

УДК 577.4:517.949.2(262.54)

ИМИТАЦИОННАЯ СИСТЕМА "АЗОВСКОЕ МОРЕ"

А.Б.Горстко
(НИИ и ПМ СКНЦ ВШ)

Для прогнозирования последствий антропогенной деятельности для экосистемы Азовского моря в настоящее время необходим мощный математический аппарат.

Достаточно правдоподобная модель экосистемы, используемая для прогноза, должна:

1) строиться по блочному принципу (принцип расщепления), что дает возможность верифицировать каждый блок до его включения в общую модель;

2) предусматривать возможность учета и использования результатов различных естественно-научных исследований;

3) допускать учет большого числа переменных состояния, их функций (зачастую нелинейных) и ограничений;

4) предусматривать учет вероятностного характера многих параметров;

5) реализовываться в виде комплекса программ на ЭВМ.

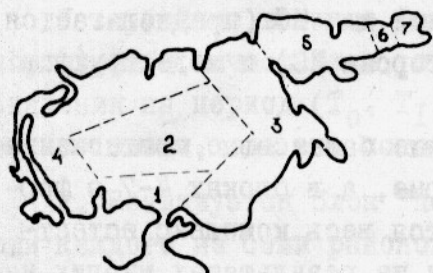
Всеим этим требованиям удовлетворяет имитационная система "Азовское море"^{х/}.

Будем считать Азовское море разделенным на семь районов (рис.1). Состояние экосистемы в каждом районе характеризуется вектором состояния, ингредиенты которого представляют собой концентрации различных веществ в воде, биомассы популяций и т.п. Предполагается, что внутри каждого района имеет место однородность по всем ингредиентам (условия в устьях рек и зоне Керченского пролива моделируются отдельно и являются для ИС экзогенными факторами). Размерность вектора состояния равна 120, причем распределение компонент следующее:

х/ ИС разрабатывается в НИИ механики и прикладной математики Северо-Кавказского центра Высшей школы.

- I-20 - концентрации химических элементов;
- 2I-22 - биомассы бактерий;
- 23-34 - биомассы основных видов фитопланктона;
- 35-46 - биомассы основных видов зоопланктона;
- 47-6I - биомассы основных видов бентоса;
- 62-II3 - биомассы основных видов рыб с учетом их возрастных групп;
- II4-I20 - резерв.

Ингредиенты с течением времени, которое предполагается дискретным и меняется в ИС шагом в 5 суток, изменяются в физических, химических, биологических и прочих процессах. В связи с этим целесообразно в ИС выделить отдельные частные модели, описывающие достаточно близкие процессы и явления. Назовем эти модели блоками и перечислим их:



- 1) "перемешивание";
- 2) "биогенные элементы";
- 3) "загрязняющие вещества";
- 4) "фитопланктон";
- 5) "зоопланктон";
- 6) "бентос";
- 7) "рыба" х/.

В блоке "перемешивание" по заданным внешним условиям (скорости и направлению ветра, водообмену с Черным морем, стоку рек Дона и Кубани) вычисляются объемы воды, перетекающие за соответствующую пятидневку между районами моря. Это перетекание определяет изменение ингредиентов с номерами I-46.

Блок "биогенные элементы" описывает круговорот азота, фосфора, кремния с учетом распада, переноса, изъятия и потребления. Температура и солнечная активность являются для этого блока определяющими факторами.

Блок "загрязняющие вещества" определяет изменения в концентрации за пятидневку с учетом распада и поступления новых порций загрязняющих веществ. Определяющие факторы здесь те же, что и в предыдущем блоке.

х/ Этот блок представляет собой набор из восьми блоков - по одному для каждого из основных видов рыб.

В блоках "фитопланктон", "зоопланктон", "бентос" и "рыба" учитываются питание, дыхание, отмирание, размножение, миграции. Кроме того, для блока "рыба" учитывается промышленное воздействие, состоящее в изъятии соответствующей части популяций.

Уже отмечалось, что моделируемые в блоках процессы происходят тем или иным способом, с той или иной интенсивностью под воздействием различных факторов, из которых в ИС учитываются следующие:

- 1) объем стока Дона;
- 2) объем стока Кубани;
- 3) водообмен с Черным морем;
- 4) солнечная активность;
- 5) скорость и направление ветра;
- 6) температура воды.

