

Математическое моделирование морских систем

УДК 551.46.02

И.Е. Тимченко, В.А. Жоров, Е.М. Игумнова, И.П. Лазарчук

Динамическая модель интегрированных процессов в экосистеме северо-западного шельфа Черного моря

На примере экосистемы северо-западного шельфа Черного моря рассмотрено построение динамической модели интегрированных процессов развития фито- и зоопланктона, личинок и рыб, а также изменчивости концентраций биогенов и детрита. Обобщены данные многолетних наблюдений этих процессов и создана схема причинно-следственных связей между ними. Методом адаптивного баланса влияний получены динамические уравнения модели экосистемы. Предложено использовать метод анализа иерархий для оценки коэффициентов модели, исходя из степени влияния внешних и внутренних факторов на динамику экосистемы. Приведены примеры расчета сценариев интегрированных процессов в экосистеме и выполнено их сравнение с данными многолетних наблюдений в этом районе.

Введение

Построение динамической модели морской экосистемы состоит из ряда последовательных этапов. На первом из них формулируется цель моделирования и собирается вся доступная информация, которая позволяет объединить связанные с этой целью сведения в две вербальные модели: экосистемы и окружающей среды. Под вербальными моделями экосистем мы подразумеваем систематизированные знания о фито- и зоопланктоне, личинках рыб, рыбах и других биологических объектах, а также об их реакциях на внешние воздействия. Это – ментальные модели специалистов (экспертов), основанные на наблюдениях и опыте, которые накапливались в результате сопоставления научных гипотез и наблюдаемых фактов.

На втором этапе строятся схемы причинно-следственных связей для каждой из двух вербальных систем. Часто их называют концептуальными моделями [1]. Такая модель должна содержать в своем составе все принципиально важные с точки зрения цели моделирования процессы, развивающиеся в экосистеме. Она должна также учитывать все наиболее важные влияния этих процессов друг на друга. Схема влияний в концептуальных моделях неизбежно образует иерархию причин и следствий явлений. Так, влияние внешней среды, находящейся на более высоком уровне в этой иерархии, служит источником (причиной) изменений в экосистеме.

© И.Е. Тимченко, В.А. Жоров, Е.М. Игумнова, И.П. Лазарчук, 2007

Концентрируя в себе результаты ментального анализа специалистов, концептуальная модель предопределяет успех третьего (заключительного) этапа моделирования – создания формальной динамической модели экосистемы. Только формальная модель дает возможность использовать компьютер в качестве мощного инструмента изучения возможных процессов в экосистеме. Имитируя внешние влияния на экосистему, можно исследовать ее реакцию на влияние окружающей среды и прогнозировать поведение самой экосистемы. Однако переход от схемы причинно-следственных связей концептуальной модели к системе формальных уравнений динамической модели экосистемы требует новых предположений и обоснований.

Наиболее перспективный метод создания формальных моделей морских экосистем основан на опыте гидродинамического моделирования морской среды [2]. Включение биогеохимических процессов в модели динамики океана дает возможность изучать пространственно-временные поля биологических объектов экосистемы и наиболее полно отражает условия их существования [3]. Вместе с тем сложность построения и использования подобных моделей заставляет искать более простые пути получения интегрированных оценок процессов в экосистеме. Перспективным с этой точки зрения является метод адаптивного баланса влияний (метод *ABC*), который позволяет создавать модели интегрированных процессов с помощью уравнений стандартного типа [1].

Адекватность модели реальным процессам в экосистеме во многом зависит от правильного выбора коэффициентов формальной модели. В методе *ABC* могут быть получены объективные оценки этих коэффициентов, если имеются временные ряды наблюдений соответствующих процессов [4]. В тех случаях, когда архивные данные для реанализа отсутствуют, коэффициенты модели экосистемы должны быть оценены экспертным путем. Одним из возможных способов экспертной идентификации коэффициентов может стать метод *ANP* (*Analytical network process*), широко применяемый в теории принятия решений и в задачах стратегического планирования [5]. Ниже остановимся на возможности использования этого метода в *ABC*-моделях морских экосистем.

Целью статьи является построение и формализация вербальной модели развития планктонного сообщества северо-западного шельфа Черного моря в приближении интегрированного оценивания (*integrated assessment* [6]). Рассматривается система взаимосвязанных биологических процессов, развивающихся в верхнем слое моря, которые условно отнесены к центру данной акватории. Интегрированная оценка процессов означает их пространственное осреднение по объему морской среды. Что касается временной изменчивости моделируемых процессов, ограничимся такой степенью их осреднения, при которой легко прослеживается внутригодовой ход этих процессов.

В качестве внешних климатических условий, формирующих интегрированную изменчивость планктонного сообщества, будем рассматривать годовую

вой ход температуры моря, интенсивность и продолжительность ветрового воздействия в зимний период времени, а также вынос биогенов с речным стоком. Основной задачей станет использование в интегрированной модели закономерностей поведения холодолюбивого и теплолюбивого зоопланктона, личинок рыб и рыб, которые известны из многолетних наблюдений на северо-западном шельфе, полученных в черноморских экспедициях, а также имеющихся в литературных источниках. Кроме того, особое внимание уделим применению упомянутых выше методов *ABC* и *ANP* при формализации концептуальной модели экосистемы.

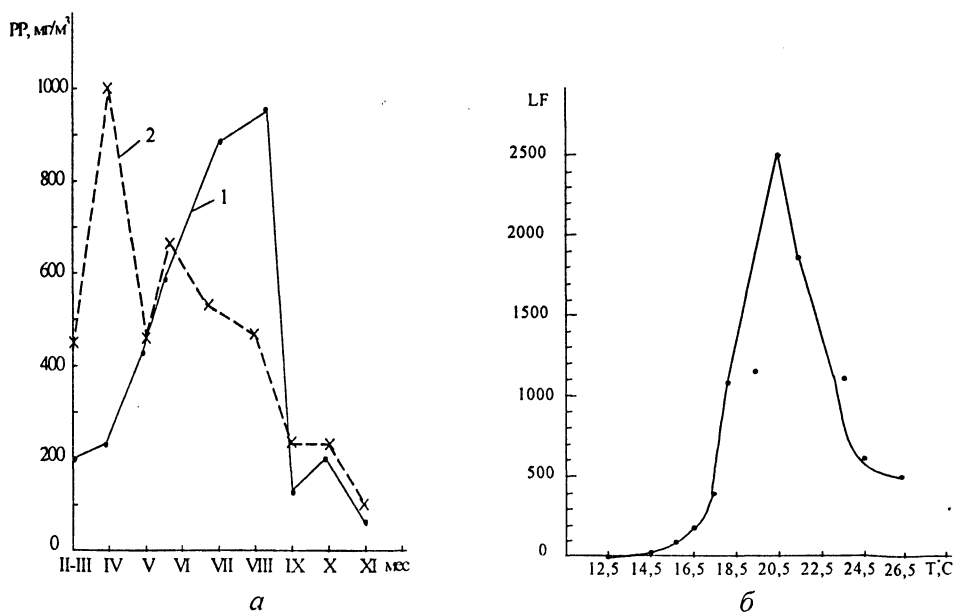
Вербальная модель формирования интегрированных процессов в морской экосистеме северо-западного шельфа Черного моря

Исходя из сформулированных выше целей исследования, выберем в качестве основных характеристик экосистемы ресурсы фитопланктона, зоопланктона и ихтиопланктона. Именно эти ресурсы – чувствительный индикатор всех природных последствий хозяйственной деятельности в регионе, поскольку биомасса ихтиопланктона определяется продуктивностью фитопланктона и кормового зоопланктона. Экспертные данные об известных закономерностях формирования планктонного сообщества северо-западного шельфа Черного моря содержатся во многих литературных источниках. Они дают информацию о состоянии экосистемы этого района, характерном для 30 – 70-х годов XX в., т.е. до начала активного влияния антропогенного фактора. Для этого периода внутригодовая динамика биомассы фитопланктона характеризуется несколькими максимумами, количество и величины которых определяются параметрами среды и структурно-функциональными характеристиками сообщества.

