

Полученные результаты свидетельствуют о том, что механизм стимуляции размножения за счет внутренней люминесценции является обоснованной гипотезой, объясняющей феномен «пятнистости» распределения фитопланктона в водных экосистемах – устойчивой диссипативной структуры в виде «пятен» повышенной концентрации фитопланктона.

Для подтверждения данной гипотезы требуются дополнительные натурные эксперименты и исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1977. – 656 с.
2. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. – М.: Наука, 1978. – 592 с.
3. Беляев В.И., Кондуфорова Н. В. Математическое моделирование экологических систем шельфа. – Киев: Наукова думка, 1990. – 240 с.
4. Сухинов А.И. Двумерные схемы расщепления и некоторые их приложения. – М.: МАКС Пресс, 2005. – 408 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д. ф.-м. н., профессор Г.В. Куповых.

Сухинов Александр Иванович

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: sukhinov@gmail.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634310599.

Руководитель ТТИ ЮФУ; д.ф.-м.н.; профессор.

Герасименко Лилия Владимировна

E-mail: gerasimenko.liliya@yandex.ru.

Тел.: 88634603916; +79045070406.

Кафедра высшей математики; студентка.

Sukhinov Alexander Ivanovich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: sukhinov@gmail.ru

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634310599.

The Head of TIT SFedU; Dr. of Phis.-Math. Sc.; Professor.

Gerasimenko Liliya Vladimirovna

E-mail: gerasimenko.liliya@yandex.ru.

Phone: +78634603916; +79045070406.

The Department of Higher Mathematics; student.

УДК 519.63:532.55

А.В. Никитина, К.А. Лозовская

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАНКТОНА И ПОПУЛЯЦИИ ПРОМЫСЛОВОЙ РЫБЫ ПЕЛЕНГАС

Предложена нелинейная пространственно-неоднородная 3D-модель взаимодействия планктона и популяции промысловой рыбы пеленгас. Для численного решения задачи использовались неявные конечно-разностные схемы второго порядка точности. Устойчи-

вость полученного решения задачи позволила проводить вычислительные эксперименты в широком диапазоне значений управляющих параметров при начальных и граничных условиях различного вида. С помощью построенной модели можно проводить оценку, анализ и прогнозирование экологического состояния мелководных водоемов.

Математическая модель; алгоритм; численное моделирование; Азовское море.

A.V. Nikitina, K.A. Lozovskaya

NUMERICAL MODELLING OF PROCESSES OF INTERACTION OF THE PLANKTON AND POPULATION OF FOOD FISH PELENGAS

Nonlinear spatially-non-uniform 3D-model of interaction of a plankton and food fish population pelengas are derived. The numerical solution of the models are obtained by using the second order accuracy (in space and time), centered, implicit finite difference scheme. The numerical solution is steady; it allows carrying out experiments with a wide range of initial and boundary conditions and values of managing parameters under initial and boundary conditions of a various kind. The estimation, the analysis and forecasting of an ecological condition of shallow reservoirs can be spent by means of the constructed model.

Mathematical model; taxis; algorithm; Numerical modeling; Azov Sea.

Цель работы заключалась в выполнении решения нелинейной пространственно-неоднородной 3D-задачи взаимодействия планктона и популяции промысловой рыбы пеленгас: “фитопланктон – зоопланктон – питательные вещества – детрит – рыба”, представляющей собой замкнутый бассейн, ограниченный невозмущенной поверхностью водоема Σ_0 , дном $\Sigma_H = \Sigma_H(x, y)$ и цилиндрической боковой поверхностью Σ для временного интервала $0 < t \leq T$ [1]:

$$\frac{\partial X}{\partial t} + \text{div}(\bar{U} \cdot X) = \mu_X \Delta X + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_X \frac{\partial X}{\partial z} \right) + \gamma_X \sigma_S X S - \delta_X X Z - \varepsilon_X X - \sigma_X X P,$$

