

ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ПОЛИКУЛЬТУРЫ «МИДИИ – МАКРОФИТЫ» В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ КРЫМА

E. Ф. Васечкина

Морской гидрофизический институт
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: cpdi@rambler.ru

Предложена новая объектно-ориентированная модель, воспроизводящая рост культивируемых мидий и макрофитов на коллекторах морского хозяйства. Приведено подробное описание свойств и методов классов модели, а также анализ результатов первых тестовых экспериментов.

Описание модели. В соответствии с методологией объектно-ориентированного моделирования морских экосистем, разработанной в отделе системного анализа [1, 2], представим концептуальную модель политрофического морского хозяйства в виде структуры классов объектов, экземпляры которых будут составлять содержимое численной модели (рис. 1).

Рассмотрим каждый из классов в отдельности и выпишем их свойства.

1. «Область моделирования» – класс, содержащий координаты расчетной области и регулярную сетку, в узлах которой задаются значения гидрофизических и гидрохимических переменных. Свойства: глубина бассейна H , шаг сетки dx в зональном и dy – меридиональном направлениях, размеры области $Ndx \times Mdy$, шаг по времени – dt .

2. «Гидродинамика» – наследник класса «Область моделирования». Свойства: температура воды в верхнем и нижнем слоях, глубина перемешанного слоя; коэффициенты в параметризациях интегральной модели, потоки тепла на границе перемешанного слоя; скорости течения. Основным методом этого класса является гидродинамическая модель, описывающая временную динамику двухслойной жидкости в бассейне прямоугольной формы под воздействием ветра и потока тепла на верхней границе.

В модели выделяются два режима: вовлечения и антивовлечения. При вовлечении часть водной массы нижнего

слоя попадает в верхний слой, в результате чего характеристики последнего меняются, а значения соответствующих характеристик нижнего слоя остаются неизменными. При антивовлечении 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 (1) и (2) для гидрохимических переменных.

3. «Гидрохимия» – наследник класса «Область моделирования». Свойства: концентрации нитратов, нитритов, кислорода, сероводорода, сульфатов, сульфитов, серы, растворенного и взвешенного органического азота в узлах регулярной сетки; коэффициенты в параметризациях химических реакций, протекающих в слоях при переходе от аэробного режима к анаэробному и обратно; коэффициенты диффузии для взвешенных и растворенных субстанций.

Методы класса:

- Одномерная химико-биологическая модель, совместно описывающая циклы азота и серы в аэробно – анаэробных условиях и разработанная для моделирования процессов в редокс-зоне Черного моря [3].
- Процедура применения операторов адvection и диффузии к полям гидрохимических элементов модели. Здесь же учитывается дополнительное слагаемое, обусловленное процессами взаимообмена веществом между слоями при вовлечении либо антивовлечении.
- Процедура учета расхода и поступлений растворенных и взвешенных веществ от живых компонентов модели и изменение концентраций химических элементов в узлах регулярной сетки. Расчет взаимообмена веществом производился пропорционально площади пересечения горизонтальных проекций живых объектов с ячейками сетки.

Таким образом, динамические уравнения для гидрохимических компонентов модели в верхнем слое