Известны, например, особенности динамики фитопланктона в этом районе в зависимости от ветрового режима. По многолетним данным, в декабре – январе в среднем 26 штормовых дней. Отклонения от этого среднего значения оказывают большое влияние на сценарии годового хода биомассы фитопланктона. Если число штормовых дней (при скорости ветра выше 10 м/с) превосходит 26 в течение января – февраля, график биомассы фитопланктона имеет один максимум, приходящийся на июль – август. В относительно тихие зимы, когда число штормовых дней меньше 26, согласно данным работы [7], в годовом ходе биомассы фитопланктона отмечалось два максимума. Первый (большой) максимум приходился на апрель, второй (меньший) следовал в июне – июле. Эти экспериментальные данные приведены на рис. 1, а.

Кроме ветра значительное влияние на динамику экосистемы оказывает температура морской среды. При повышении температуры воды до 19°C начинается нерест теплолюбивых рыб. Разгар нереста наблюдается в июле – августе. Наиболее широкий температурный диапазон характе-

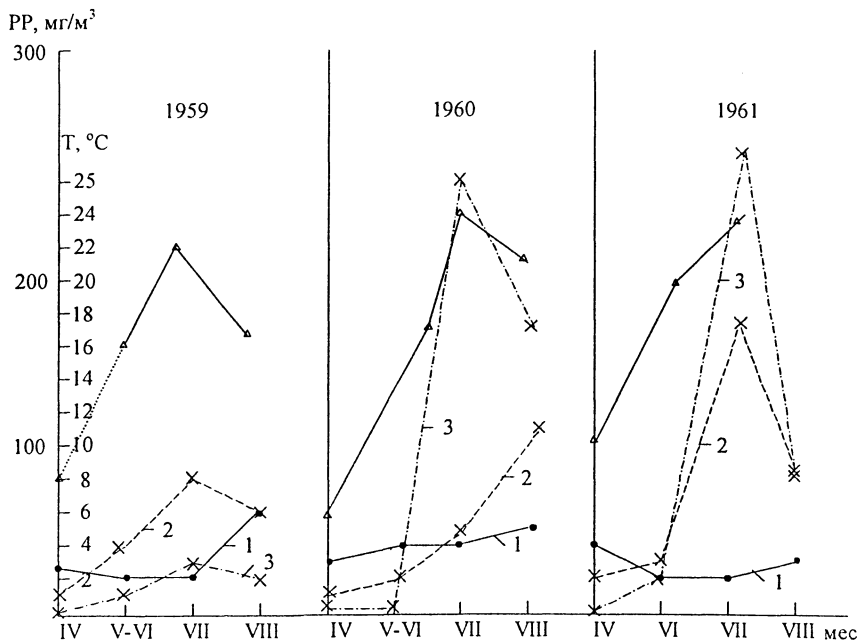
рен для хамсы. Рис.1, б отображает изменение численности икринок хамсы при разной температуре [8].



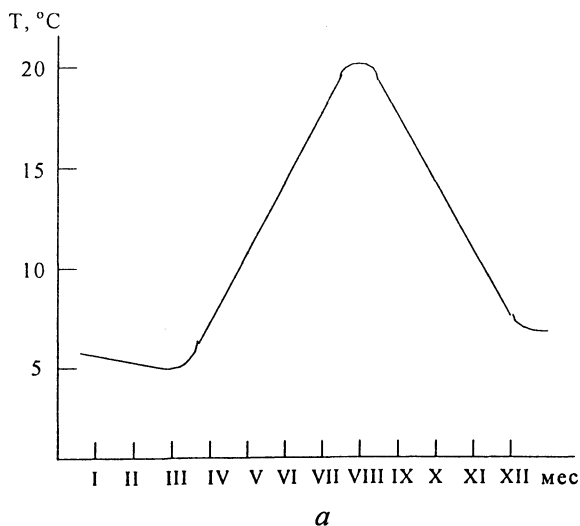
Р и с. 1. Интегрированная внутригодовая изменчивость биомассы фитопланктона [7] (> 26 штормовых дней – 1 и < 26 – 2) – а и изменение численности икринок хамсы (на один 10-минутный лов) в зависимости от температуры морской воды [8] – б

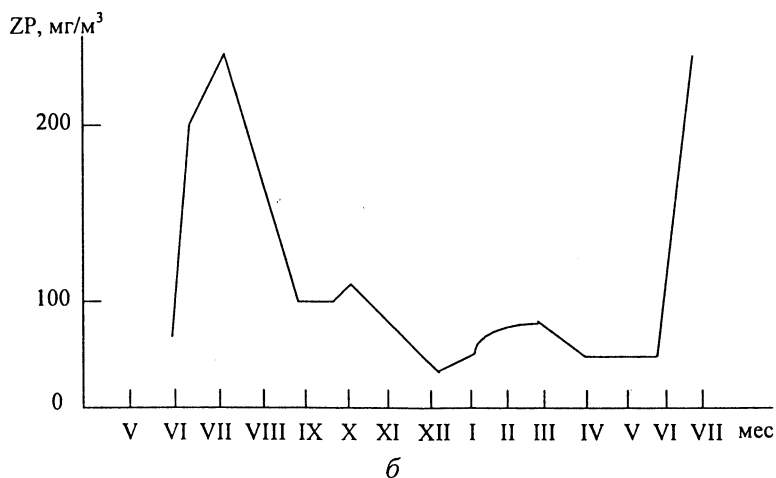
С января по март первичная продукция увеличивается, повышается численность и биомасса фитопланктона за счет диатомового вида. Возрастание скорости фотосинтеза весной зависит от метеорологических условий зимой. Рис. 2 показывает влияние внутригодового изменения температуры поверхностного слоя на биомассу фитопланктона [9]. Летом биомасса зоопланктона зависит от теплолюбивого вида *Penilia*, который питается по укороченной пищевой схеме – детритом и бактериями. Развитие *Penilia* благоприятно в годы с нормальным метеорологическим режимом. При повышенном ветровом воздействии на верхний слой моря биомасса зоопланктона уменьшается. Максимальные температуры способствуют развитию *Penilia*.

Во внутригодовом цикле холодолюбивый зоопланктон приобретает ведущее значение в зимне-весенний период. На его развитие оказывают влияние общая биомасса фитопланктона, температура морской воды и концентрация личинок рыб. На рис. 3, а показаны сезонные изменения температуры воды в районе Карадага, на рис. 3, б – годовой ход изменений биомассы зоопланктона (мг/м³) в этом районе [10, 11].



