

# МОДЕЛЬ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В МОРСКОЙ ЭКОСИСТЕМЕ

И.П. Лазарчук

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

В статье рассматривается годовая изменчивость концентраций фито-, зоопланктона, личинок рыб, рыб, биогенов и детрита в морской экосистеме СЗШ ЧМ. Годовые сценарии концентраций интегрированы по всей акватории СЗШ ЧМ. На основе данных о причинно-следственных связях между интегральными процессами строится концептуальная модель экосистемы, которая формализуется с помощью ABC-метода.

**Введение.** Рассматривается годовая изменчивость концентраций фито-, зоопланктона, личинок рыб, рыб, биогенов и детрита в морской экосистеме северо-западного шельфа Черного моря (СЗШ ЧМ). Годовые сценарии этих концентраций осреднены (интегрированы) по всей акватории СЗШ ЧМ. В качестве внешних воздействий на экосистему используется интегральный годовой ход модуля скорости ветра, освещенности и температуры моря. На основе экспертных данных о причинно-следственных связях между этими интегральными процессами строится концептуальная модель экосистемы (рис. 1).

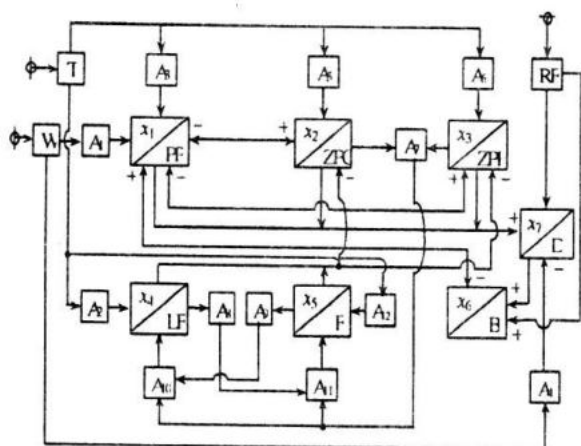


Рисунок 1 — Концептуальная модель морской экосистемы СЗШ ЧМ

Применяя стандартное уравнение метода ABC [1] и используя схему причинно-

следственных связей рисунка 1, получим систему динамических уравнений модели

$$\frac{dx_1}{dt} = x_1 [1 - c_1(x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 - a_6x_6 - A(W) - A_3(T) - f_1)]$$

$$\frac{dx_2}{dt} = x_2 [1 - c_2(x_2 - a_2x_1 + a_2x_4 + a_2x_5 - A_5(T) - f_2)]$$

$$\frac{dx_3}{dt} = x_3 [1 - c_3(x_3 - a_3x_1 + a_3x_4 - a_6x_6 - A_6(T) - f_3)]$$

$$\frac{dx_4}{dt} = x_4 [1 - c_4(x_4 - A_{10}\{A_7(x_2, x_3); A_8(x_5)\} - A_2(T) - f_4)]$$

$$\frac{dx_5}{dt} = x_5 [1 - c_5(x_5 + A_{11}\{A_7(x_2, x_3); A_8(x_5)\} - f_5)]$$

$$\frac{dx_6}{dt} = x_6 [1 - c_6(x_6 + a_6x_1 - a_6x_7 - a_{67}RF - f_6)]$$

$$\frac{dx_7}{dt} = x_7 [1 - c_7(x_7 - a_7x_1 - a_7x_2 - a_7x_3 - a_{77}RF - A_4(W) - f_7)]$$

В эти уравнения ABC модели экосистемы вводятся агенты управления, учитывающие условия развития моделируемых процессов  $A_i$  и дополнительные функции  $f_i$ , которые представляют внешние влияния, формирующие изменчивость интегрированных процессов в экосистеме СЗШ ЧМ.

Для определения коэффициентов уравнений модели экосистемы предлагается использовать вероятностный метод, который предполагает использование матрицы коэффициентов взаимной корреляции между моделируемыми процессами. В этом случае процедура идентификации коэффициентов в уравнениях ABC-модели формально совпадает с нахождением коэффициентов оптимальной интерполяции случайных функций [2].

Вводятся в рассмотрение отклонения годового хода процессов в экосистеме от среднего многолетнего. Применение к отклонениям построенных выше уравнений позволяет создать динамико-стохастическую модель (DSM) интегральных процессов в экосистеме [3,4]. Ее назначением является слежение за изменчивостью процессов конкретного года путем усвоения данных наблюдений в DSM экосистемы. Выводятся уравнения для коэффициентов усвоения данных.

Для иллюстрации предложенных алгоритмов ассимиляции данных наблюдений рассматривается модельный эксперимент, имитирующий изменчивость реальных процессов в районе СЗШ ЧМ. Приве-

дены результаты прогнозирования средних многолетних процессов в качестве реакции экосистемы на внешние воздействия. Восстанавливается годовая изменчивость процессов в конкретном году путем уточнения средних многолетних сценариев, за счет усвоения имитированных данных наблюдений в отдельные моменты времени.

