



УДК 519.876.5:574.583

Е. Ф. Васечкина, канд. физ.-мат. наук, с.н.с., **В. Д. Ярин**, канд. физ.-мат. наук, с.н.с.

Морской гидрофизический институт Национальной академии наук Украины, Севастополь, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГИПОКСИИ НА МЕЛКОВОДЬЕ

Имитируется ситуация развития гипоксии в период весенне-летнего прогрева на мелководье. Исследуется пространственно-временная динамика процесса. Используется объектно-ориентированная модель планктонного сообщества пелагиали, дополненная гидрохимическим блоком, который описывает циклы азота и серы в аэробных и анаэробных условиях. Гидродинамика системы описывается интегральной двухслойной моделью, учитывающей влияние атмосферной изменчивости на развитие процесса. Моделируется реакция живых компонентов системы на смену режима в нижнем слое с окислительного на восстановительный и обратно.

Ключевые слова: гипоксия, цикл азота и серы, аэробно-анаэробные условия, пространственная неоднородность планктона, объектно-ориентированное моделирование.

Основные факторы, вызывающие гипоксию на шельфе, известны и неоднократно обсуждались в многочисленных публикациях на эту тему, например [6, 7, 8]. Вкратце схема развития процесса такова. В весенне-летний период усиливающийся прогрев верхнего слоя приводит к повышению вертикальной устойчивости вод, формированию сезонного термоклина и ослаблению турбулентной диффузии и адвекции ниже слоя скачка. Приток избыточного количества биогенов с речным стоком приводит к бурному росту фитопланктона, отмершие клетки которого опускаются, скапливаясь в районе термоклина. На окисление органического вещества затрачивается все большее количество растворенного кислорода, а поскольку ниже термоклина, где в основном и происходит этот процесс, приток кислорода затруднен, начинается формироваться его недостаток. Дефицит кислорода обостряется в летний период безветрия и стагнации вод, окислительные условия у дна сменяются на восстановительные, появляется сероводород. Как следствие, развивается замор, в первую

очередь, придонной флоры и фауны. В результате массовой гибели организмов накапливается органическое вещество, подлежащее утилизации, ситуация усугубляется – область распространения сероводорода поднимается выше и может даже выйти на поверхность воды. И только приток кислорода вследствие усиления ветрового перемешивания в конце лета – начале осени приводит к смене условий на окислительные и постепенному восстановлению придонной флоры и фауны.

В настоящей работе предпринята попытка моделирования этой ситуации с целью изучения пространственно-временной динамики процесса. С помощью предлагаемой модели можно получить ответы на многие важные вопросы, например: где раньше всего появляется сероводород, при каких внешних условиях замор развивается; какие факторы препятствуют катастрофическому развитию ситуации; как зависит продолжительность восстановления флоры и фауны от тяжести и продолжительности замора и многие другие.

Предлагаемая модель представляет собой гибрид трех моделей, применявшихся ранее для решения других задач. Таким образом, модель состоит из трех блоков, которые условно можно обозначить как «гидрология», «гидрохимия» и «биология». Расчетная область представляет собой параллелепипед с постоянной высотой (глубиной бассейна). На боковых границах заданы условия периодичности. Гидрологический блок представлен двухслойной моделью, в которой верхний слой отождествляется со слоем ветрового перемешивания и ограничивается слоем скачка, переменным во времени и пространстве. При анализе динамических условий возникновения гипоксии и заморов было установлено, что в период летней стагнации адвективный перенос сильно ослаблен, что дает основание ограничиться турбулентным процессом обмена. Верхний слой получает поток импульса и тепла из атмосферы, через его верхнюю границу происходит газообмен. Турбулентное перемешивание ограничивается верхним слоем, толщина которого определяется потоками импульса и тепла на границе с атмосферой. При смене ветра стационарное состояние слоя устанавливается в течение одного шага по времени (квазистационарный ветровой режим). Для блока «гидрохимия» нами использована модель [9], разработанная для условий редокс-зоны Черного моря. Это связано с тем, что процессы, происходящие на шельфе во время развития заморов, аналогичны процессам в переходной зоне [5]. Переменными блока являются концентрации органических и неорганических соединений азота, кислород, соединения серы в верхнем и нижнем слоях. Блок «биология» представлен объектно-ориентированной моделью [3, 4], трансформированной и дополненной, в соответствии с условиями задачи, описанием и учетом объектов придонной флоры. Рассмотрим содержание каждого из блоков более подробно.

Описание модели. Блок «Гидрология». Используемая двухслойная гидродинамическая

модель представляет собой упрощенный вариант интегральной модели верхнего слоя Черного моря [2]. Принятые упрощения сводятся к тому, что нижний слой предполагается однородным по плотности, т.е. потоки тепла и пассивной субстанции из верхнего слоя практически мгновенно распространяются на всю его толщину. Такое упрощение обуславливается его малой толщиной – глубина моделируемого участка шельфа задается равной 30 м. Модель описывает пространственно-временную динамику температуры (T^0) и глубины (h) верхнего перемешанного слоя и температуры нижнего слоя (T^h). Поскольку масштаб пространственной изменчивости полей ветра и температуры воздуха над морем (особенно в летний период) превышает размер расчетной области (5 x 5 км), в настоящих расчетах пространственная динамика T^0 , h , T^h не учитывалась и использовался одномерный вариант модели:

$$\frac{dT^0}{dt} = \Gamma^0 - \Gamma^{h-0}, \quad \Gamma^0 = a(T^0 - T^a), \quad (1)$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{T^0 - T^h} (\Gamma^{h-0} - \Gamma^{h+0}), \quad (2)$$

$$G - D = 0.5\alpha gh\rho_w (\Gamma^0 + \Gamma^{h-0}), \quad (3)$$

$$G = C_g V_*^3, \quad D = \rho_*^3 \left(f \left(\frac{h}{L_1} \right) + \frac{a_2 h}{L_1 |N|} \right), \quad f \left(\frac{h}{L_1} \right) = \begin{cases} \frac{a_1 h}{L_1} & \text{при } h \leq \frac{C_g}{a_1} L_1 \\ C_g & \text{при } h > \frac{C_g}{a_1} L_1 \end{cases}, \quad (4)$$

где Γ^0 – поток тепла через поверхность; Γ^{h-0} и Γ^{h+0} – потоки тепла на нижней границе перемешанного слоя и верхней границе нижнего слоя соответственно; T^a – температура воздуха; α – коэффициент термического расширения воды; ρ_w – плотность воды; G , D – интегральные генерация и диссипация энергии

турбулентности; $V_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho_w}}$ - динамическая

скорость трения в воде; τ_0 - напряжение трения ветра на поверхности; L - масштаб длины Мони́на - Обухова; L_1 - масштаб толщины пограничного слоя; $N = L/L_1$ - безразмерный параметр стратификации Казанского - Мони́на; C_g, a, a_1, a_2 - эмпирические коэффициенты.