Р и с. 2. Внутригодовой ход изменения биомассы различных видов зоопланктона (1, 3), фитопланктона (2) и температуры морской воды (Δ): 1 – холодолюбивые, 2 – эвритермные, 3 – теплолюбивые





Р и с. 3. Сезонные изменения температуры воды – *а* и годовой ход биомассы зоопланктона – *б* в районе Карадага в 1957 – 1959 гг. [10]

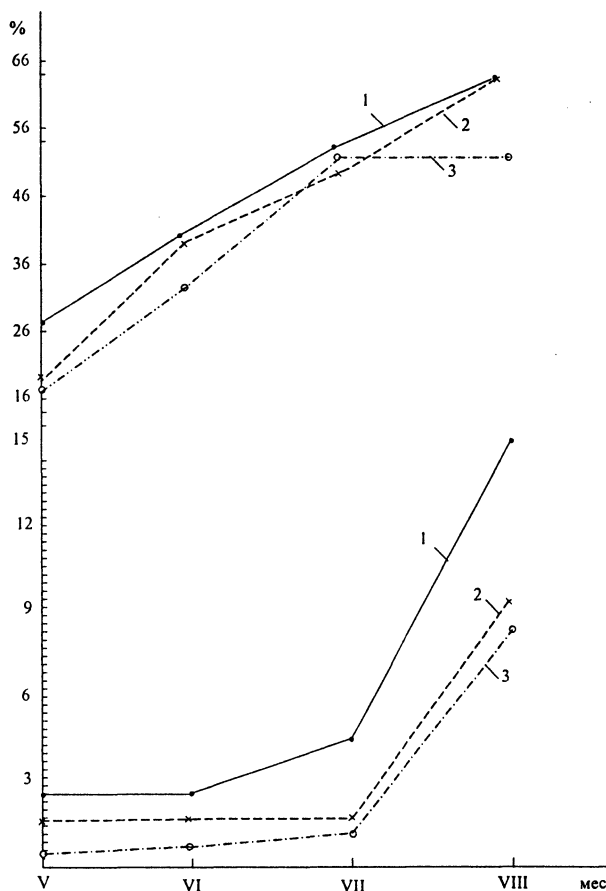
Теплолюбивые формы зоопланктона достигают максимального обилия в водах северо-западной части моря в летний период. Как и для холодолюбивых форм, его масса зависит от температуры, общего фитопланктона, личинок рыб. Расчеты изменения численности, выживания, элиминации икринок и личинок черноморской хамсы в процессе развития выполнены по многосуточным наблюдениям в районе Севастополя. Продолжительность развития каждого этапа эмбрионального периода определяли экспериментально [12, 13] (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Продолжительность развития и количество икринок и личинок хамсы (среднее значение под 1 м² поверхности моря) [15,16]

Этапы эмбрионального развития и размерные группы личинок, мм	Продолжительность развития (ч) и среднее значение под 1 м ² поверхности моря, ед.
I	4
II	3
III	10
IV	6
V	6
VI	4
2 – 2,9	89
3 – 3,4	31
3,5 – 3,9	24
4,0 – 4,9	48
5,0 – 5,9	43
6,0 – 6,9	34
7,0 – 7,9	29
8,0 – 8,9	26
9,0 – 9,9	23
10,0 – 10,9	21
11,0 – 11,9	19

В июне – июле в разгар нереста хамсы до стадии развития III – IV выживает в разные годы 36 – 58 % икры. В стадии выклева в отдельные годы остается 15 – 30 % (см. нижнюю часть рис. 4) [14]. Сопоставление показателей выживания икры и личинок в июле дает следующие результаты: у икры они отличаются от года к году в 1,1 раза, у личинок – более чем в 6 раз. Хотя выживание хамсы в эмбриональном периоде влияет на межгодовые колебания численности поколений, эти колебания в основном определяют выживание в стадии личинок. На гибель икры влияют температура воды и штормовая деятельность. С повышением температуры воды от 18 до 23,2°C показатели гибели икры хамсы снижаются от 64 – 70 до 27 – 30 % [13]. Этот вывод иллюстрирует рис. 4.



Р и с. 4. Гибель в процентном отношении икры и личинок хамсы в урожайные (1), средние (2) и малоурожайные (3) годы. Икра – верхняя часть рисунка, личинки – нижняя часть

Колебания урожайности фитопланктона год от года обуславливают колебания запасов хамсы. Высокоурожайное поколение хамсы превосходит по численности малоурожайное в 10,4 раза. Высокоурожайные периоды имеют продолжительность ~ 10 лет, малоурожайные – 4 – 5 лет. В периоды с высо-

ким и низким уровнем урожайности численность отдельных поколений меняется с небольшой амплитудой. Колебания численности поколений формируются под влиянием естественных условий. Из факторов убыли хамсы в годы ее высокой численности самым весомым являются хищники.

Основное нерестилище хамсы – северо-западная часть Черного моря. В прибрежных районах показатель выживания икры хамсы составляет 4 – 5 ч, тогда как, например, у ставриды он равен 1 ч. Кроме того, хамса нагуливает вес и нерестится в Керченском проливе и в районах Южного берега Крыма.

Величина нерестового стада хамсы определяется двумя возрастными группами – годовиками и двухгодовиками, которые составляют по массе 78 %. Численность нерестового стада хамсы в водах бывшего СССР изменялась от 15,6 до 71,0 млрд. экз., а биомасса – от 1,5 до 4,9 млн. центнеров. Экспериментально было оценено, что при минимальном запасе хамсы 15,6 млрд. экз., или 0,15 млн. т, в данном регионе необходимо ~ 1 млн. т кормового зоопланктона. При максимальном запасе хамсы эта величина повышается до 3,3 млн. т [15]. Состав пищи хамсы приведен в табл.2.

Т а б л и ц а 2

Состав пищи хамсы (% к массе тела)

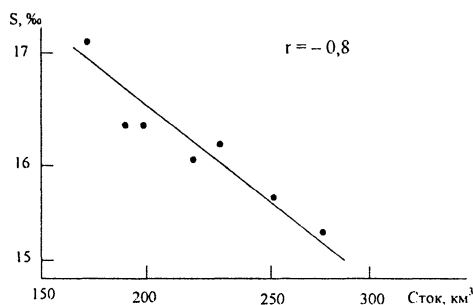
Пищевой организм	Сеголетки	Двухлетки и старше
<i>Copepoda</i> ,	99,2	91,4
в том числе		
<i>Calanus</i>	9,2	25,3
<i>Acartia</i>	44,4	58,7
<i>Sagitta</i>	0,2	0,8
Рыбы	0	7,2
Фитопланктон	0,5	0,4
Прочие	0,1	0,2

Оптимальный тепловой фон для развития хамсы 14 – 23°C. Если концентрация кормового зоопланктона не превышает 30 – 40 мг/м³, то хамса не заходит в эти районы на нагул и нерест. Например, в северо-западной части Черного моря условия для хамсы могут быть не оптимальными от зимы до середины лета: в этом случае нет нагула и нереста. Но если в этом же районе со второй половины лета кормовая база для хамсы улучшается, то она набирает необходимый вес, линейные размеры и жирность. Показатели выживания икры и личинок черноморской хамсы в 1965 – 1973 гг. суммированы в табл. 3.

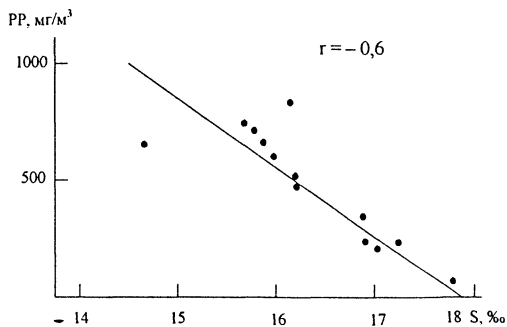
Количество биогенов в морской среде пополняется за счет разложения детрита и благодаря речному стоку. Вместе с тем биогены расходуются на рост фитопланктона. Ведущая роль при этом отводится поставкам с речными водами. На рис. 5, а показана зависимость солености района от величины материкового стока Дуная и Днестра, на рис. 5, б – изменение средней биомассы фитопланктона в зависимости от различной степени распреснения района [16].