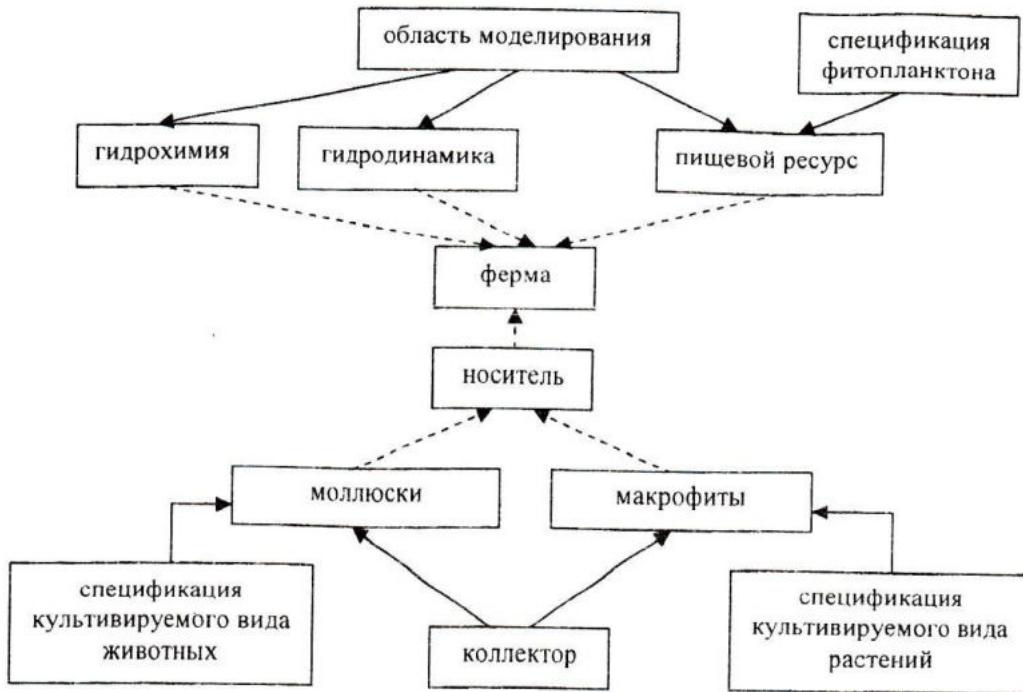


Рис. 1. Структура классов объектно-ориентированной модели управления морским хозяйством
 (сплошными стрелками показано наследование классов,
 пунктируемыми – включение объектов одних классов в объекты других)

$$\frac{\partial Y_i^0}{\partial t} = K_x \left(\frac{\partial^2 Y_i^0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Y_i^0}{\partial y^2} \right) + G_i^0 + A_i^0 + \frac{\Gamma^{h=0} - \Gamma^{h+0}}{(T^0 - T^h)h} (Y_i^h - Y_i^0) \quad (1)$$

и в нижнем слое:

$$\frac{\partial Y_i^h}{\partial t} = K_x \left(\frac{\partial^2 Y_i^h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Y_i^h}{\partial y^2} \right) + G_i^h + A_i^h + \frac{\Gamma^{h=0} - \Gamma^{h+0}}{(T^0 - T^h)(H - h)} (Y_i^h - Y_i^0). \quad (2)$$

Здесь Y_i^0 и Y_i^h – переменные блока «гидрохимия» в верхнем и нижнем слоях соответственно; G_i , A_i – функции источников (стоков), определяемые химическими и биологическими процессами соответственно; H – глубина бассейна; h – глубина перемешанного слоя; Γ^0 – поток тепла через поверхность; $\Gamma^{h=0}$ и Γ^{h+0} – потоки тепла на нижней границе перемешанного слоя и верхней границе нижнего слоя соответственно, верхние индексы «0» и « h » определяют принадлежность члена верхнему или нижнему слою; K_x – коэффициент горизонтальной диффузии.

4. «Спецификация фитопланктона» – класс, содержащий коэффициенты параметризаций физиологических функций конкретного вида фитопланктона.

5. «Пищевой ресурс» – наследник классов «Область моделирования» и «Спе-

цификация фитопланктона». Объекты этого класса содержат пространственные распределения конкретных видов фитопланктона. Свойства: биомасса фитопланктона определенного вида, записанная в узлах регулярной сетки. Метод класса: модель роста фитопланктона [1]:

$$\begin{aligned} \frac{dB_p}{dt} &= C_p (1 - k_1) B_p - k_2 B_p - \mu_p B_p - E_p, \\ C_p &= C_p^{\max} f(I) f([NH_4], [NO_3], [NO_2]) B_p^{-\beta}, \end{aligned}$$

где B_p – биомасса фитопланктона; k_1 , k_2 и μ_p – удельные скорости дыхания, экскреции и отмирания; E_p – выедание; C_p – удельная скорость роста; C_p^{\max} – максимальная удельная скорость роста; T – температура воды; I – освещенность; $B_p^{-\beta}$ – сомножитель, учитывающий фактор угнетения роста фитопланктона в скоплениях; $f(I)$, $f(T)$, $f([NH_4], [NO_3], [NO_2])$ –

функции влияния соответственно освещенности, температуры и концентраций соединений азота в морской воде на скорость роста фитопланктона.