Для замыкания системы уравнений (1 - 3) предполагалось, что при вовлечении ($dh/dt > 0$) поток тепла на верхней границе термоклина

Γ^{h+0} равен нулю, а при обратном процессе ($dh/dt < 0$) полагался равным нулю поток на нижней границе перемешанного слоя Γ^{h-0} . В результате система распадается на две системы уравнений, соответствующие двум режимам динамики верхнего слоя, переход от одного режима к другому осуществляется по условию, следующему из уравнения (3). Вовлечение идет если $G - D - 0,5\rho_w\alpha gh\Gamma^0 > 0$ (рис. 1а). Если же это условие не выполняется, то наблюдается обратный процесс - антивовлечение (рис. 1б).

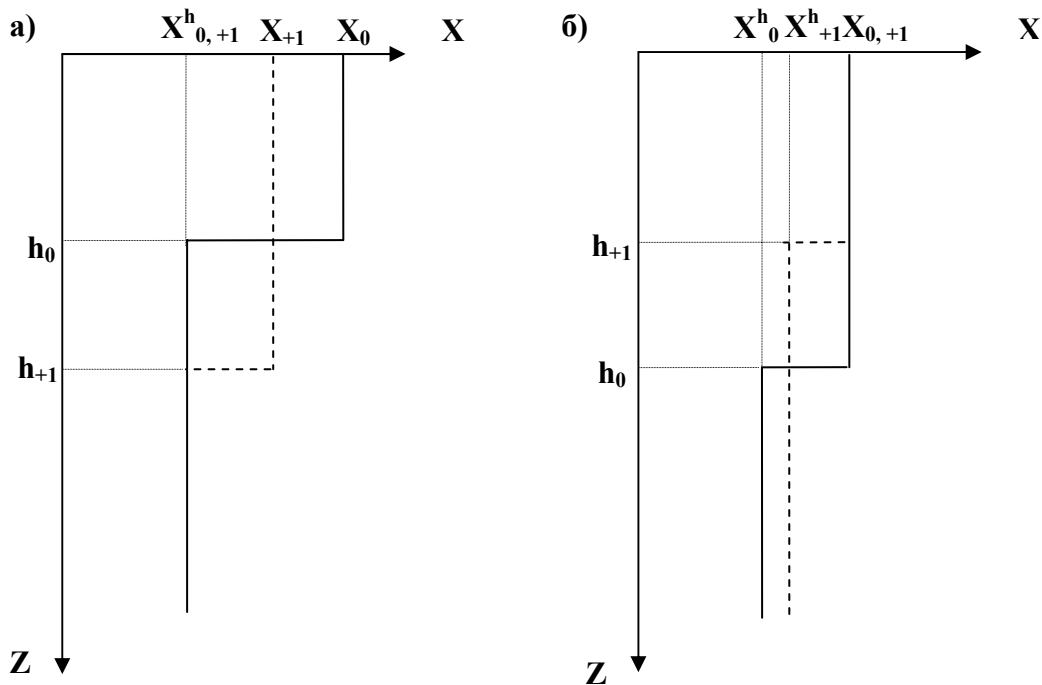


Рис. 1 Схематическое изображение изменения гидрохимических характеристик X модели при режимах вовлечения (а) и антивовлечения (б). Сплошной линией обозначен профиль некой характеристики в момент времени $t = t_0$, пунктирной - в момент времени $t = t_{+1}$. X_0, X_{+1} - значения характеристики в верхнем слое на шаге «0» и «+1» соответственно; X_0^h, X_{+1}^h - то же самое для нижнего слоя.

Fig. 1 Schematic representation of changes of simulated hydrochemical characteristics X during entrainment (a) and detrainment (б) regimes. The continuous line indicates a profile of a characteristic at the moment $t = t_0$, dotted line - at the moment $t = t_{+1}$. X_0, X_{+1} - values of an upper layer characteristic at t_0 and t_{+1} accordingly; X_0^h, X_{+1}^h - the same for the bottom layer.

При вовлечении часть водной массы нижнего слоя попадает в верхний слой, в результате чего его характеристики меняются, а значения соответствующих характеристик нижнего слоя остаются неизменными. При ан-

тивовлечении происходит симметричный процесс в нижнем слое, и в этом случае термоклин не влияет на характеристики перемешанного слоя. Однако в результате газо- и теплообмена через поверхность температура и содержание

кислорода в верхнем слое могут измениться. Таким образом, двухслойная модель с переменным во времени верхним слоем вносит дополнительное слагаемое в уравнения для гидрхимических переменных:

$$\frac{dX_i}{dt} = K_x \nabla^2 X_i + F_i + A_i + \frac{dh}{h} (X_i^h - X_i)$$

для верхнего слоя, (5)

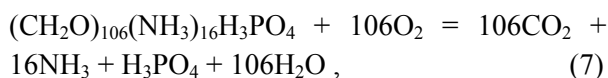
$$\frac{dX_i^h}{dt} = K_x \nabla^2 X_i^h + F_i + A_i + \frac{dh}{H-h} (X_i^h - X_i)$$

для нижнего слоя. (6)

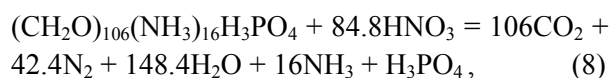
$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

Здесь F_i , A_i – функции источников (стоков), определяемые химическими и биологическими процессами соответственно; dh – изменение глубины перемешанного слоя в течение одного шага по времени; H – глубина бассейна; K_x – коэффициент горизонтальной диффузии.