**Ассимиляция данных наблюдений непрерывных процессов в АВС-моделях.** В этом случае ассимиляция данных наблюдений в АВС-модели экосистемы может рассматриваться как появление новых влияющих факторов в правых частях уравнений модели. В качестве этих факторов выступают сами рассчитываемые процессы, наблюдаемые с запаздыванием по отношению к текущему моменту времени  $t$ .

Обозначим  $a^{(1)}_{12}x^{(1)}$  влияние на процесс  $x_1$  процесса  $x^{(1)}$ , непрерывно наблюдаемого с некоторым запаздыванием, которое обозначено верхним индексом. Процедуру ассимиляции непрерывных наблюдений рассмотрим на примере уравнения динамики фитопланктона в модели. Выберем в качестве дополнительных влияний на прогнозируемую концентрацию фитопланктона следующие факторы: непрерывные измерения самого фитопланктона  $x^{(1)}$  и  $x^{(2)}$  в два предыдущих момента времени, а также измерения других влияющих на него процессов  $x^{(1)}$  и  $x^{(2)}$ ,  $x^{(1)}$  и  $x^{(2)}$ ,  $x^{(1)}$  и  $x^{(2)}$ . Тогда уравнение для концентрации фитопланктона принимает вид

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} = & x_1[1 - c(x_1 + a^{(1)}_{11}x_1 + a^{(2)}_{11}x_1 + \\ & + a_{12}x_2 + a^{(1)}_{12}x_2^{(1)} + a^{(2)}_{12}x_2^{(2)} + a_{13}x_3 + \\ & + a^{(1)}_{13}x_3^{(1)} + a^{(2)}_{13}x_3^{(2)} - a_{16}x_6 - a^{(1)}_{16}x_6^{(1)} - \\ & - a^{(2)}_{16}x_6^{(2)} - A_1(W) - A_3(T) - f_1)] \end{aligned}$$

Оценки коэффициентов влияний могут быть найдены из модели. Например, в частном случае, когда  $a^{(1)}_{11} = a^{(2)}_{11} = 0$ , уравнения для идентификации коэффициентов  $a_{12}$ ,  $a^{(1)}_{12}$  и  $a^{(2)}_{12}$  будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{da_{12}}{dt} = & a_{12}[1 - e_{12}(a_{12} - \frac{-R_{12} - a^{(1)}_{12}R_{22}^{(1)} - a^{(2)}_{12}R_{22}^{(2)} - a_{13}R_{32} - a^{(1)}_{13}R_{32}^{(1)} - a^{(2)}_{13}R_{32}^{(2)} + a^{(1)}_{16}R_{62}^{(1)} + a^{(2)}_{16}R_{62}^{(2)} + a_{16}R_{62})]}{R_{22}}] \\ \frac{da^{(1)}_{12}}{dt} = & a^{(1)}_{12}[1 - e_{12}(a^{(1)}_{12} - \frac{-R^{(1)}_{12} - a_{12}R_{22}^{(1)} - a^{(2)}_{12}R_{22}^{(2)} - a_{13}R_{32}^{(1)} - a^{(1)}_{13}R_{32}^{(1)} - a^{(2)}_{13}R_{32}^{(2)} + a_{16}R_{62}^{(1)} + a^{(2)}_{16}R_{62}^{(2)} + a^{(1)}_{16}R_{62}^{(1)}}{R^{(1)}_{22}})] \\ \frac{da^{(2)}_{12}}{dt} = & a^{(2)}_{12}[1 - e_{12}(a^{(2)}_{12} - \frac{-R^{(2)}_{12} - a_{12}R_{22}^{(2)} - a^{(1)}_{12}R_{22}^{(1)} - a_{13}R_{32}^{(2)} - a^{(1)}_{13}R_{32}^{(2)} - a^{(2)}_{13}R_{32}^{(2)} + a_{16}R_{62}^{(2)} + a^{(2)}_{16}R_{62}^{(2)} + a^{(1)}_{16}R_{62}^{(1)}}{R^{(2)}_{22}})] \end{aligned}$$

Аналогичные по форме уравнения могут быть получены для остальных коэффициентов влияния в модели.

**Идентификация коэффициентов влияния в АВС-моделях.** При идентификации коэффициентов в АВС-моделях вычисляются текущие коэффициенты корреляции. Это дает возможность учитывать изменения корреляционных связей. В свою очередь переменные матрицы коэффициентов корреляции приводят к меняющимся во времени коэффициентам влияния в уравнениях АВС-моделей. Как показывают вычислительные эксперименты [4], использование переменных коэффициентов влияния ведет к улучшению качества моделирования реальных процессов в экосистемах.

**Имитационные эксперименты DSM экосистемы.** Для проведения вычислений DSM экосистемы была представлена в конечно-разностном виде.