6. «Коллектор» содержит в свойствах координаты и геометрическое описание гидротехнического устройства (хребтина с подвешенными к ней коллекторами), а также интегральные характеристики: плотность заселения и общую массу культивируемого вида. Служит базовым классом для создания класса объектов культивируемых животных и водорослей.

7. «Спецификация культивируемого вида животных (растений)» – класс, объекты которого содержат коэффициенты параметризаций физиологических функций биологических объектов.

8. «Моллюски» – класс, множество объектов которого имитирует разнообразие мидий с разными морфометрическими и физиологическими параметрами, базирующихся на одном и том же носителе. Массив объектов этого класса является одним из свойств объекта класса «Носитель». Наследник классов «Спецификация культивируемого вида моллюсков» и «Коллектор». Свойства: соматический и генеративный сухой вес мягких тканей тела, длина моллюска, энергетические показатели, длительность нереста, количество экземпляров в объекте, дисперсия индивидуальных характеристик. Основной метод класса: математическая модель роста мидии от момента ее закрепления на коллекторе [4], включающая в себя, в частности, функции поглощения и выделения веществ, т.е. обмен с окружающей средой. Уравнения модели:

$$\frac{dW_d}{dt} = A - R, \quad A = I - E, \quad (3)$$

$$I = FB, \quad E = FB(I - A_e) + Ex,$$

где A – количество усвоенной (ассимилированной) энергии, которая тратится на поддержание жизнедеятельности (дыхание) и рост особи; I – количество потребленной энергии (реальный рацион); F – скорость фильтрации воды; B – концентрация кормовой взвеси в воде; A_e – коэффициент эффективности ассимиляции пищи; E – выделение, в данном случае объединяет в себе неусвоенную

часть энергии, поступившей с пищей, и экскретируемую энергию Ex , которая теряется моллюском вместе с жидкими выделениями; R – затраты на дыхание. Физиологические функции мидии были параметризованы с помощью эмпирических соотношений, полученных путем анализа данных наблюдений на мидийных хозяйствах у берегов Крыма.

9. «Макрофиты» – класс, аналогичный предыдущему, наследник классов «Спецификация культивируемого класса макроводорослей» и «Коллектор». Свойства: масса и плотность водорослей, дисперсия коэффициентов в параметризациях роста. Основной метод – математическая модель роста грацилярии [5]:

$$\frac{dB}{dt} = (C - e - d)B, \quad (4)$$

где C – удельная скорость роста; B – биомасса водорослей; d – параметр, учитывающей разрушение и отрыв ветвей водорослей; e – выедание водорослей морскими животными. Скорость роста лимитирована температурой, освещенностью и наличием нутриентов в воде:

$$C = C^p(I, T) \min(f(N), f(P)) D^{-\beta},$$

где C^p – скорость фотосинтеза в отсутствии лимитирования биогенами; D – биомасса водорослей в месте расположения объекта; β – параметр, учитывающий самоингибирование. Функции зависимости скорости роста от содержания биогенных элементов $f(N)$, $f(P)$ могли меняться от 0 до 1 и аппроксимировались соотношениями Михаэлиса – Ментен:

$$f([NO_3^-], [NO_2^-]) = \frac{[NO_3^-] + [NO_2^-]}{([NO_3^-] + [NO_2^-] + K_{NO_3})},$$

$$f([NH_4^+]) = \frac{[NH_4^+]}{([NH_4^+] + K_{NH_4})}, \quad f(P) = \frac{[PO_4^{3-}]}{K_{PO_4} + [PO_4^{3-}]}$$

При учете двух необходимых нутриентов – азота и фосфора – лимитирующим фактором выступает тот из них, чья функция в данный момент минимальна. Константы полусыщения определялись по эмпирическим данным. Влияние солености в диапазоне 15 – 30‰ пренебрежимо мало по сравнению с влиянием температуры и не учитывалось в модели.