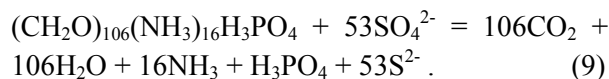
Блок «Гидрохимия». Для задания функций F_i в уравнениях (5, 6) была использована химико-биологическая модель, совместно описывающая циклы азота и серы в аэробно-анаэробных условиях и разработанная для моделирования процессов в редокс-зоне Черного моря [9]. В модели рассчитывались следующие переменные: взвешенный и растворенный органический азот (PON , DON), аммоний (NH_4), нитриты (NO_2), нитраты (NO_3), сероводород (H_2S), элементарная сера (S^0), тиосульфаты ($S_2O_3^{2-}$), сульфаты (SO_4^{2-}), кислород (O_2). Схематично суть происходящих процессов превращения аэробных условий в анаэробные можно изложить следующим образом. Окисление органического вещества происходит в аэробных условиях за счет кислорода:



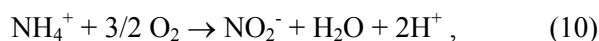
при исчерпании кислорода – за счет нитратов (нитратредукция):



а при исчерпании нитратов – за счет сульфатов с образованием собственно сероводорода (сульфатредукция):



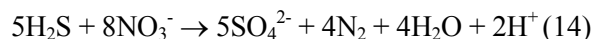
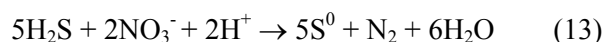
В присутствии кислорода и с его участием происходят реакции двух стадий нитрификации:



а также окисления сероводорода:



Окисление сероводорода может осуществляться также за счет нитратов (процесс бактериальной тиоденитрификации):



Таким образом в модели описываются процессы аммонификации, нитрификации, нитратредукции, тиоденитрификации, окисления сероводорода и сульфатредукции. Ассимиляции аммония автотрофными микроорганизмами (интенсивность хемосинтеза в единицах азота) задается с помощью эмпирического соотношения. На рис. 2 представлена схема трансформации соединений азота и серы, составленная согласно описанным химико-биологическим процессам.

Скорости протекания процессов зависят от концентрации растворенного кислорода и нитратов (рис. 3).

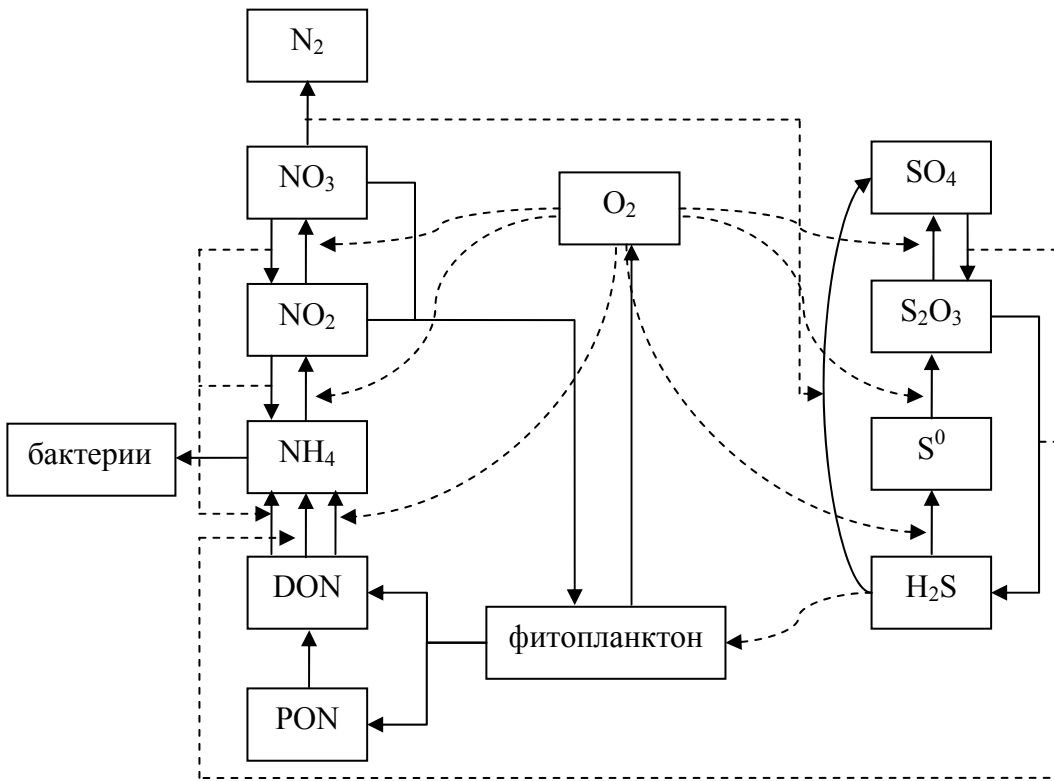


Рис. 2 Принятая в модели схема трансформации соединений азота и серы

Fig. 2 Diagrammatic representation of nitrogen and sulfur transformation processes simulated