**Показатели выживания икры и личинок черноморской хамсы
в 1965 – 1973 гг. в районе северо-западного шельфа**

Годы	Икра III – IV стадий развития, % к общему количеству				Личинки III – IV стадий развития, % к количеству икры			Оценка урожайности поколений и их численность, млрд.шт.
	май	июнь	июль	август	июнь	июль	август	
1965 – 1967	27	43	58	64	2,3	4,5	15,8	Урожайные, 53
1968	17	41	51	64	1,2	1,5	10,1	Средне-урожайные, 18,4
1969 – 1973	16	36	55	56	0,3	0,7	7,9	Мало-урожайные, 5,1
Среднее	20	40	59	59	0,9	2,1	10,8	22,5



а



б

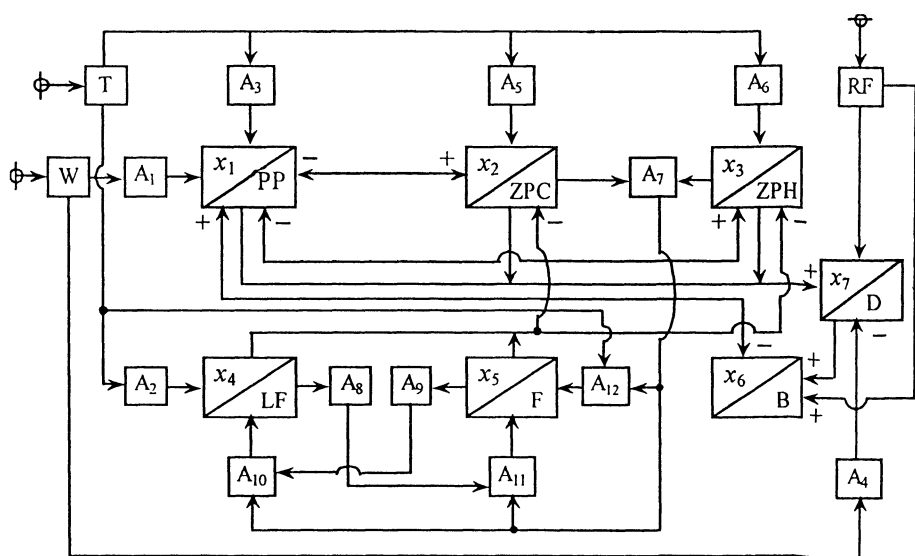
Р и с. 5. Зависимость солености морских вод северо-западного шельфа Черного моря от величины материкового стока Дуная и Днепра – а и изменение средней биомассы фитопланктона вследствие распреснения этого района [16] – б

Детрит нарастает за счет отмирания клеток фитопланктона, фекалий зоопланктона, речных поставок. Его масса уменьшается во время штормов в результате вертикального перемешивания вод.

Приведенные результаты анализа данных наблюдений и известные из литературных источников выводы экспертов формируют вербальную модель интегрированных процессов в экосистеме северо-западного шельфа Черного моря. Она дает возможность перейти к построению концептуальной модели этих процессов.

Концептуальная модель интегрированных процессов в морской экосистеме северо-западного шельфа Черного моря

Экосистема этого района находится под влиянием годового хода приводного ветра, температуры морской воды и речного стока, от которого зависит ее соленость. Кроме того, в модели должен быть учтен возможный вынос с речным стоком биогенов и детрита. Исходя из сформулированных целей моделирования, введем в рассмотрение концентрации следующих субстанций, характеризующих динамику морской экосистемы: общего фитопланктона – PP , холодолюбивого зоопланктона – ZPC , теплолюбивого зоопланктона – ZPH , личинок рыб – LF , рыб – F . Кроме концентраций живых организмов в модель экосистемы включим концентрации биогенных элементов – B и детрита – D . Анализ рассмотренных выше результатов наблюдений интегрированных процессов в морской экосистеме северо-западного шельфа дает возможность построить ее концептуальную модель (рис. 6).



Р и с. 6. Концептуальная модель морской экосистемы северо-западного шельфа Черного моря

В соответствии с предлагаемой схемой причинно-следственных связей биомасса хамсы определяется холодолюбивым и теплолюбивым зоопланктоном, а также личинками рыб и наличием биогенных веществ. Она зависит также от факторов внешнего воздействия на морскую среду, которые введены в рассмотрение при помощи ряда операторов, обозначенных A_i ($i = 1, 2, \dots, 12$). В частности, с учетом состава пищи хамсы (см. табл. 2) положительная связь между численностью ее поколений, количеством корма, температурой воды в период нереста введена при помощи операторов A_{10} , A_{11} , A_{12} .

Оператор A_1 моделирует известный из наблюдений годовой ход концентрации фитопланктона, обусловленный действием приводного ветра в зимний период (январь – февраль). Как уже было отмечено, если в этот период ветер имеет скорость, превышающую 10 м/с в течение более 26 сут, то годовой ход концентрации фитопланктона имеет один максимум, приходящийся на август (225-е сутки года). В противном случае кривая годовой изменчивости фитопланктона имеет два максимума: в апреле (165-е сутки года) и в июле (205-е сутки года).

Для того чтобы учесть условия существования личинок, установлено лимитирование их концентрации в зависимости от количества кормов и рыб, производящих икру. Было принято, что в каждый момент времени концентрация личинок определяется тем из этих двух влияющих факторов, который имеет наименьшее значение. С этой целью оператор A_{10} сравнивал между собой оба фактора и определял тот из них, который имеет минимальное значение. Кроме того, оператор A_9 учитывал конечное время, необходимое для развития рыб из личинок. Подобная зависимость введена и для лимитирования количества рыб.

Формализация концептуальной модели морской экосистемы северо-западного шельфа

Концептуальная модель, изображенная на рис. 6, может быть формализована с использованием метода *ABC*. При этом должны быть учтены перечисленные выше особенности динамики интегрированных процессов планктонного сообщества. Используем те обозначения для интегрированных процессов, формирующих экосистему, которые показаны на рис. 6. Под переменными x_i будем подразумевать концентрации следующих субстанций: x_1 – фитопланктона, x_2 – холодолюбивого зоопланктона, x_3 – теплолюбивого зоопланктона, x_4 – личинок рыб, x_5 – рыб, x_6 – биогенов, x_7 – детрита.