Все эти факторы являются внешними для ИС (предполагается, что они не подвержены влиянию со стороны ИС) и моделируются отдельно.

В блоках 1-3 используются обычные балансовые соотношения в конечной или дифференциальной форме, а в блоках 4-7 в форме моделирующих алгоритмов содержится весь комплекс естественно-научных сведений, базирующихся на результатах многих наблюдений, который определяет динамику соответствующего объекта в зависимости от тех или иных условий на протяжении всего жизненного цикла. И балансовые соотношения, и моделирующие алгоритмы реализуются в виде программы на ЭВМ.

Опишем процесс функционирования ИС. Пусть в момент времени T_0 известен вектор состояния экосистемы x_0 . Реализация одного временного такта ИС дает возможность вычислить вектор состояния x_I в момент $T_0 + 5$ суток. Она осуществляется по одной из следующих двух схем - последовательное протекание процессов (А) и последовательно-параллельное протекание процессов (В).

Последовательное протекание процессов (А)

I. В первую очередь моделируются внешние факторы для промежутка времени (T_0, T_I) , где $T_I = T_0 + 5$ суток, те из них, которые предполагаются случайными, - путем экстраполяции соответствующих временных рядов. Например, пусть имеется ряд наблюдений некоторой случайной величины $\{S(t_i)\}$ в моменты $t_1, t_2, \dots, t_N = T_0$. Аппроксимируем эти величины с помощью полинома

$$x(t) = \sum_{i=0}^n a_i \cdot t^i + \sum_{j=0}^m b_j \cos(2\pi f_j t + y_j),$$

где $x(t)$ - значение полинома в момент ;
 a_i - коэффициенты аппроксимирующего полинома;
 n - степень полинома;
 f_j - амплитуда косинусоидальной гармоника с частотой f_j и фазой y_j .

Коэффициенты полинома $x(t)$ выбираются из условия минимума функционала

$$F = \sum_{i=1}^N \{S(t_i) - x(t_i)\}^2,$$

зная полином $x(t)$ можно аппроксимировать искомую величину $S(t_i) = S(T_{N+1})$ значением $x(t_{N+1})$.

Неслучайные внешние факторы (например, водообмен с Черным морем) либо вычисляются, либо в модель вводятся их прогнозные значения на период (T_0, T_I) . Далее, внешние факторы вводятся во все блоки, где они используются.

2. Реализуется блок "перемешивание", в результате чего для каждого из семи районов моря изменяются первые 46 компонент вектора состояния.

3. Поочередно в каждом районе уже измененный вектор состояния x_0 преобразуется с помощью всех остальных блоков. Для этого прежде всего вводится следующее упорядочение блоков во времени: "биогенные элементы" < "загрязняющие вещества" < "фитопланктон" < "зоопланктон" < "бентос" < "рыба". Затем поочередно над вектором состояния выполняются преобразования, предписанные каждым блоком для периода $[T_0, T_I]$. Полученный в результате вектор x_I является вектором состояния системы в момент T_I . Порядок обмена информацией между блоками, важный для понимания многократного функционирования ИС, приведен на рис.2.

Описанная схема не лишена недостатков. Во всех блоках имеются процессы, которые происходят в промежутке времени T_0, T_I одновременно. Чтобы преодолеть трудности их совместного рассмотрения и введено упорядочение блоков. В результате в ИС взаимодействуют ингредиенты, относящиеся к различным моментам времени. Если шаг по времени достаточно мал (например, порядка 5 суток), то эта неточность, по-видимому, не превос-

ходит порядка ошибки измерения величин ингредиентов. Большой же шаг недопустим.