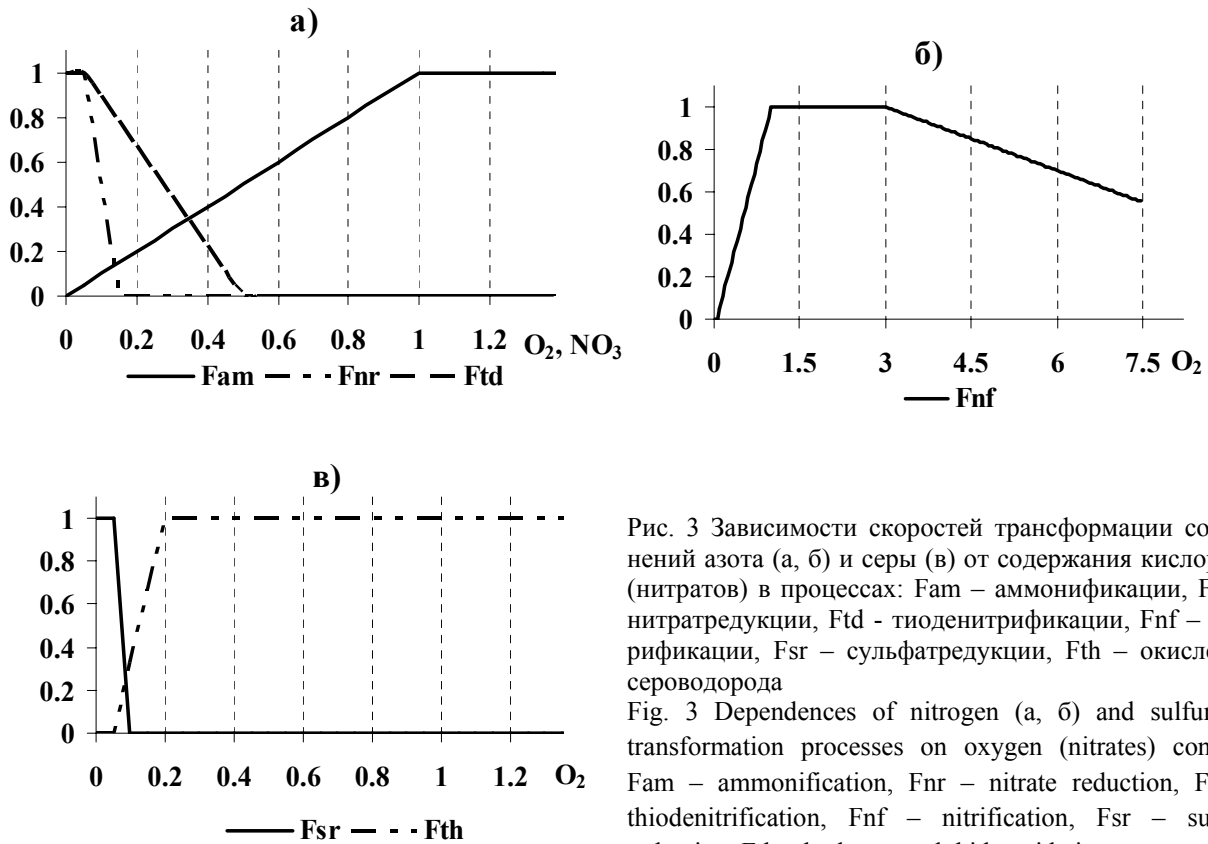


Рис. 3 Зависимости скоростей трансформации соединений азота (а, б) и серы (в) от содержания кислорода (нитратов) в процессах: Fam – аммонификации, Fnr – нитратредукции, Ftd - тиоденитрификации, Fnf – нитрификации, Fsr – сульфатредукции, Fth – окисления сероводорода

Fig. 3 Dependences of nitrogen (а, б) and sulfur (в) transformation processes on oxygen (nitrates) content: Fam – ammonification, Fnr – nitrate reduction, Ftd – thiodenitrification, Fnf – nitrification, Fsr – sulfate reduction, Fth – hydrogen sulphide oxidation

Эти зависимости, нормированные и приведенные к интервалу [0 1], характеризовали степень активности соответствующей группы бактерий при данной концентрации кислорода (нитратов). Детальное описание функций источников и стоков F_i в (5, 6), соответствующих химическим реакциям (7 – 14), и список стехиометрических констант и эмпирических коэффициентов можно найти в [9].

Блок «Биология». В основу положена объектно-ориентированная модель (ОМ), разработанная ранее для описания динамики планктонного сообщества [3], модифицированная в соответствии со спецификой данной задачи следующим образом.

1. Фитопланктон теперь представлен в модели не отдельными объектами, а непрерывной функцией, задаваемой в виде массива чисел, представляющих собой плотность биомассы поля в узлах регулярной сетки. Такое изменение связано с тем, что в ходе численных экспериментов по изучению особенностей пространственной изменчивости полей фитопланктона и зоопланктона [4] выяснилось, что фитопланктон не образует таких плотных скоплений, как зоопланктон – поля биомассы фитопланктона значительно более гладкие, чем поля биомассы зоопланктона. Представление фитопланктона в виде массива чисел к тому же упрощает модель и позволяет существенно экономить время счета.

2. Из объектов, описывающих жизнедеятельность планктонных организмов, в ОМ присутствуют объекты только двух видов: фитофаги и более крупный хищный зоопланктон.

3. Для учета влияния придонной флоры на процесс развития гипоксии в модель добавлен новый тип объектов – макрофиты. Эти объекты целиком находятся в нижнем слое, «прикреплены ко дну». Они также представляют собой цилиндры, причем высота цилиндра не меняется со временем. По мере роста биомассы объекта увеличивается только его радиус. Процессы фотосинтеза, ассимиляции биогенов, дыхания, выделения макрофитов

параметризуются по аналогии с фитопланктоном, скорости процессов взяты из [10], где они оценены по натурным данным.

4. Поскольку расчетная область разделена теперь на два однородных по вертикали слоя, объекты, представляющие собой ближайшее жизненное пространство для группы организмов, черпают пищевые ресурсы из неоднородной по вертикали среды, т.к. их вертикальный размер совпадает с глубиной водоема. Поля фитопланктона, органического вещества и всех прочих гидрохимических переменных модели рассчитываются отдельно для верхнего и нижнего слоев. Результирующая «эффективная биомасса», которая может быть использована на рост планктона, рассчитывается с учетом текущего положения границы между двумя слоями. В той же пропорции, соответствующей соотношению между толщинами двух слоев, окружающая среда получает вещества, выделяемые в результате жизнедеятельности планктонных организмов.

5. Концентрация сероводорода влияет на смертность всех растительных и животных элементов системы, увеличивая ее согласно соотношениям:

$$m'_i = m_i B_i \left(1 + \frac{[H_2S]}{0.005} \right),$$

для фитопланктона и макрофитов (15)

$$m'_i = m_i \left(10 \frac{[O_2]_m}{9[H_2S] + [O_2]_m} \right),$$

для зоопланктона

где m_i – коэффициент смертности i -го живого элемента системы в нормальных аэробных условиях; B_i – его биомасса; $[H_2S]$ и $[O_2]$ – концентрация сероводорода и кислорода соответственно; $[O_2]_m$ – минимально допустимая концентрация кислорода, ниже которой животные начинают чувствовать кислородное голодание.

6. Увеличение концентрации растворенного кислорода в результате фотосинтеза и его потребление планктонными организмами учитывается в настоящем варианте модели в яв-

ном виде. Вместе со слагаемыми, которые описывают затраты кислорода в ходе химических реакций, эти источники и стоки определяют результирующее значение концентрации кислорода в верхнем и нижнем слоях. Газообмен через поверхность учитывается с помощью выражения [1]:

$$Q = \beta([O_2] - [O_2^H]), \quad [O_2^H] = 9,2 - 0,407(T^0)^{0,685},$$

$$\beta = 2,65 + 2,25 \cos(\pi(t - 135)/183),$$
(16)

где $[O_2^H]$ – насыщающее значение концентрации кислорода, зависящее от температуры верхнего слоя. В том случае, если концентрация кислорода в нижнем слое превышает свое насыщающее значение при температуре нижнего слоя, считается, что избыточный кислород переходит в газообразное состояние и поднимается к поверхности воды в виде пузырьков.

Функции биологических источников (стоков) A_i в уравнениях (5, 6) рассчитывались, исходя из интегральных величин, полученных как результат агрегирования функций выделения (изъятия) кислорода и органических и неорганических соединений азота объектами ООМ.

Таким образом, уравнения вида (5, 6) были составлены для каждого из компонентов гидрохимической модели, перечисленных выше. Уравнения решались численно на сетке 60×60 с шагом по горизонтали $\Delta x = \Delta y = 50$ м, шаг по времени 0.25 сут. Использовалась явная схема с центральными разностями, коэффициент горизонтальной диффузии $K_x = \Delta x^2/10\Delta t$. Концентрации гидрохимических компонентов изменялись, управляемые процессами, происходящими в верхнем и нижнем слоях, обмен между слоями осуществлялся в зависимости от атмосферных условий. Помимо этого механизма обмена было задано опускание образующегося в верхнем слое детрита в нижний слой. Скорость опускания варьировалась, и как показали эксперименты, этот фактор оказывает заметное влияние на скорость развития гипок-

сии в нижнем слое. В расчетах, приведенных ниже, скорость опускания была задана 2 м/сут.