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \text{div}(\bar{U} \cdot Z) = \mu_Z \Delta Z + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_Z \frac{\partial Z}{\partial z} \right) + \gamma_Z \delta_X X Z - \delta_Z Z - \varepsilon_Z Z,$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \text{div}(\bar{U} \cdot S) = \mu_S \Delta S + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_S \frac{\partial S}{\partial z} \right) + \gamma_S \varepsilon_D D - \sigma_S X S + B(S_P - S) + f, \quad (1)$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \text{div}(\bar{U} \cdot D) = \mu_D \Delta D + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_D \frac{\partial D}{\partial z} \right) + \varepsilon_X X + \varepsilon_Z Z + \varepsilon_P P - \beta_D D P - \varepsilon_D D,$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \text{div}(\bar{U} \cdot P) = \mu_P \Delta P + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_P \frac{\partial P}{\partial z} \right) + \gamma_P \beta_D D P + \xi_P \sigma_X X P - \varepsilon_P P - \delta_P P.$$

В системе (1) приняты следующие обозначения:

X, Z, S, D, P – концентрации фитопланктона (Coscinodiscus), зоопланктона (Copepoda), биогенного вещества (азота), детрита, пеленгаса;

$\gamma_X, \gamma_Z, \gamma_P$ – передаточные коэффициенты трофических функций;

γ_S – доля питательного вещества, находящегося в биомассе фитопланктона;

$\varepsilon_Z, \varepsilon_P$ – коэффициенты элиминации (смертности) Z, P соответственно;

ε_X – коэффициент, учитывающий смертность и метаболизм X ;

δ_X, δ_P – убыль фитопланктона и пеленгаса за счет выедания;

δ_Z – убыль зоопланктона за счет выедания рыбами;

S_P – предельно возможная концентрация биогенного вещества;

$f = f(t, x, y)$ – функция источника загрязнения;

B – удельная скорость поступления загрязняющего вещества;

ε_D – коэффициент разложения детрита;

β_D – скорость потребления органических остатков пеленгасом;

σ_X – коэффициент убыли фитопланктона в результате потребления его пеленгасом;

σ_S – коэффициент роста фитопланктона;

ξ_P – передаточный коэффициент роста концентрации пеленгаса за счет потребления фитопланктона;

$\mu_D, \mu_X, \mu_Z, \mu_S, \mu_P$ и $\nu_D, \nu_X, \nu_Z, \nu_S, \nu_P$ – диффузионные коэффициенты в горизонтальном и вертикальном направлениях для субстанций D, X, Z, S, P соответственно.

Зададим начальные условия:

$$\begin{aligned} X(x, y, z, 0) &= X_0(x, y, z), \quad Z(x, y, z, 0) = Z_0(x, y, z), \\ S(x, y, z, 0) &= S_0(x, y, z), \quad D(x, y, z, 0) = D_0(x, y, z), \\ P(x, y, z, 0) &= P_0(x, y, z), \quad (x, y, z) \in \bar{G}, t = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Граничные условия зададим в виде

$$\begin{aligned} X = Z = S = D = P &= 0 \text{ на } \sigma, \text{ если } U_n < 0; \\ \frac{\partial X}{\partial n} = \frac{\partial Z}{\partial n} = \frac{\partial S}{\partial n} = \frac{\partial D}{\partial n} = \frac{\partial P}{\partial n} &= 0 \text{ на } \sigma, \text{ если } U_n \geq 0; \\ \frac{\partial X}{\partial z} = -\varepsilon_1 X, \frac{\partial S}{\partial z} = -\varepsilon_2 S, \frac{\partial Z}{\partial z} = -\varepsilon_3 Z, \frac{\partial D}{\partial z} = -\varepsilon_4 D, \frac{\partial P}{\partial z} = -\varepsilon_5 P &\text{ на } \Sigma_H; \\ \frac{\partial X}{\partial z} = \frac{\partial Z}{\partial z} = \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial D}{\partial z} = \frac{\partial P}{\partial z} &= 0 \text{ на } \Sigma_0, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5$ – неотрицательные постоянные;

ε_1 – учитывает опускание водорослей на дно и их затопление;

ε_2 – учитывает поглощение биогенного вещества детритом;

$\varepsilon_3, \varepsilon_5$ – учитывает отмирание зоопланктона и пеленгаса соответственно;

ε_4 – учитывает опускание детрита на дно.