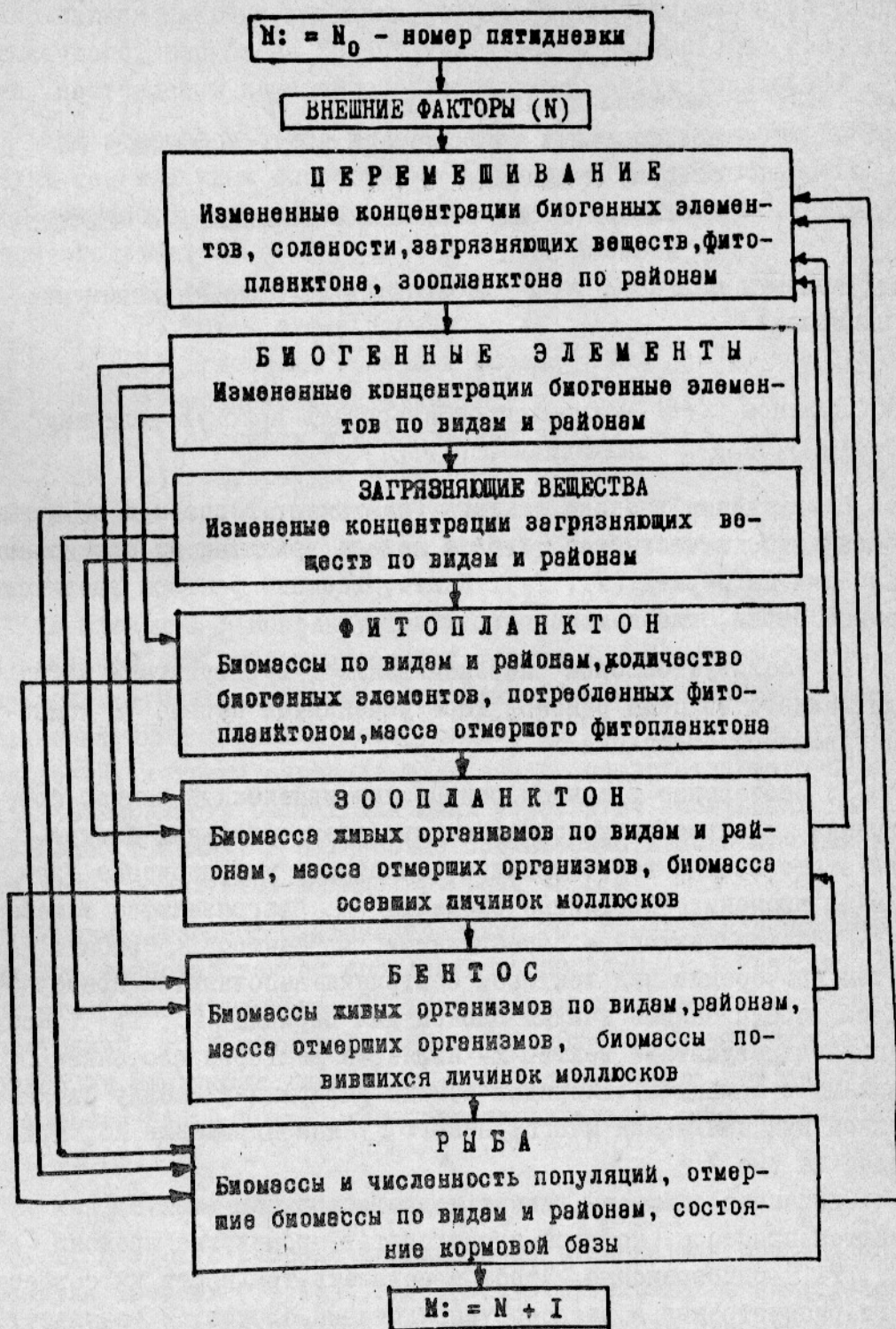


Рис.2. Порядок обмена информацией между блоками имитационной системы

Последовательно-параллельное протекание процессов (Б)

1. Так же как в А.

2. Так же как в А.

3. В каждом блоке все моделируемые процессы делятся на два класса - одновременные и последовательные. Для промежутка времени $[T_0, T_I]$ один за другим реализуются последовательные процессы всех блоков, приходящиеся на эту пятидневку, в результате чего определяется измененный вектор \hat{x}_0 , который преобразуется в x_I с помощью одновременно протекающих процессов Z_1, \dots, Z_r , относящихся к различным блокам. В каждом из этих процессов отдельные ингредиенты потребляются, другие же могут производиться, причем, вообще говоря, известны не точные количества потребленных и произведенных ингредиентов, а возможные границы изменения этих величин, зависящие от различных факторов.

$$\begin{matrix} T_0 \\ x_{1T_0} \\ x_{1T_0} \\ x_m \end{matrix} \begin{pmatrix} z_1 \dots z_j \dots z_r \dots \\ \dots [a_{ij}(\Phi_{T_0}), \bar{a}_{ij}(\Phi_{T_0})] \dots \\ \vdots \end{pmatrix},$$

где Φ_{T_0} - вектор факторов в момент T_0 ;
 \bar{a}_{ij} и a_{ij} - соответственно верхняя и нижняя границы.