Анализ результатов численных экспериментов. Для изучения условий возникновения гипоксии и особенностей ее распространения были выполнены следующие эксперименты. Имитировался весенне-летний прогрев верхнего слоя и начало формирования сезонного скачка плотности. В качестве внешних управляющих воздействий были заданы: динамическая скорость трения в воде (среднее 0.6 см/с), температура воздуха (среднее значение увеличивается с 15 до 25°C) и интенсивность солнечной радиации в зоне ФАР (среднее значение 250 Вт/м², амплитуда суточных колебаний 200 Вт/м²). Учитывался суточный ход атмосферных параметров.

В начальный момент были заданы случайное распределение объектов, принадлежащих классам фитофагов и хищного зоопланктона, с минимальной начальной биомассой, однородные поля фитопланктона и всех химических веществ, рассчитываемых в модели (для верхнего и нижнего слоев). Сероводород в начальный момент отсутствовал как в верхнем, так и в нижнем слоях. Объекты класса макрофитов были сосредоточены в двух компактных областях, на всей остальной площади эти объекты отсутствовали. Для объектов шаг по времени был выбран равным одним суткам и для гидродинамической и гидрохимической моделей – одной четверти суток. Это связано с разными временными масштабами изменчивости элементов системы. Сравнивались варианты расчетов с постоянным и переменным ветром, с суточным ходом температуры воздуха и без его учета.

Рис. 4 иллюстрирует динамику характеристик верхнего слоя для двух вариантов расчетов: постоянный и меняющийся ветер.

Было установлено, что, как и следовало ожидать, определяющим условием возникновения гипоксии является отсутствие должной вентиляции нижнего слоя. При переменном ветре и ощутимых колебаниях температуры

воздуха граница запирающего слоя колеблется с достаточной амплитудой, что приводит к постоянной подкачке кислорода в нижний слой, повышению его температуры и увеличению первичной продукции фитопланктона в нем.

При стационарном положении слоя скачка ниже его со временем развивается гипоксия и появляется сероводород, который быстро распространяется по всей расчетной области.

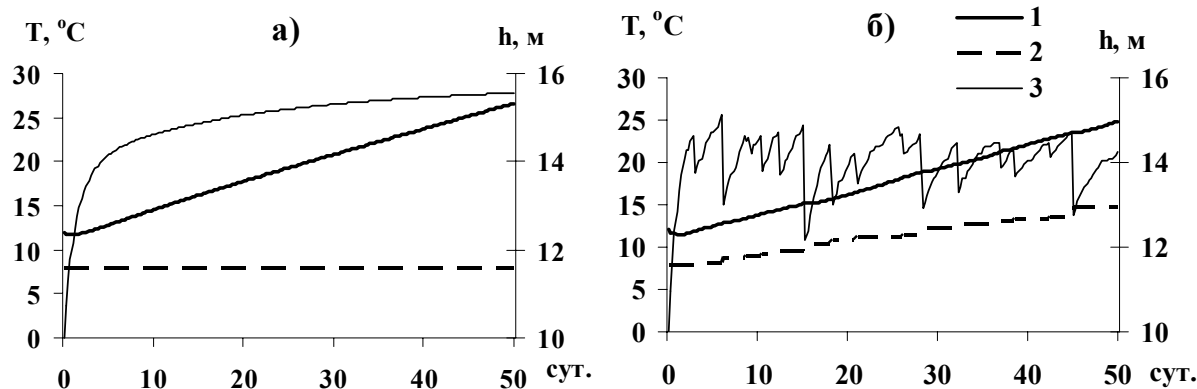


Рис. 4 Динамика характеристик верхнего слоя при постоянном (а) и переменном (б) ветре. 1 - температура верхнего слоя T^0 ; 2 - температура нижнего слоя T^h ; 3 - толщина верхнего слоя h
 Fig. 4 Dynamics of upper layer characteristics under steady (a) and variable (б) wind. 1 - temperature of the upper layer T^0 ; 2 - temperature of the bottom layer T^h ; 3 - thickness of the upper layer

На рис. 5 показаны средние по расчетной области биохимические характеристики верхнего и нижнего слоев, рассчитанные для случая слабого постоянного ветра и, соответственно, неизменной во времени глубины перемешанного слоя. Начальные условия эксперимента: концентрации $[\text{NO}_3]$ – 1 мкг-ат/л, $[\text{NO}_2]$ – 1 мкг-ат /л, $[\text{NH}_4]$ – 0.5 мкг-ат /л, $[\text{O}_2]$ – 4 мл/л в верхнем слое и 1 мл/л в нижнем, PON – 5 мкг-ат /л, DON – 5 мкг-ат /л, $[\text{SO}_4]$ – 1.4 г/л, сероводорода и соединений серы кроме SO_4 – нулевые. Плотность биомассы фитопланктона – 200 мг/м³, средние начальные плотности биомассы объектов зоопланктона – 80 мг/м³, объектов макрофитов – 2.5 г/м³. Время счета – 50 сут.

Рассмотрим более подробно, как происходит распространение очага сероводородного загрязнения по расчетной области. Момент первого появления сероводорода зависит от заданных максимальных скоростей роста фитопланктона и запаса биогенов. По мере затемнения нижнего слоя клетками фитопланк-

тона в верхнем слое, первичная продукция в нижнем слое снижается. Соответственно, выделяется все меньшее количество кислорода в результате фотосинтеза. Кислород тратится на дыхание планктонных организмов и биохимическое окисление органического вещества, в избытке образующегося в результате отмирания растительных клеток и организмов. При снижении плотности биомассы фитопланктона в нижнем слое ниже 3 мг/м³ в одной или нескольких точках области возникают следы сероводорода, концентрация которого быстро нарастает. Точки зарождения анаэробного режима однозначно связаны с минимальными концентрациями плотности биомассы фитопланктона в нижнем слое. Сероводород распространяется по площадке, огибая области, занятые макрофитами (рис. 6).

При достаточной кучности (плотности произрастания) макрофитов эти области могут долгое время оставаться чистыми от сероводорода. Планктонные организмы еще до появления следов сероводорода начинают

испытывать кислородный голод, их смертность повышается в соответствии с выражением (15), в результате количество разлагающегося органического вещества нарастает. Растительные

клетки фитопланктона и придонная флора начинают ощущать дискомфорт после появления сероводорода, их смертность также повышается (15).