10. «Носитель» – класс, имитирующий линейку объектов класса «коллектор». Свойства: координаты, длина и глубина расположения, число коллекторов, расстояние между ними, интегральная масса культивируемого вида. Объекты этого класса включают в себя в виде массивов множество «животных» либо «растительных» объектов классов «моллюски» либо «макрофиты». В методах данного класса записаны интегрирующие процедуры, позволяющие следить за состоянием живой массы на носителях.

11. «Ферма» – класс, объект которого включает в себя множество «носителей», содержащих объекты культивируемых видов, поля «пищевых ресурсов», объекты слежения за состоянием окружающей среды классов «гидродинамика», «гидрохимия», «пищевой ресурс». Главный метод данного класса запускает всю иерархическую систему методов модели. Выполнение интегрирующих процедур через определенное количество шагов по времени обеспечивает непрерывный мониторинг всей системы.

Численная модель морского хозяйства. Объекты класса «Носитель» позиционировались поперек среднего течения – один для мидий и один для макроводорослей. Длина носителей задавалась 1 км, расстояние между соседними гидротехническими сооружениями 100 м, длина коллекторов 5 м, заглубление 2 м от поверхности моря. Создавались массивы объектов классов «Моллюски» и «Макрофиты», координаты этих объектов назначались так, чтобы случайнным образом заполнить коллекторы.

Массивы объектов того и другого классов включались в соответствующие объекты класса «Носитель» как свойства, а носители, в свою очередь, объединялись в объект класса «Ферма». Главный метод объекта «Ферма» – собственно математическая модель мидийного хозяйства – по очереди вызывает методы объектов, заключенных в него, в результате чего последовательно на каждом временном шаге рассчитывается гидродинамический и гидрохимический блоки, вызываются методы объектов моллюсков и макрофитов, которые позволяют рассчитать рост живых компонен-

тов, вычисляется взаимообмен веществом между живыми и неживыми компонентами системы.

В модели естественным образом имитируется конкуренция за ресурсы между объектами моллюсков. В природе особи, которым удается занять более выгодное положение на внешней стороне коллектора, пытаются лучше и растут быстрее. В модели это имитируется тем, что на каждом временном шаге объекты опрашиваются главным методом класса «Ферма» в одном и том же порядке, таким образом, первые в списке объектов располагают большим запасом ресурсов, чем последние, т.к. обновление значений концентраций пищевого ресурса происходит после обращения к каждому объекту.

Анализ численных экспериментов. В качестве управляющих воздействий были заданы ряды температуры воздуха и инсоляции с шагом 1 час. Они были построены наложением случайной составляющей на средний ход температуры и инсоляции у берегов Крыма в весенне-летний период. Для тестирования модели был выбран отрезок времени длиной приблизительно в четыре месяца (3000 шагов по времени) от начала весеннего прогрева воды. В это время мидии осенней генерации имеют в среднем длину ~ 25 мм и массу 0.07 г, эти величины были приняты в качестве начальных условий их роста на коллекторе. Одной из целей эксперимента было выяснить, оказывает ли влияние на динамику средних показателей дисперсия индивидуальных характеристик особей. Эта величина определяет разброс значений коэффициентов в параметризациях функциональных зависимостей, включенных в модель роста мидий. Мы варьировали этот показатель от 0.5 до 5 %.

Ключевую роль в модели играет скорость адвекции, которая обеспечивает своевременную доставку пищевых ресурсов объектам моллюсков. Этот средний по вертикали перенос за счет ветровых течений в наших расчетах задавался постоянным и равным 3 см/с. Адвективный поток привносил в расчетную область воду с концентрациями фитопланктона, органических и неорганических веществ, равными средним, наблю-

даемым в данный момент в расчетной области.

В начальный момент были заданы случайные поля концентраций фитопланктона, органических и неорганических форм азота, растворенного кислорода, с известными средними и дисперсиями, температура верхнего слоя – 10 °С, нижнего – 6 °С, глубина перемешанного слоя – 8 м. Динамическая скорость трения в воде задавалась как случайная величина со средним 0.5 см/с и среднеквадратическим отклонением 0.05 см/с.