Применяя стандартное уравнение метода *ABC* [1] и используя схему причинно-следственных связей рисунка 6, получим следующую систему динамических уравнений модели:

$$\frac{dx_1}{dt} = x_1 [1 - c_1 (x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 - a_{16}x_6 - A_1(W) - A_3(T) - f_1)],$$

$$\frac{dx_2}{dt} = x_2 [1 - c_2 (x_2 - a_{21}x_1 + a_{24}x_4 + a_{25}x_5 - A_5(T) - f_2)],$$

$$\frac{dx_3}{dt} = x_3 [1 - c_3 (x_3 - a_{31}x_1 + a_{34}x_4 + a_{35}x_5 - A_6(T) - f_3)],$$

$$\frac{dx_4}{dt} = x_4 [1 - c_4 (x_4 - A_{10} \{A_7(x_2, x_3); A_9(x_5)\} - A_2(T) - f_4)], \quad (1)$$

$$\frac{dx_5}{dt} = x_5 [1 - c_5 (x_5 + A_{11} \{A_7(x_2, x_3); A_8(x_4)\} - A_{12}(T) - f_5)],$$

$$\frac{dx_6}{dt} = x_6 [1 - c_6 (x_6 + a_{61}x_1 - a_{67}x_7 - a_{6rf}RF - f_6)],$$

$$\frac{dx_7}{dt} = x_7 [1 - c_7 (x_7 - a_{71}x_1 - a_{72}x_2 - a_{73}x_3 - a_{7rf}RF + A_4(W) - f_7)],$$

где a_{ij} , c_i , a_{irf} – коэффициенты модели; W – скорость ветра; RF – влияние речного стока.

В правые части уравнений модели входят операторы управления A_i и дополнительные функции f_i , которые представляют внешние влияния, формирующие изменчивость интегрированных процессов в экосистеме северо-западного шельфа. Оператор $A_1(W)$ имеет следующий вид:

$$A_1(W) = IF(H < 26; J; K), \quad (2)$$

где $K = \exp(-\alpha_k(t - 225)^2)$, $J = \exp(-\alpha_{j1}(t - 205)^2) + 0,7 \exp(-\alpha_{j2}(t - 165)^2)$.

Коэффициенты α_k , α_{j1} и α_{j2} , входящие в формулы этого оператора, были подобраны таким образом, чтобы кривые годового хода соответствовали наблюдениям, показанным на рис. 1, а.

Кроме ветра концентрация фитопланктона подвержена влиянию температуры морской воды. Наилучшие условия для развития складываются при температуре 16 °С. Зависимость планктона от температуры представляет кривая на рис. 2, которая моделирована оператором $A_3(T)$:

$$A_3(T) = \exp(-\alpha_{T3}(T - 16)^2). \quad (3)$$

В уравнении для холодолюбивого зоопланктона x_2 оператор A_5 моделирует известную зависимость этого вида от температуры, которая изображена на рис. 2, 3. В соответствии с этими графиками для оператора A_5 было принято следующее выражение:

$$A_5(T) = \exp(-\alpha_{T5}(T - 12)^2). \quad (4)$$

Подобным же образом была моделирована зависимость от температуры для концентрации теплолюбивого зоопланктона x_3 . Наиболее благоприятной температурой для него является 23 °С, экспериментально установленная зависимость показана на рис. 2. Оператор A_6 в уравнении для x_3 имел вид:

$$A_6(T) = \exp(-\alpha_{T6}(T - 23)^2). \quad (5)$$

Температурная зависимость личинок рыб показана на рис. 1, б. Ее также было удобно представить оператором внешнего влияния на процесс x_4 в форме гауссовой кривой:

$$A_2(T) = \exp(-\alpha_{T2}(T - 21)^2). \quad (6)$$

Для учета условий лимитирования концентрации личинок рыб в зависимости от количества кормов и рыб, производящих икру, оператор A_{10} был представлен в следующем виде:

$$A_{10} = \min(A_7; A_9(x_5)), \quad A_7 = x_2 + x_3, \quad (7)$$

$$A_9 = \text{IF}[x_5(t + \tau) - x_5(t) < 0; x_5(t); x_5(t)(1 - \exp(-\alpha_{x5}t))],$$

где τ – время роста личинок рыб.

Аналогичным образом было выполнено моделирование условий существования рыб:

$$A_{11} = \min(A_7; A_8(x_4)), \quad A_7 = x_2 + x_3, \quad (8)$$

$$A_8 = \text{IF}[x_4(t + \tau) - x_4(t) < 0; x_4(t); x_4(t)(1 - \exp(-\alpha_{x4}t))],$$

где τ – время роста рыб.

Влияние приводного ветра на концентрацию детрита моделировалось с помощью оператора $A_4(W)$:

$$A_4(W) = \exp(-\alpha_{w4}W(t)). \quad (9)$$

В уравнениях (2) – (9) T – температура (в °C), t – время (в сутках).

Для проведения расчетов по модели необходимо определить коэффициенты влияний, входящие в правые части уравнений (1). В случаях, когда имеются архивные данные о моделируемых процессах, в методе *ABC* возможна объективная оценка величин этих коэффициентов путем статистического анализа архивных данных [1, 2, 4]. В нашем исследовании мы используем другой подход к решению этой задачи, основанный на экспертных суждениях о степени влияния одних процессов в экосистеме на другие.

Применение метода *ANP* при оценке коэффициентов влияния в уравнениях модели

Для оценки значений коэффициентов в уравнениях модели, построенной методом *ABC*, может быть применен метод *ANP*, предложенный Т. Саати [5]. Он представляет собой дальнейшее развитие получившего широкую известность метода анализа иерархий *АНР* (*Analytical hierarchy process*) [17]. Метод

ориентирован на поддержку решений, принимаемых экспертами, в условиях сложного выбора между существующими альтернативами. Его суть заключается в следующем.

Предположим, что имеет место линейная зависимость некоторого процесса z от других взаимосвязанных процессов y_i ($i = 1, 2, \dots, m$), развивающихся в сложной системе:

$$z = b_1 y_1 + b_2 y_2 + \dots + b_m y_m. \quad (10)$$

Предположим далее, что процессы y_i сами являются линейными функциями еще одной системы взаимосвязанных процессов x_j ($j = 1, 2, \dots, n$):

$$y_i = a_{i1} x_1 + a_{i2} x_2 + \dots + a_{in} x_n. \quad (11)$$

Тогда возникает иерархическая система влияний: на первом (верхнем) уровне иерархии расположен процесс z , на втором (среднем) уровне – процессы y_i , на третьем (нижнем) уровне – процессы x_j . Практическая проблема заключается в выборе значений коэффициентов b_i и a_{ij} , которые устанавливают степени влияния (приоритеты) соответствующих факторов. Подобный выбор при анализе сложных социально-экономических систем выполняют эксперты. Однако их оценки часто содержат погрешности и бывают не согласованными между собой. В методе анализа иерархий предложена процедура объективизации оценок экспертов путем их глобального согласования в пределах иерархии.

Для оценки влияния нижнего уровня иерархии на элементы верхнего уровня Т. Саати предложил сравнивать между собой попарно экспертные суждения о степени влияния процессов x_j на каждый из процессов y_i , а затем проводить такую же оценку влияния процессов y_i на величину z . Пусть, например, A_j – факторы (процессы) x_j , влияющие на некоторый процесс y_i , находящийся на более высоком уровне иерархии. Обозначим через w_j те веса, с помощью которых эксперты оценивают степени этих влияний. Условимся считать, что степени влияния выбираются по шкале $[1, 10]$. Тогда для каждого процесса y_i может быть составлена матрица парных сравнений A_i , элементами которой будут отношения оценок w_j/w_k , устанавливаемые экспертами ($j = 1 \dots n, k = 1 \dots n$):

$$\begin{matrix} & A_1 & A_2 & A_3 & \dots & A_n \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_n \end{matrix} & \begin{pmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \frac{w_1}{w_3} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \frac{w_2}{w_3} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \frac{w_3}{w_1} & \frac{w_3}{w_2} & \frac{w_3}{w_3} & \dots & \frac{w_3}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \frac{w_n}{w_3} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Так как по определению элементы матрицы A удовлетворяют условию $a_{ij}a_{ji} = 1$, эта матрица будет обратно симметричной. Представим матрицу парных сравнений в виде

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix}, \quad a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}. \quad (12)$$

Для нахождения относительной ценности, желательности или вероятности каждого объекта нижнего уровня иерархии по отношению к объекту иерархии, лежащему на более высоком уровне, нужно вычислить множество собственных векторов матрицы парных сравнений (12), т.е. решить следующую задачу [18]:

$$Aw = \lambda w. \quad (13)$$

Предположим, что эксперты безошибочно определили отношения w_j/w_k для всех влияний. В силу свойства обратной симметрии матрица имеет ранг 1, а ее собственное число $\lambda_{\max} = n$. Соответствующий собственный вектор дает согласованные оценки влияний факторов нижнего уровня иерархии на верхний уровень.