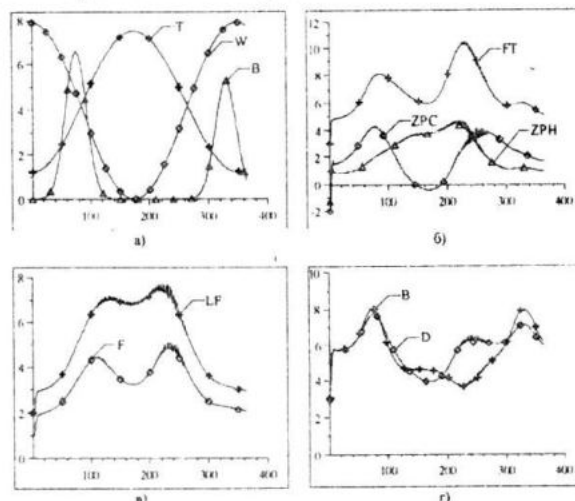


Рисунок 2 – Имитированные сценарии средней многолетней изменчивости процессов в морской экосистеме СЗШ ЧМ (б – г), вызываемые внешними воздействиями на экосистему (а)

Расчеты по модели проводились на 365 шагов безразмерного времени. Все переменные модели были приведены к единой безразмерной шкале изменчивости (0,10). Были имитированы сценарии средних многолетних процессов, рассчитываемые

мых по модели при средних многолетних внешних влияниях. На рис.2 показаны эти сценарии. В качестве средних многолетних внешних влияний использованы температура моря, модуль приводного ветра и речной сток. Увеличение речного стока было приурочено по времени к весеннему и осеннему сезонам (рис.2 а). Воздействие внешних влияний прослеживается на графиках рассчитанных средних многолетних сценариев фитопланктона, зоопланктона, личинок рыб, рыб, биогенов и детрита (рис.2 б-г)

Далее была имитирована динамика процессов в течение конкретного года, которая рассматривалась как отклонения от соответствующих средних многолетних сценариев. Были вычислены авто и взаимные корреляционные функции отклонений.

На рис.3 приведены результаты прогноза сценария концентрации фитопланктона для конкретного года в сопоставлении с истинным сценарием. Этот пример имитирует результаты усвоения данных наблюдений в соответствии с общим уравнением DSM ABC. Усваивались данные о концентрации фитопланктона в 10 последовательных моментах времени с интервалом в 5 суток между измерениями. Ассимиляция данных производилась на каждом шаге вычислений, начиная с 56-го.

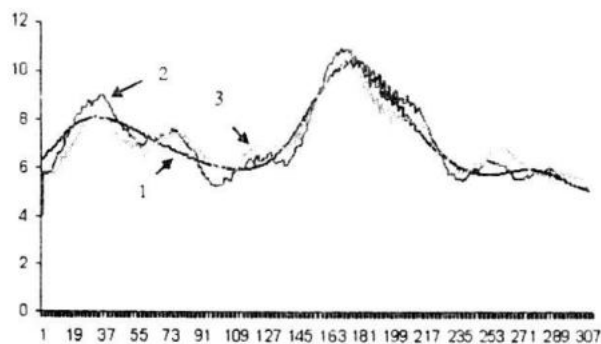


Рисунок 3 — Результаты усвоения данных концентрации фитопланктона для конкретного года в сопоставлении с истинным сценарием: 1 — средний многолетний сценарий, 2 — прогноз на 10 суток вперед с ассимиляцией данных наблюдений в 10 последовательных моментах времени с интервалом в 5 суток между наблюдениями, 3 — имитированный истинный годовой ход.

Как следует из рисунка, результаты ассимиляции данных позволяют прогнозировать с некоторой точностью динамику

сценария концентрации фитопланктона для конкретного года наблюдений. Качество прогноза теоретически может быть улучшено за счет привлечения наблюдений других процессов, связанных с концентрацией фитопланктона уравнениями общей модели экосистемы (1).

**Заключение.** В работе рассмотрены возможности построения DSM морской экосистемы на основе ABC-метода. В качестве данных наблюдений, ассимилируемых в DSM, были имитированы случайные отклонения годового хода процессов в экосистеме и в окружающей среде от среднего многолетнего годового хода. На основании проведенных вычислительных экспериментов были сделаны следующие выводы: использование взаимных корреляционных связей между процессами в ABC DSM морских экосистем позволяет объективно оценивать коэффициенты динамических уравнений модели; усвоение дискретных измерений годовой изменчивости процессов в ABC DSM морских экосистем позволяет прогнозировать сценарии развития процессов на интервалы времени, сопоставимые с радиусами корреляции их отклонений от среднего многолетнего хода; общие уравнения DSM взаимосвязанных процессов, построенные с помощью ABC-метода, могут служить основой при создании информационных технологий контроля за изменчивостью интегральных процессов в морских экосистемах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. И.Е. Тимченко, Е.М. Игумнова, И.И. Тимченко. Системный менеджмент и ABC-технологии устойчивого развития. Севастополь, Изд. "ЭКОСИ – Гидрофизика", 2000. – 225 с.
2. А.Н. Колмогоров. Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей. //Изв. АН СССР. Серия матем., 1941. – 5. – С. 3–11.
3. I.E. Timchenko Stochastic Modeling of Ocean Dynamics // Harwood Acad. Publ. Chur- London-Paris-New-York, 1984. – 320p.
- 4.Тимченко И.И., Игумнова Е.М., Тимченко И.Е. Образование и устойчивое развитие. Системная методология. – Севастополь: ЭКОСИ – Гидрофизика, 2004. – 527 с.