Кормовая база мидий состояла из фитопланктона и взвешенной органики, коэффициенты пищевых предпочтений 1 и 0.3 соответственно. Таким образом, для объектов в каждый момент времени оценивалась величина доступных пищевых ресурсов по формуле

$$Food = [F_y] + 0.3 [POM_y], \quad (5)$$

где $[F_y]$, $[POM_y]$ – средние по вертикали концентрации фитопланктона и взвешенного органического вещества в ячейке сетки, где расположен коллектор, содержащий данный объект мидий.

На рис. 2а показаны гидродинамические условия тестового эксперимента.

Как видим, при заданном ветре глубина перемешивания была такова, что в течение всего времени расчетов коллекторы находились в верхнем слое. В связи с тем, что изъятие неорганических форм азота культивируемыми водорослями осуществлялось только из верхнего слоя, в нижнем происходило накопление азота, преимущественно в виде взвешенной органики (рис. 2б). Эта взвесь образуется в результате выделения мидиями псевдофекалий, которые опускаются вниз, но могут частично задерживаться в слое пикноклина и при наличии турбулентности вовлекаться в водную массу верхнего слоя, где затем вновь использоваться мидиями. В модели этот процесс имитировался тем, что половина выделений мидий идентифицировалась как взвешенная органика, и половина как фитопланктон.

Суммарная концентрация всех форм азота в расчетной области в течение модельного времени практически не изменилась (кривая 3 на рис. 2б). Накопление взвешенного вещества в нижнем слое компенсировалось изъятием неорганических форм азота в верхнем слое.

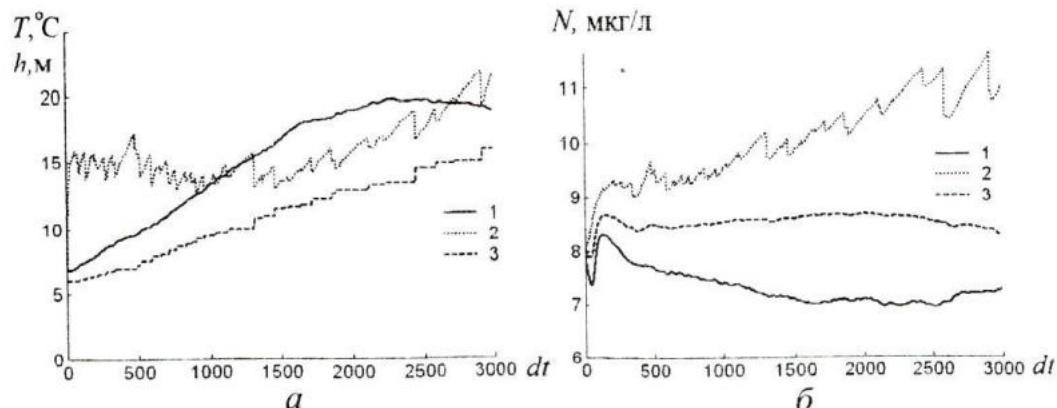


Рис. 2. Условия тестового эксперимента: а – гидрологические условия: температура верхнего слоя – 1; глубина перемешанного слоя – 2; температура нижнего слоя – 3; б – концентрация суммарного азота: в верхнем слое – 1, в нижнем – 2, средняя по расчетной области – 3

Тестирование модели производилось путем сравнения динамики средних морфометрических показателей роста мидий на модельном коллекторе с известными из данных наблюдений в прибрежной зоне Крыма и предыдущими расчетами, выполненными по модели роста отдельной особи [4].

Полученные результаты в целом лежат в рамках величин, известных по данным наблюдений [6]. Масса культивируемых мидий на всех коллекторах увеличилась за четыре модельных месяца в 2.8 раза, а макроводорослей в 2.1 раза.