В методе *ANP* допускается неточное задание степени влияния пары процессов x_i и x_k на процесс y_j . В этом случае матрица A уже не будет строго согласованной и, следовательно, она будет иметь не единственный собственный вектор. Однако если погрешности экспертных оценок невелики, среди собственных чисел матрицы будет одно (максимальное) число $\lambda_{\max}$, близкое по величине к значению n . По сравнению с ним остальные собственные числа будут иметь малые величины [17]. Поэтому отклонение $\lambda_{\max} - n$ может служить мерой согласованности матрицы A . Оно указывает на уровень погрешностей, допускаемых при выборе собственного вектора, соответствующего числу $\lambda_{\max}$ в качестве оценок степени влияния процессов x_j на процесс y_j .

Для оценки степени согласованности используется индекс согласованности (ИС) и отношение согласованности (ОС). В качестве последнего выбирают отношение ИС к той величине, которую он принимает при абсолютно несогласованном между собой (случайном) наборе экспертных оценок (СлСогл):

$$\text{ИС} = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1)}, \quad \text{ОС} = \frac{\text{ИС}}{\text{СлСогл}}.$$

Коэффициент случайной согласованности зависит от размерности матрицы A . При $n = 3$ он составляет 0,58; при $n = 5 - 1,12$; при $n = 7 - 1,32$; при $n = 10 - 1,49$ [17]. Величина ОС должна быть $\sim 10\%$ или менее.

Применение метода *ANP* дало возможность оценить коэффициенты влияний в уравнениях модели экосистемы (1) при отношениях согласованности 5 – 7 %. В каждом уравнении модели сопоставлялись небольшие группы положительных и отрицательных влияний. Поэтому матрицы парных сравнений имели невысокие размерности. Рассчитанные значения коэффициентов модели (1) приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Значения некоторых коэффициентов влияния a_{ij}

a_{ij}	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$	$i = 6$	$i = 7$
$j = 1$	1	0,33	0,33	0	0	0,15	0
$j = 2$	0,45	1	0	0,1	0,2	0	0
$j = 3$	0,4	0	1	0,1	0,25	0	0
$j = 4$	0	A_7 A_{10}	A_7 A_{10}	1	A_9 A_{10}	0	0
$j = 5$	0	A_7 A_{12}	A_7 A_{12}	A_8 A_{11}	1	0	0
$j = 6$	0,4	0	0	0	0	1	0,4
$j = 7$	0,2	0,1	0,1	0	0	0	1

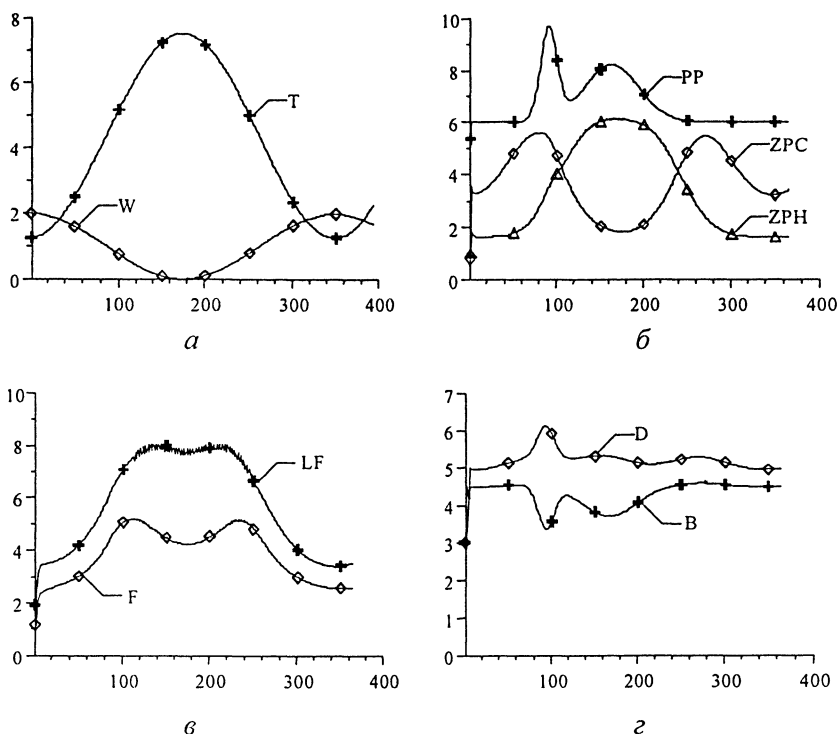
При определении влияющих воздействий, включенных в уравнения модели (1) с помощью операторов A_i , параметры последних (коэффициенты для уравнений (2) – (7)) подбирались таким образом, чтобы эти влияния соответствовали приведенной выше вербальной модели экосистемы.

Проведение имитационных экспериментов с моделью

С построенной формальной моделью (1) – (9) были проведены вычислительные эксперименты. В ходе вычислений ставилась задача сопоставить между собой сценарии развития интегрированных процессов в морской экосистеме. С этой целью все моделируемые процессы были представлены в безразмерном виде и приведены к единой шкале изменчивости [0,10] безразмерных единиц. Для перехода к реальным размерным единицам результаты расчетов, показанные на приведенных ниже рисунках, должны быть умножены на следующие коэффициенты: $W \sim 5$ м/с, $T \sim 3^\circ\text{C}$, $PP \sim 0,5$ г/м³, $ZPC \sim 0,1$ г/м³, $ZPH \sim 0,1$ г/м³, $LF \sim 0,005$ г/м³, $B \sim 2,5$ г/м³, $D \sim 6 \cdot 10^{-5}$ г/м³. В качестве единицы измерения времени выбраны одни сутки. Расчеты проводились на 400 безразмерных единиц времени (шагов вычислений). Дополнительные функции внешнего влияния f_i в этих экспериментах не использовались.

В первом эксперименте построены сценарии развития интегрированных процессов для слабых ветров в течение года (не более 15 м/с). Имитированный годовой ход модуля скорости приводного ветра W и температуры верхнего слоя моря T показан на рис. 7, а. Известно, что максимальная величина теплового воздействия на экосистему характерна для июля – августа, минимальная – для декабря – января. Если конкретный год характеризуется отно-

сительно слабым ветром, то фитопланктон в своем развитии имеет два максимума: один, более интенсивный, в марте, другой – летом. В зимне-весенний период активное развитие получают виды диатомового комплекса. Низкие значения продукции всегда характерны для первой половины зимнего периода.