При исследовании модели (1)–(3) изучался ряд феноменов физического уровня [2]:

- ♦ пятнистость (несмотря на возмущения водной среды, распределение фитопланктона по водоему имеет структурированный характер. Существа с инстинктами (например, рыба пеленгас) двигаются в сторону градиента пищи, для фитопланктона все иначе);
- ♦ для фитопланктона выполняется модель сплошной среды (клетки фитопланктона присутствуют даже в самом малом объеме).

Разработанную модель можно представить в виде схемы, представленной на рис. 1.

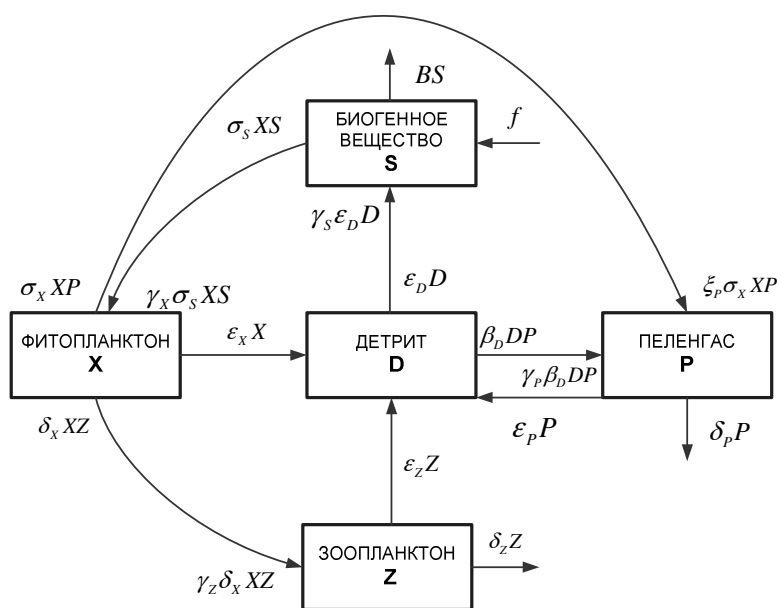


Рис. 1. Схема $X - Z - S - D - P$ -модели

В трехмерной задаче (1) – (3) учитывались процессы конвекции (перемещение субстанции за счет перемещения водной среды), микротурбулентной диффузии (движение за счет теплового движения частиц), реакции (рост, размножение и отмирание клеток планктона).

Численный алгоритм для решения задачи (1)–(3) был реализован на языке Visual Studio C++ [3]. Программа позволяет задавать структуру модели, описывающей динамику взаимодействия трофических сообществ в каждой точке расчетной области. Начальное распределение популяции пеленгаса и планктона было учтено в форме, соответствующей пространственно-временным масштабам моделируемых процессов. Реализованный алгоритм численного решения позволяет свободно варьировать граничные условия, вид управляющих функций и значения соответствующих параметров [4]. Понимание механизма функционирования системы и знание её основных характеристик позволили для преодоления трудностей при настройке программы использовать феноменологический подход. Эффективность такого подхода достаточно высока ещё и потому, что поведение системы часто определяется точностью не отдельных параметров, а их соотношений [5].

Ниже приведены диаграммы распределения концентраций субстанций D, P , демонстрирующие изменение их концентраций с определенной периодичностью в пространстве и во времени (рис. 2 и 3).

При настройке программы для расчетной области использовались следующие значения масштабирующих коэффициентов: $\xi_P = 0,8$; $f = 0,2$;
 $\alpha_S = 0,75$; $\gamma_X = 0,24$; $\gamma_S = 0,1$; $\gamma_Z = 0,95$; $\gamma_P = 10,75$; $\varepsilon_Z = 0,046$; $\varepsilon_X = 0,0000116$;
 $\varepsilon_P = 0,00116$; $\varepsilon_D = 0,000019$; $\sigma_X = 0,0289$; $\sigma_S = 0,15$; $\delta_X = 0,0289$; $\delta_Z = 0,0053$.

