной научной конференции*. 2015;297–307.
- Sukhinov A.I., Protsenko E.A., Chistyakov A.E., Shreter S.A. Comparison of computational efficiencies of explicit and implicit schemes for the problem of sediment transport in coastal water systems. Parallel computing technologies (PaVT'2015). *Proceedings of the international scientific conference*. 2015; 297–307. (In Russ.)
17. Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Проценко Е.А. Построение дискретной двумерной математической модели транспорта наносов. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2011;8(121):32–44.
- Sukhinov A.I., Chistyakov A.E., Protsenko E.A. Construction of a discrete two-dimensional mathematical model of sediment transport. *Bulletin of SFedU. Engineering sciences*. 2011;8(121):32–44. (In Russ.)
18. Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Бондаренко Ю.С. Оценка погрешности решения уравнения диффузии на основе схем с весами. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2011;8(121):6–13.
- Sukhinov A.I., Chistyakov A.E., Bondarenko Yu.S. Estimation of the error in solving the diffusion equation based on schemes with weights. *Bulletin of SFedU. Engineering sciences*. 2011;8(121):6–13. (In Russ.)
19. Сухинов А.И., Белова Ю.В., Никитина А.В., Атаян А.М. Моделирование биогеохимических процессов в Азовском море с использованием статистически обработанных данных о речном стоке. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2020;20(4):437–445. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-4-437-445>
- Sukhinov A.I., Belova Y.V., Nikitina A.V., Atayan A.M. Modeling biogeochemical processes in the Azov Sea using statistically processed data on river flow. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2020;20(4):437–445. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-4-437-445>
20. Sukhinov A.I., Panasenko N.D. Comparative investigation of neural and locally binary algorithms for image identification of plankton populations. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2022;1(2):70–80. <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2022-1-2-70-80>
21. The official website of Earth observing system. URL: <http://eos.com/landviewer/account/pricing> (accessed: 01.02.2024).

Об авторах:

Юлия Валериевна Белова, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики и информатики Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID, yvbelova@yandex.ru](mailto:yvbelova@yandex.ru)

Алёна Александровна Филина, кандидат технических наук, научный сотрудник ООО «НИИ супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров» (347900, Российская Федерация, г. Таганрог, пер. Итальянский, 106), [ORCID, j.a.s.y@mail.ru](mailto:j.a.s.y@mail.ru)

Александр Евгеньевич Чистяков, доктор физико-математических наук, профессор кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID, cheese_05@mail.ru](mailto:cheese_05@mail.ru)

Заявленный вклад авторов:

Ю.В. Белова: программная реализация, визуализация и анализ расчетов.

А.А. Филина: численная и программная реализация, анализ результатов.

А.А. Чистяков: постановка задачи, разработка методов исследования.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Yulia V. Belova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of “Mathematics and Computer Science”, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](#), yvbelova@yandex.ru

Alena A. Filina, Candidate of Technical Sciences, Researcher of Super-Computers and Neurocomputers Research Center (106, Italiansky lane, Taganrog, 347900, Russian Federation), [ORCID](#), j.a.s.s.y@mail.ru

Alexander E. Chistyakov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of “Computer Engineering and Automated Systems Software”, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](#), cheese_05@mail.ru

Claimed Contributorship:

Yu.V. Belova: software implementation, visualization and analysis of calculations.

A.A. Filina: numerical and software implementation, analysis of results.

A.E. Chistyakov: problem statement, development of research methods.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 11.11.2024

Поступила после рецензирования / Revised 26.11.2024

Принята к публикации / Accepted 02.12.2024