Р и с. 7. Сценарии развития интегрированных процессов в морской экосистеме северо-западного шельфа Черного моря при слабых ветрах в зимний период (январь – февраль)

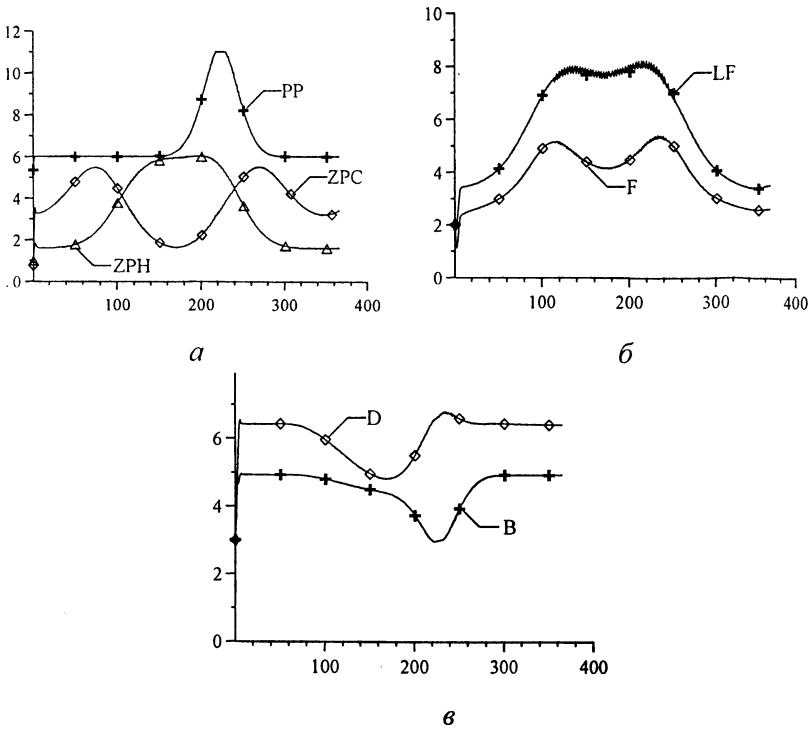
Как следует из результатов расчетов, показанных на рис. 7, б, с конца января по март первичная продукция увеличивается. Первый максимум зависит от метеорологических условий. Когда происходит быстрый прогрев вод в начале весеннего периода, максимум продукции возникает уже в марте. При медленном прогреве вод максимум смещается на конец весны. После весеннего максимума (на протяжении примерно месяца) скорость образования фитопланктона снижается в результате понижения концентрации биогенных элементов и появления гетеротрофных организмов (см. график *PP* на рис. 7, б).

Поведение расчетной кривой концентрации фитопланктона во второй половине года может быть интерпретировано следующим образом. В конце июля – первой половине августа наступает второй максимум в развитии фитопланктона благодаря пиропитовым водорослям. В этих условиях продукция летнего максимума фитопланктона может превышать весеннюю. После

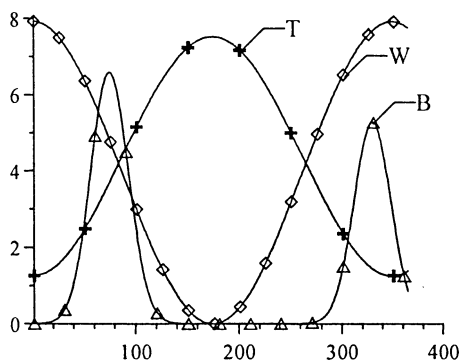
завершения летнего периода в сентябре – октябре наступает позднее осеннее развитие с повышением первичной продукции. В декабре первичная продукция понижается до минимума и остается на этом уровне всю зиму.

В зимний период наблюдается минимум фотосинтеза. В это время имеет место преобладание дыхания водорослей над синтезом в связи с малым освещением и влиянием зимней вертикальной циркуляции, которая захватывает поверхностный слой, по мощности превышающий критическую глубину фотосинтеза. На расчетной кривой концентрации фитопланктона видны два максимума (рис. 7, б). Однако третий, осенний, максимум не был воспроизведен моделью. В этом проявилась некоторая ограниченность использованной в модели параметризации интегральных процессов в экосистеме.

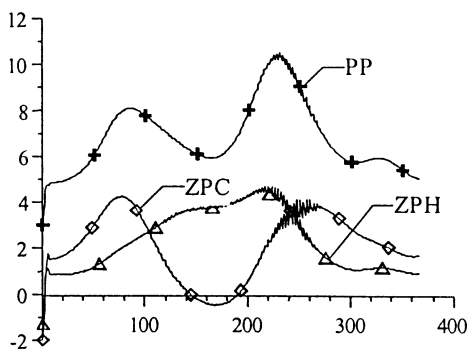
Более адекватными следует считать результаты моделирования динамики холодолюбивого и теплолюбивого зоопланктона (рис. 7, б, графики ZPC и ZPH). Они вполне правдоподобно отражают нарастание биомассы зоопланктона в зависимости от сезона, которое известно из наблюдений (рис. 8, 9). Правдоподобно выглядит и соотношение организмов ZPC и ZPH в общей биомассе зоопланктона северо-западного шельфа Черного моря.



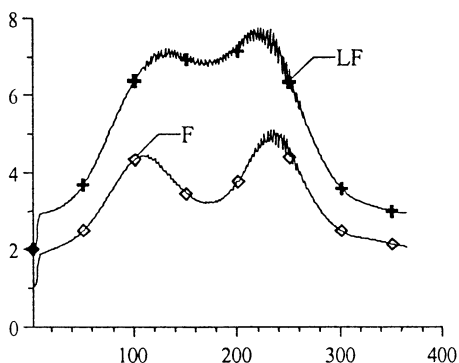
Р и с. 8. Сценарии развития процессов в морской экосистеме в условиях сильных ветров



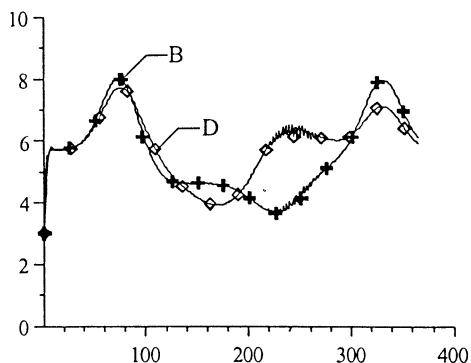
a



б



в



г

Р и с. 9. Влияние выноса биогенов с речным стоком на процессы в экосистеме северо-западного шельфа Черного моря

Самой многочисленной у хамсы является июльская генерация молоди. Она в основном определяет численность сеголеток в августе. Амплитуда межгодовых колебаний численности личинок приближается к амплитуде колебаний численности сеголеток (изменение на порядок величины). Выживание в личиночном периоде является основным фактором, определяющим эти колебания. Модельные сценарии развития, приведенные на рис. 7, в, демонстрируют соответствие между численностью личинок и сеголеток хамсы.

Как следует из рис. 7, г, ход изменения концентрации биогенов в морской воде находится в противофазе с внутригодовым ходом концентрации фитопланктона (рис. 7, б). Подобная зависимость свидетельствует о значительном влиянии, которое оказывает рост концентрации фитопланктона на потребление биогенов. Менее явно выражена в модельных сценариях положительная связь концентрации фитопланктона и детрита (рис. 7, з).