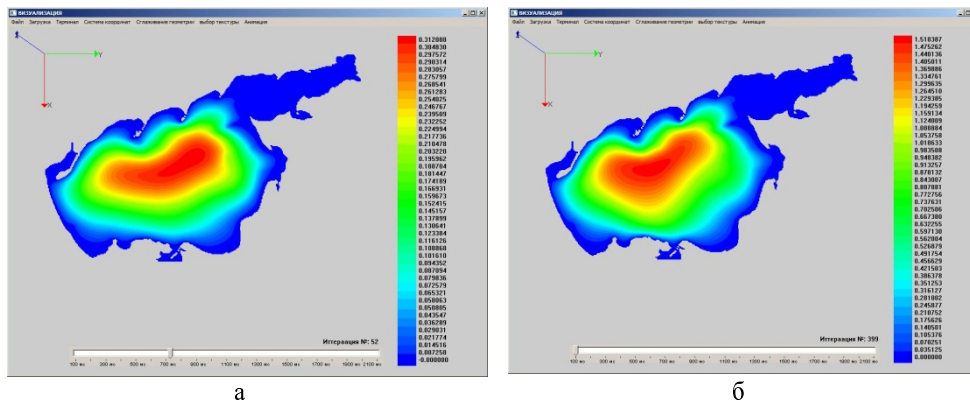


Рис. 2. Баротропное распределение концентрации пеленгаса в разные моменты времени (при северном ветре): а – $P_{\max} = 0,312088$, номер итерации $N = 52$;
 б – $P_{\max} = 1,510387$, номер итерации $N = 399$

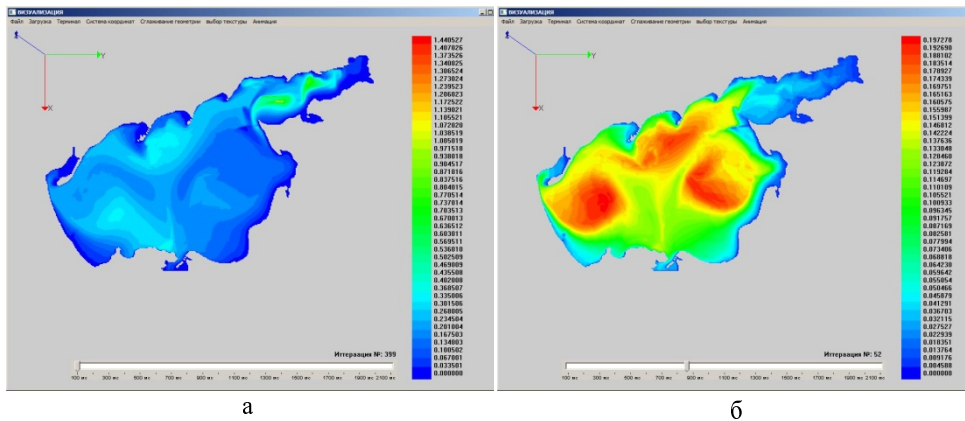


Рис. 3. Баротропное распределение концентрации детрита в разные моменты времени (при северном ветре): а – $D_{\max} = 0,197278$, номер итерации $N = 52$;
 б – $D_{\max} = 1,440527$, номер итерации $N = 399$

Анализ полученных результатов позволил сделать конкретные выводы о свойствах математической модели и возможностях управления качеством вод мелководных водоемов с помощью методов математического моделирования.

Математическая модель (1)–(3) адекватно отражает реальные экологические процессы на качественном уровне. На основе экспедиционных данных проведена калибровка и верификация модели, подобраны оптимальные значения параметров в нее входящих. Устойчивость полученного решения задачи позволяет проводить вычислительные эксперименты в широком диапазоне параметров при начальных и граничных условиях различного вида.

В соответствии с направленностью работы модель учитывает особенности размножения, стадийного развития организмов и различия в длительности их репродукционных циклов. Поэтому сдвиги по времени между изменениями биомасс фитопланктона, кормового зоопланктона и пеленгаса соответствуют реальным процессам, происходящим в мелководном водоеме. Учёт различий в удельной скорости увеличения биомассы организмов разных трофических уровней осложняется ещё и тем, что физиологические процессы чувствительны к изменениям внешних условий.