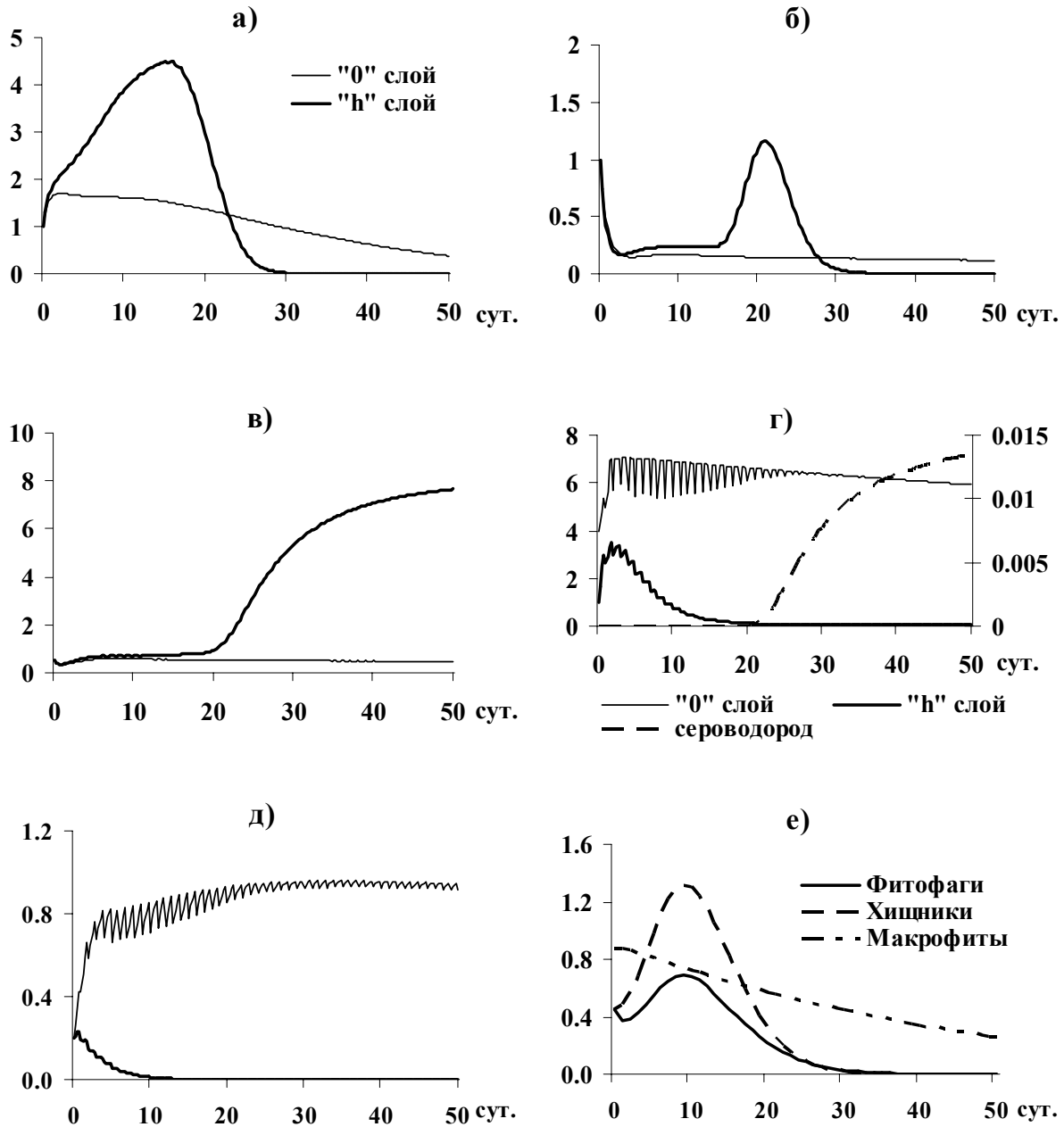


Рис. 5 Изменения во времени средних по расчетной области концентраций: а) – нитратов (мкг-ат /л); б) – нитритов (мкг-ат /л); в) – аммония (мкг-ат /л); г) – растворенного кислорода (мл/л) и сероводорода (мг/л); д) – биомассы фитопланктона (г/м³); е) – биомассы планктона и макрофитов (г/м³). Везде, где не обозначено, сплошная тонкая линия соответствует верхнему слою, толстая - нижнему.

Fig. 5 Time changes of averaged on designed area concentrations of: а) nitrates (mcg/l); б) nitrites (mcg/l); в) ammonium (mcg/l); г) dissolved oxygen (ml/l) and hydrogen sulphide (mg/l); д) phytoplankton biomass (g/m³); е) zooplankton biomass and macrophytes (g/m³). Everywhere, where it is not indicated, the continuous thin line corresponds to the upper layer, the thick line – to the bottom layer.