Рис. 3 иллюстрирует динамику расчетанных средних морфометрических показателей роста мидий, а также энергетических потоков в мидийном блоке

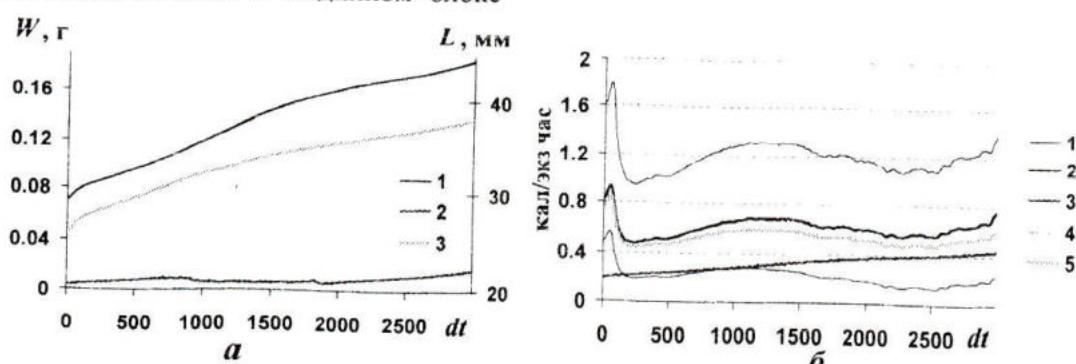


Рис. 3. Средние морфометрические показатели, полученные в тестовом расчете – а: 1 – сухой вес мягких тканей моллюсков, 2 – сухой вес гонад, 3 – длина раковины; средние энергетические потоки на коллекторе – б: 1 – потребление, 2 – ассимиляция, 3 – затраты на метаболизм, 4 – продукция, 5 – выделение (в основном в виде псевдофекалий)

Дисперсия индивидуальных характеристик является важным фактором, влияющим на средние расчетные показатели. Известно, что в природных условиях она достаточно велика. Например, относительная дисперсия длины раковины моллюсков той же размерной группы (20 – 30 мм) на коллекторах мидийного хозяйства в б. Ласпи может достигать величины 14 %, а среднее ее значение ~ 12 %. С ростом моллюсков дисперсия снижается до 3 – 5 %. Как показали расчеты, дисперсия индивидуальных характеристик (коэффициентов в параметризациях жизненных функций мидии) оказывает существенное влияние на средние морфометрические показатели поселения на коллекторе. Средний вес особей на конец расчетного времени был почти на 15 % ниже для варианта с заданной дисперсией в 5 % по сравнению с расчетом, где дисперсия составляла 0.5 %, при прочих равных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васечкина Е.Ф., Ярин В.Д. Объектно-ориентированное моделирование морских экосистем прибрежной зоны // Морской гидрофизический журнал. – 2009. – № 4. – С. 81–106.
2. Васечкина Е.Ф. Объектно-ориентированный подход к моделированию интегрированной политрофической аквакультуры «мидии – макрофиты» модели. Эти графики соответствуют расчетам при задании дисперсии индивидуальных характеристик 0.5 %.
- // В кн.: Современные рыбохозяйственные и экологические проблемы Азово-Черноморского региона: материалы VII Международной конференции. Керчь, 20 – 23 июня 2012 г. – Керчь: ЮГНИРО, 2012. – 2. – С. 83 – 89.
3. Якушев Е.В. Численное моделирование трансформации соединений азота в окислительно-восстановительной зоне Черного моря // Океанология. – 1992. – 32, вып. 2. – С. 257 – 262.
4. Васечкина Е.Ф., Казанкова И.И. Математическое моделирование роста и развития мидии *Mytilis galloprovincialis* на искусственном субстрате // Океанология. – 2014. – 54, № 6. – С. 1 – 9.
5. Васечкина Е.Ф. Имитационная модель грацилярии как одного из компонентов интегрированной поликультуры // В кн.: Современные рыбохозяйственные и экологические проблемы Азово-Черноморского региона: материалы VIII Международной конференции. Керчь, 26 – 27 июня 2013 г. – Керчь: ЮГНИРО, 2013. – С. 166 – 173.
6. Холодов В.И., Пиркова А.В., Ладыгина Л.В. Выращивание мидий и устриц в Черном море /под ред. Еремеева В.Н. – Севастополь: Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского. – 2010. – 424 с.