С помощью построенной модели можно провести оценку, анализ и прогнозирование экологического состояния мелководных водоемов. Она позволяет уменьшить затраты на натурные эксперименты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Никитина А.В.* Модели таксиса, стабилизирующие экологическую систему Таганрогского залива // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 7 (96). – С. 173-177.
2. *Никитина А.В.* Численное решение задачи динамики токсичных водорослей в Таганрогском заливе // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 6 (107). – С. 113-116.
3. *Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Алексеенко Е.В.* Численная реализация трехмерной модели гидродинамики для мелководных водоемов на супервычислительной системе // Математическое моделирование. – 2011. – Т. 23, № 3. – Р. 3-21.
4. *Чистяков А.Е.* Об аппроксимации граничных условий трехмерной модели движения водной среды // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 6 (107). – С. 66-77.
5. *Латун В.С.* Учет кормового таксиса хамсы в математической модели системы фитопланктон-зоопланктон-рыба // Морской экол. журнал – 2005. – № 4. – С. 49-60.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. В.А. Жорник.

Никитина Алла Валерьевна

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: nikitina.vm@gmail.com.

г. Таганрог, ул. Чехова, 38, кв. 3.

Тел.: +79515168538.

Кафедра высшей математики; заведующий кафедрой; к.ф.-м.н.; доцент.

Лозовская Ксения Александровна

E-mail: lozovskaya.ksenia@yandex.ru.

Тел.: +79185681733.

г. Таганрог, 12 переулок, д. 79.

Кафедра высшей математики.

Nikitina Alla Valer'evna

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: nikitina.vm@gmail.com.

Phone: +79515168538.

38, Chekhov Street, Apt. 3, Taganrog, Russia.

The Department of Higher Mathematics; the Head of Department; Cand. of Phis.-Math. Sc.; Associate Professor.

Lozovskaya Ksenia Alexandrovna
E-mail: lozovskaya.ksenia@yandex.ru
79, Lane 12, Taganrog, Russia.
Phone: +79185681733.
The Department of Higher Mathematics.

УДК 550.34

Н.Н. Скорбеж, Г.В. Куповых, А.В. Шаповалов

**О ВОЗМОЖНОМ ВЛИЯНИИ ВАРИАЦИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ
НА КЛИМАТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ И МЕЗОЦИРКУЛЯЦИЮ
В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ**

Проведен анализ влияния вариаций солнечной активности на процессы циркуляции нижних слоев атмосферы с помощью теоретической модели. Модель состоит из уравнений движения атмосферы с учетом турбулентности и сил Кориолиса. Построена зависимость индекса Блинновой от разности атмосферного давления на разных географических широтах. Атмосферное возмущение обусловлено уменьшением высот изобарических поверхностей на высокоширотной границе пояса Блинновой во время первой фазы, и их увеличением – во время второй фазы. Предложена гипотеза формирования локальных интенсивных вихрей (смерчей) в атмосфере.

Климат; мезоциркуляция; солнечная активность; атмосферные вихри; атмосферная циркуляция.

N.N. Skorbezh, G.V. Kupovykh, A.V. Shapovalov

**ABOUT POSSIBLE INFLUENCE OF THE SOLAR ACTIVITY VARIATIONS
ON CLIMATE FACTORS AND MESOCIRCULATION IN THE EARTH
ATMOSPHERE**

The influence of the solar activity variations on the circulation processes of the lower layers of the atmosphere using theoretical model is analyzed in this work. The model is consists of atmospheric dynamics equations with turbulence and Coriolis forces. The dependence of Blinova's index and atmospheric pressure difference on various geographic latitudes is developed. The atmospheric disturbance is depended on the decreasing of isobaric surfaces decreases on the high latitudes boundary of Blinova's loop during first phase and on its increasing - during the second phase. The hypothesis of local intensity vortex (whirlwind) forming in the atmosphere is suggested.

Climate; mesocirculation; solar activity; atmospheric vortex; atmospheric circulation.

В последние годы применительно к задачам солнечно-земной физики развивается известный подход, часто называемый синергетическим. Его основная идея состоит в том, что плазма в космических условиях должна обнаруживать свойства “самоорганизации” – упорядочения структуры течений, полей и т. п. При наблюдениях магнитных полей в атмосфере Солнца, например, такая тенденция действительно проявляется в виде иерархии взаимодействующих дискретных структур. Этот фундаментальной важности факт может служить объяснением, почему наша Земля и солнечно-земная среда в целом – сложно организованная природная система – устойчива.

В Северо-Кавказском регионе наибольший ущерб жизнедеятельности людей доставляют интенсивные атмосферные процессы, имеющие вихревую структуру (суперъячейковые градовые облака, ураганы, смерчи). В связи с этим необходимо