Во втором эксперименте сила ветрового воздействия на морскую среду была увеличена в четыре раза. Соответствующие расчетные сценарии приве-

дены на рис. 8. В этом случае кривая концентрации фитопланктона имеет один максимум, смещенный к лету (рис. 8, а). Интересно отметить, что существенное изменение сценария концентрации фитопланктона практически не отразилось на внутригодовой изменчивости каждого из видов зоопланктона, личинок рыб и рыб. Этот вывод следует из сравнения соответствующих графиков, приведенных на рис. 7, б, в и 8, а, б. Подобное сходство можно объяснить тем, что концентрация фитопланктона не являлась лимитирующим фактором развития процессов основной пищевой цепи. При выбранной параметризации внешних воздействий на экосистему динамика этих процессов в основном определялась внутригодовым ходом температуры морской среды.

Существенные изменения произошли в сценариях концентраций биогенов и детрита. Минимум концентрации биогенов соответствует времени максимального развития фитопланктона (рис. 8, в), которое (в условиях сильных ветров в январе – феврале) приходится на июль. Что же касается концентрации детрита, то его годовая изменчивость в основном определялась динамикой холодолюбивого зоопланктона и ветровым воздействием. Поэтому концентрация детрита имеет минимум в мае.

В третьем вычислительном эксперименте, проведенном также в условиях сильных ветров, имитирован вынос биогенов в море с речным стоком, увеличение которого приурочено к весеннему и осеннему сезонам. Сценарии развития процессов в морской экосистеме показаны на рис. 9.

На графике годового хода концентрации фитопланктона появился еще один максимум, приходящийся на период весеннего выноса биогенов с речным стоком (рис. 9, б). Сценарий холодолюбивого зоопланктона практически не претерпел изменений (кривая этого сценария на рис. 9, б смещена вниз на 2 деления вертикальной шкалы). Максимум концентрации теплолюбивого зоопланктона смещен по времени на август. Летнее увеличение концентрации этого вида зоопланктона оказалось под влиянием минимума концентрации фитопланктона в июне.

Графики концентрации личинок рыб и рыб имеют такой же вид, как и в отсутствие выноса биогенов (рис. 8, б и 9, в), что свидетельствует в пользу того, что вынос биогенов не оказывает прямого воздействия на эти процессы. Сценарий развития концентрации биогенов показан на рис. 9, г. Он демонстрирует два основных максимума, образовавшихся за счет имитированного выноса биогенов с речным стоком, и минимум в августе, приходящийся на пик концентрации фитопланктона (рис. 9, б). График годового хода содержания детрита (рис. 9, г) показывает увеличение его концентрации в периоды выноса биогенов. Эти максимумы являются следствием учета в модели морской экосистемы (1) зависимости концентрации детрита от речного стока.

Заключение

Вычислительные эксперименты подтвердили возможность построения формальных моделей морских экосистем, основанных на экспертных знаниях о их поведении, накопленных в результате многолетних наблюдений морской среды в конкретном районе. Вербальные описания реакции морской экоси-

стемы на внешние воздействия дают возможность представить интегрированные причинно-следственные связи между гидрохимическими и гидробиологическими процессами в морской среде в виде концептуальной модели экосистемы. Примененный нами метод *АВС* позволил построить формальную динамическую модель экосистемы северо-западного шельфа Черного моря и учесть в ней данные многолетних наблюдений особенностей формирования планктонного сообщества в этом районе моря. Использование метода анализа иерархий *АНР* дает возможность обосновать выбор коэффициентов влияний в уравнениях динамической модели экосистемы путем привлечения дополнительных знаний о степени влияния одних процессов на другие. Динамические модели интегрированных процессов, развивающихся в морской экосистеме, позволяют прогнозировать возможные сценарии внутригодовой изменчивости этих процессов при различных нетипичных факторах внешних влияний климатического или антропогенного происхождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимченко И.Е., Изумнова Е.М., Тимченко И.И. Системный менеджмент и АВС-технологии устойчивого развития. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. – 225 с.
2. Еремеев В.Н., Изумнова Е.М., Тимченко И.Е. Моделирование эколого-экономических систем. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. – 320 с.
3. Любарцева С.П., Михайлова Э.Н., Шапиро Н.Б. Экологическая трехмерная численная модель Черного моря: сезонная эволюция экосистемы эвфотической зоны // Морской гидрофизический журнал. – 2000. – №5. – С. 55 – 80.
4. Тимченко И.И., Изумнова Е.М., Тимченко И.Е. Образование и устойчивое развитие. Системная методология. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. – 527 с.
5. Saaty T.L. Decision making with Dependence and Feedback. – Pittsburg: RWS Publications, 1996. – 140 p.
6. Cicin-Saint B., Knecht R.W. Integrated Coastal and Ocean Management. Concepts and Practices. – Washington, D.C. – Covelo, California: Island Press, 1998. – 518 p.
7. Маштакова Г.П. Суточная динамика фитопланктона в Черном море // Труды АзЧерНИРО. – 1968. – Вып. 27. – С. 60 – 72.
8. Дехник Т.В., Павловская Р.М. Распределение икры и личинок некоторых рыб Черного моря // Там же. – 1950. – Вып. 14. – С. 151 – 176.
9. Бозулавский С.Г., Беляков Ю.М., Жоров В.А. Особенности гидрологического режима Черного моря // Основы биологической продуктивности Черного моря / Под ред. чл.-корр. В.Н. Грезе. – Киев: Наук. думка, 1979. – С. 11 – 23.
10. Бенько К.Н. Сезонные колебания численности и биомассы зоопланктона в Черном море в районе Карадага в 1957 – 1959 гг. // Тр. Карадаг. биол. станции АН УССР. – 1962. – Вып. 18. – С. 44 – 59.
11. Ключарев К.Н. Материалы для количественной характеристики зоопланктона Черного моря у Карадага // Там же. – 1952. – Вып. 12. – С. 78 – 95.
12. Дехник Т.В. Показатели элиминации в эмбриональный и личиночный периоды развития черноморской хамсы // Тр. Севастоп. биол. станции АН СССР. – 1960. – Вып. 13. – С. 216 – 244.
13. Дехник Т.В. Размножение и экология массовых рыб Черного моря на ранних стадиях онтогенеза. – Киев: Наук. думка, 1970. – 211 с.
14. Павловская Р.М. Выживание черноморской хамсы на ранних этапах развития // Труды АзЧерНИРО. – 1955. – Вып. 16. – С. 99 – 121.
15. Моисеев П.А. Биологические ресурсы Мирового океана. – М.: Пищевая промышленность, 1969. – 338 с.

16. *Маштакова Г.П.* Влияние вод материкового стока на развитие фитопланктона в северо-западной части Черного моря // Тр. АзЧерНИРО. – 1964. – Вып. 23. – С. 55 – 69.
17. *Saaty T.L.* The Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process. – VI. – Pittsburg: RWS Publications, 2000. – 478 p.
18. *Шилов Г.Е.* Введение в теорию линейных пространств. – М.: ГИТИЗ, 1956. – 303 с.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 02.03.06
После доработки 24.03.06

ABSTRACT Construction of a dynamic model of the integrated processes of development of phyto- and zoo-plankton, larvae and fishes, as well as concentration variability of nutrients and detritus is considered on the example of the ecosystem of the northwestern Black Sea shelf. Data of long-term observations of these processes are generalized in a cause-effect diagram, and the ecosystem concept model is constructed. The method of the adaptive balance of causes is used to obtain dynamic equations of the ecosystem model. The method of the analytic hierarchy process is proposed for estimating the model coefficients proceeding from the degree of influence of the external and internal factors upon the ecosystem dynamics. The examples of the calculated scenarios of the integrated processes in the ecosystem are compared with the long-term observations in the region.