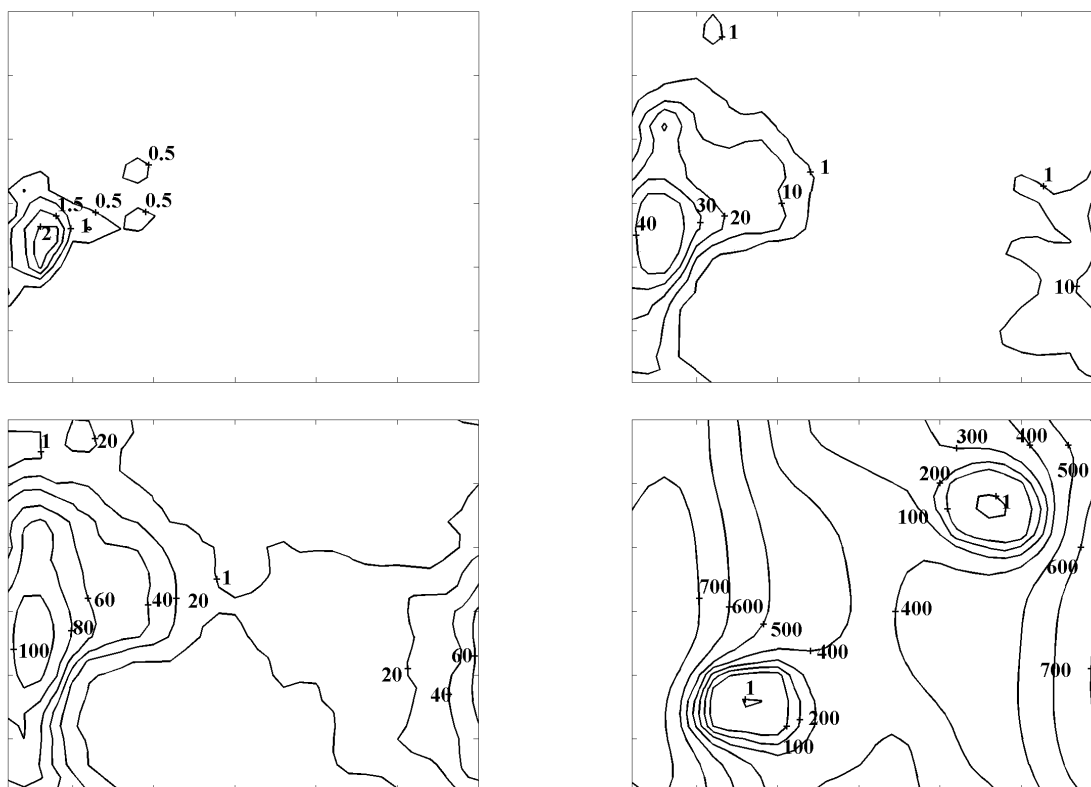


Рис. 6 Последовательные «кадры» распространения сероводорода (изолинии $[H_2S] \cdot 10^{-5}$ мг/л, дискретность 1.5 сут) в нижнем слое расчетной области. В левом нижнем и правом верхнем углах площадки расположены скопления объектов класса макрофитов. Концентрация сероводорода в этих областях близка к нулю, максимум $[H_2S]$ к концу расчетного времени составляет 0.018 мг/л.

Fig. 6 Consequent frames of hydrogen sulphide distribution (isolines of $[H_2S] \cdot 10^{-5}$ mg/l, time step is 1.5 days) inside the bottom layer of designed area. Agglomerations of macrophyt objects are located in the left bottom and right top corners of the area. Concentration of hydrogen sulphide in these locations is close to zero, maximum $[H_2S]$ makes 0.018 mg/l to the end of calculation time.

На окисление органики расходуется кислород нитратов, а после их исчерпания – сульфаты, начинается процесс сульфатредукции. Какое-то время эти процессы протекают параллельно (переходный период), затем полностью устанавливаются анаэробные (восстановительные) условия. Сероводород заполняет всю область, кроме областей, где фотосинтетическая деятельность макрофитов продолжает поддерживать аэробный режим. В верхнем слое также наблюдаются следы сероводорода, который возникает в темное время суток, но в дневное время он быстро окисляется. Суточный ход сказывается на динамике гидрохимических характеристик нижнего слоя – отсутст-

вие фотосинтетической деятельности макрофитов в темное время суток приводит к тому, что область сероводорода расширяется «ночью» и сжимается «днем».

В следующем эксперименте расположение объектов класса макрофитов было задано так, что они заполняли всю расчетную область. Координаты объектов выбирались случайным образом, среднее расстояние между двумя объектами составляло примерно 50 м при начальном радиусе объектов 2 м. В остальном все начальные и внешние условия эксперимента оставались неизменными: постоянный слабый ветер и отсутствие дополнительного притока биогенов. Суммарная био-

масса макрофитов в начальный момент по сравнению с предыдущим расчетом не изменилась, но была более-менее равномерно распределена по расчетной области. Несмотря на то, что макрофиты, вследствие своей фотосинтетической деятельности являются по сути дополнительными источниками кислорода, сероводород в системе появляется не намного позже, чем в расчете с отсутствием придонной растительности. Впервые он появляется в местах, где отсутствуют объекты макрофитов, но быстро заполняет всю расчетную область и к концу расчетного времени достигает средней концентрации 0.016 мг/л. Таким образом, только участки придонной растительности достаточной мощности способны противостоять распространению сероводорода. В данном случае плотность биомассы придонной растительности не достигала и 100 мг/м². В расчетах, где объекты макрофитов располагались компактно, но плотность биомассы была ниже 2 – 3 г/м², фронт распространения сероводорода легко «сминал» очаги сопротивления установлению анаэробного режима.

При дополнительной подпитке системы биогенами ситуация развивается ускоренными темпами. Скорость появления первых признаков сероводорода и распространения его на всю область зависит от интенсивности источника. Например, при поступлении в систему дополнительных 60 мкг-ат N/сут, что составляет примерно 0.5 % общего запаса азотных соединений в системе, сероводород появляется

на 10 сут. расчетного времени в то время как в расчете без дополнительного притока – на 20 сут. Дополнительный приток биогенов при активной вентиляции нижнего слоя не приводит к появлению сероводорода и смене окислительных условий на восстановительные.

Представляется интересным факт, что в некоторых имитационных экспериментах более чувствительным к гипоксии оказывался хищный зоопланктон (отличающийся от фитофагов большим весом организмов и пищевыми предпочтениями), хотя функции и коэффициенты, с помощью которых задавалось кислородное голодание (15), были одинаковыми для тех и других. Первыми из системы исчезали объекты, содержащие более крупные планктонные организмы. В это время количество объектов, имитирующих фитофагов, снижалось на 60 – 80 %. В дальнейшем их количество продолжало уменьшаться, но все же части объектов удавалось сохраниться, и они давали рост популяции после восстановления аэробных условий, которое происходило в результате начала перемешивания слоев. Сохранившиеся объекты находились в областях расположения придонной растительности. Этот процесс иллюстрирует рис. 7, на котором показаны поля биомассы фитофагов в периоды стагнации вод и сероводородного загрязнения и через 10 сут. после начала ветрового перемешивания.

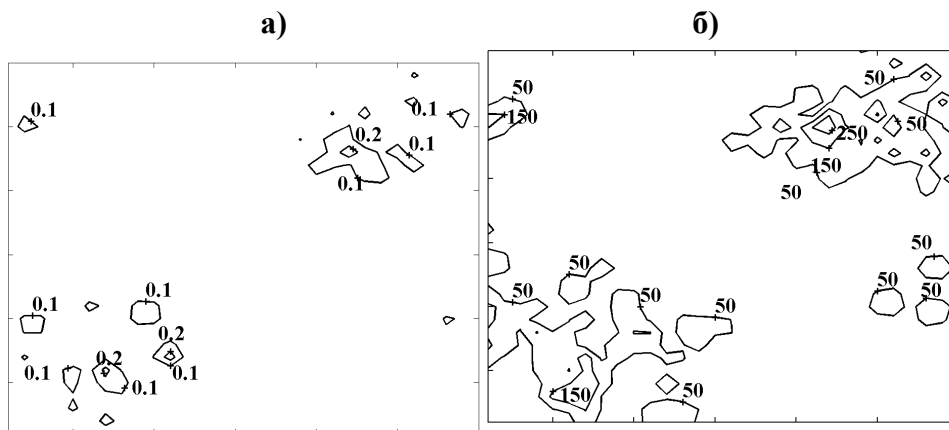


Рис. 7 Поля биомассы фитофагов (мг/м³): а) в период сероводородного загрязнения вод; б) через 10 сут. после начала ветрового перемешивания
 Fig. 7 Fields of phytophags biomass (mg/m³): a) during hydrosulphuric pollution of waters; б) 10 days after the beginning of wind mixing

Причины такой несимметричности поведения более мелких и более крупных планктонных организмов пока не совсем ясны, но возможно, одним из факторов является то, что к моменту возникновения дефицита кислорода фитофаги образовывали более плотные скопления, чем хищный зоопланктон, индекс Ллойда для фитофагов был равен 7.7, а для более крупного зоопланктона – 5.3. Можно предположить, что снижение интенсивности физиологических функций в скоплении позволяло мелким организмам дольше выдерживать неблагоприятные условия существования.