Трудность моделирования здесь состоит в том, чтобы определить интенсивности $P_1 \dots P_r$ происходящих процессов. Она может быть преодолена с помощью следующего алгоритма:

- 1) моделируем реализацию вектора Φ_{T_0} ;
- 2) определяем величины $a_{ij}(\Phi_{T_0})$ и $\bar{a}_{ij}(\Phi_{T_0})$;
- 3) предполагая величину $a_{ij}(\Phi_{T_0})$ случайной (с тем или иным законом распределения в $[a_{ij}(\Phi_{T_0}), \bar{a}_{ij}(\Phi_{T_0})]$ находим ее реализацию при помощи метода Монте-Карло;
- 4) определяем границы возможных изменений $x_{T_0}^i : \underline{x}_{T_0}^i$ и $x_{T_0}^i$;
- 5) в качестве начальных значений искомым интенсивностей P_1, P_2, \dots, P_r выбираем соответствующие компоненты вектора x_{T_0} ;
- 6) в матрице (A_{ij}) отмечаем положительные и отрицательные элементы, после чего определяем величины $\Delta_i = \sum_j a_{ij} \cdot x_{T_0}^{kj} + x_{T_0}^{ki} - \sum_j \bar{a}_{ij} \cdot x_{T_0}^{kj}$ (для действительно реализуемых величин $P_i \Delta_i \geq 0$).

7) формируем векторы "условий жизни" для каждого ингредиента $(u_{i1}, u_{i2}, \theta_i^1, \dots, \theta_i^s)$

$$u_{i2} = \frac{\sum \bar{a}_{ij} \cdot x_{T_0}^{kj}}{\sum (\bar{a}_{ij}) \cdot x_{T_0}^{kj}},$$

где $u_{i1} = \frac{\sum a_{ij}^+ \cdot x_{T_0}^{kj}}{\sum (\bar{a}_{ij}^+) \cdot x_{T_0}^{kj}},$

θ_i^k - экспертная оценка k -ой компоненты вектора для i -го ингредиента.

8) упорядочиваем ингредиенты по "условиям жизни" и тем самым устанавливаем предпочтения в развитии для родственных видов, а также тенденции к росту или сокращению для каждого ингредиента;

9) выбираем "ШАГ" изменения P_i ;

10) улучшаем значения P_i с учетом 4), 5), 6), 7), 8), 9);

11) отыскиваем "зоны неопределенности" для интенсивностей каждого процесса (повторение этапов 5)-10);

12) выбираем действительно реализуемые величины P_i из "зон неопределенности" либо как соответствующие средние значения, либо с помощью случайного выбора;

13) формируем вектор x_{T_1} .

Многочисленное разыгрывание элементов матрицы позволяет получить множество $\{x_{T_1}\}$ возможных состояний в момент T_1 .

При таком подходе к моделированию имеет смысл сопоставить траектории реальной системы, не одну траекторию модели, а их семейство. Изучение статистических закономерностей этого семейства траекторий для оценки различных управляющих воздействий на систему - основная часть работы ИС "Азовское море".

Приведенный алгоритм нуждается в некоторых пояснениях. Прежде всего, он не может быть строго обоснован. По сути - это имитация происходящих в действительности процессов питания - отмирания. Однако в связи с тем, что эти процессы описываются на популяционном, а не на организменном уровне, возникает необходимость в использовании такой итерационной процедуры (п.п.4)-10) для определения их возможных интенсивно-

стей, которая бы не противоречила имеющимся биологическим представлениям.

Наиболее серьезная верификация и уточнение могут быть получены при испытании его на реальных данных.

Список использованной литературы

1. В а р ш а в с к и й В.И. Коллективное поведение автоматов. М., "Наука", 1973, 404 с.
2. М е н ш у т к и н В.В. Математическое моделирование популяций и сообществ водных животных. Л., "Наука", 1971, 195 с.
3. S y s t e m s analysis and simulation in ecology. vol. I, II, Ed. B. Patten. Acad. Press, 1971, p.1100.
4. T a i t, R.V. Elements of marine ecology, London, Butterworths, 1973, p.272.

The simulation system AZOV SEA.

A.B.Gostko.

S u m m a r y

Principles of the simulation system AZOV SEA are described. The functioning of the system is worked out for two variants.