Выводы. Основные выводы, полученные в настоящей работе, сводятся к тому, что главным фактором развития гипоксии на мелководье является отсутствие ветрового перемешивания. Приток насыщенных биогенами вод является катализатором процесса и приводит к более быстрому его развитию. Место первичного возникновения сероводорода связано с минимумом поля фитопланктона в нижнем слое и не совпадает с точкой стока загрязненных вод. Определенно можно сказать, что сероводород первично возникает в месте, где отсутствует придонная растительность. Распространение сероводорода по окрестности зависит от расположения скоплений макрофитов – эти области могут долгое время сохранять локальный кислородный режим при общем сероводородном загрязнении. Быстрее и

легче сероводород распространяется по территории, свободной от придонной растительности. Таковыми могут быть области, не успевшие достаточно восстановиться после предыдущего замора, т.е. не имеющие достаточной мощности биомассы, чтобы противостоять фронту сероводорода. Таким образом, можно провести параллель между распространением лесных пожаров на суше и заморных явлений на мелководье.

В заключение еще раз отметим, что использование объектно-ориентированного подхода является весьма перспективным направлением в моделировании экосистем, поскольку, с одной стороны, позволяет более корректно, на организменном уровне, задавать описание основных биологических функций, а с другой, изучать пространственно-временную динамику сложной системы, являющейся интегральным откликом большого числа компонентов экосистемы, распределенных по расчетной области. Имитационное моделирование позволяет детально изучать поведение различных подсистем общей экосистемы при различных внешних воздействиях и заданных сценариях развития экологической ситуации, что существенным образом улучшает понимание сути движущих механизмов системы. Проведенные исследования с использованием многочисленных имитационных экспериментов подтверждают этот вывод.

1. *Беляев В. И., Жаров Н. А., Давыдова Е. П.* Расчет годового хода компонент экосистемы шельфа // Системный анализ и моделирование процессов на шельфе. – Севастополь, 1983. – С. 29 – 36.
2. *Васечкина Е. Ф.* Интегральная модель деятельного слоя Черного моря. // Морск. гидрофиз. журн. – 1985. – № 6. – С. 23 – 29.
3. *Васечкина Е. Ф., Ярин В. Д.* Объектно-ориентированная модель функционирования планктонного сообщества шельфа. // Морск. гидрофиз. журн. – 2004. – № 6. – С. 43 – 61.
4. *Васечкина Е. Ф., Ярин В. Д.* Затраты на энергетический обмен как один из факторов

- формирования пространственной неоднородности распределения планктона. // Морск. экол. журн. – 2005. – 4, №2. – С. 39 – 50.
5. *Дебольская Е. И., Якушев Е. В.* Моделирование формирования заморы и анаэробных условий в водных экосистемах. // Наука Кубани. – 2000. – № 4. – С. 19 – 35.
6. *Иванов В. А., Кубряков А. И., Лобарцева С. Н., Михайлова Э. Н., Шапиро Н. Б.* Моделирование некоторых особенностей гидрологических и экологических ситуаций в районе о. Змеиный. // Природные условия взморья реки Дунай и острова Змеиный: современное состояние экосистемы. – МГИ НАН Украины, Севастополь, 1999. – С. 184 – 197.

7. *Нестерова Д.А.* Развитие перидинеи *Exuviaella cordata* и явление «красного прилива» в северо-западной части Черного моря. // Биология моря – 1979. – № 5. – С. 24–29.
8. *Толмазин Д.М.* Гидролого-гидрохимическая структура вод в районах гипоксии и заморов северо-западной части Черного моря. // Биология моря – 1977. – № 43. – С. 12–16.
9. *Якушев Е.В., Неретин Л.Н., Волков И.И.* Математическое моделирование трансформации соединений азота и восстановленной серы в аэробных, анаэробных и переходных между ними условиях на примере редокс-зоны Черного моря. // Геохимия – 1994. – № 10. – С. 1489–1502.
10. *Baird M.* Technical Description of the Ecological Model. // CSIRO Land and Water, Sydney. – 2001. – 35 p.

Поступила 08 декабря 2005 г.

Моделювання виникнення і розповсюдження гіпоксії на мілководді. **Е. Ф. Васечкіна, В. Д. Ярін.** Імітується ситуація розвитку гіпоксії в період весінньо-літнього прогрівання на міліні. Досліджується просторово-часова динаміка процесу. Використовується об'єктно-орієнтована модель планктонного співтовариства пеліагіалі, доповнена гідрохімічним блоком, який описує цикли азоту і сірки в аеробних і анаеробних умовах. Гідродинаміка системи описується інтегральною двошаровою моделлю, що враховує вплив атмосферної мінливості на розвиток процесу. Моделюється реакція живих компонентів системи при зміні режиму в нижньому шарі з окислювальних умов на відновлювальні, а також в зворотньому напрямку.

Ключові слова: гіпоксія, цикл азоту і сірки, аероб-анаеробні умови, просторова неоднорідність планктону, об'єктно-орієнтоване моделювання

Simulation of hypoxia emergence and propagation on shoalness. **E. F. Vasechkina, V. D. Yarin.** The situation of hypoxia development on shoal during spring-and-summer warming-up is simulated. The dynamics of process is investigated. The object-oriented model of pelagic plankton community, supplemented by the hydrochemical block, which describes cycles of nitrogen and sulfur in aerobic and anaerobic conditions, is used. The integral two-layer model considering influence of atmospheric variability describes the hydrodynamics of the system. Behaviour of alive components during change of oxidizing conditions in the bottom layer to regenerative and back is investigated.

Key words: hypoxia, nitrogen cycle, sulfur cycle, aerobic and anaerobic conditions, spatial heterogeneity of plankton, object-oriented modeling