

**ОСОБЕННОСТИ
ПРОСТРАНСТВЕННО-
ВРЕМЕННОГО РАЗВИТИЯ
БИОЛОГИЧЕСКИХ
ОБЪЕКТОВ ЭКОСИСТЕМЫ
СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ
ЧЕРНОГО МОРЯ**

Л.Д. Пухтяр, И.П.Лазарчук

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: lyu245 @ mail.ru

Исследуются процессы развития биологических объектов экосистемы северо-западной части Черного моря на основе трехмерной пространственно-временной модели развития планктонного сообщества. Показана возможность оценок по выявлению районов экстремальных концентраций морского ресурса в зависимости от времени года и района на акватории.

При исследовании процессов функционирования планктонного сообщества в море кроме экспериментальных работ важными являются работы по построению динамической модели морской экосистемы. Применение динамической модели экосистемы дает возможность имитируя внешние влияния на экосистему исследовать ее реакцию на изменчивость окружающей среды и прогнозировать поведение самой экосистемы. Процессы происходящие в морской среде взаимосвязанны, поэтому лучшим приближением к реальности будут задачи учитывающие такую связь. Сложность построения и использования подобных моделей заставляют искать более простые пути получения оценок процессов в экосистеме. Перспективным с этой точки зрения является метод адаптивного баланса влияний (метод АВС), который позволяет создавать модели процессов с помощью уравнений стандартного типа [1]. В работе [1] рассмотрена двумерная модель развития планктонного сообщества Северо-западной части Черного моря (СЗЧМ) в приближении интегрированного оценивания, где введена система взаимосвязанных биологических процессов, развивающихся в верхнем слое моря, которые условно отнесены к центру

данной акватории. Однако при решении практических задач необходимо знание распределения развития планктонного сообщества по всей акватории СЗЧМ. Поэтому целью настоящей работы является совершенствование двумерной модели развития планктонного сообщества СЗЧМ путем реализации трехмерной модели пространственно-временной изменчивости процессов развития биологических объектов экосистемы.

Методика исследования и используемые данные. Известно [2 – 4], что биомасса ихтиопланктона определяется продуктивностью фитопланктона и кормового зоопланктона. Вследствие этого ресурсы фитопланктона, зоопланктона и ихтиопланктона являются наиболее чувствительным индикатором всех природных последствий хозяйственной деятельности в регионе и целесообразно выбрать их в качестве основных характеристик экосистемы. Экспертные данные дают информацию о состоянии экосистемы СЗЧМ, характерном для 30^х – 70^х гг. XX в., т.е. до начала активного влияния антропогенного фактора. Для этого периода времени внутригодовая динамика биомассы фитопланктона характеризуется несколькими максимумами, количество и величины которых определяются параметрами среды и структурно – функциональными характеристиками планктонного сообщества.

В качестве внешних климатических условий, формирующих изменчивость планктонного сообщества экосистемы СЗЧМ, будем рассматривать годовой ход скорости ветра, температуры морской воды и речного стока, оказывающего влияние на соленость морской воды. Кроме того, важен учет возможного выноса с речным стоком биогенов и детрита. Среди внутренних факторов существенную роль в планктонном сообществе играет концентрация хлорофилла. Основной задачей является использование в динамической модели закономерностей поведения общего фитопланктона, холодолюбивого и теплолюбивого зоопланктона, личинок рыб и рыб, которые известны из многолетних наблюдений на СЗЧМ, полученных в черноморских экс-

педициях и имеющихся в литературных источниках [2–4]. Для поверхностной концентрации хлорофилла и температуры использовались сезонные данные спутниковых измерений в Черном море, полученные с помощью сканирующего оптического спектрометра MODIS (Aqua) [5].

Исходя из сформулированных целей моделирования, будем рассматривать концентрации следующих субстанций, характеризующих динамику морской экосистемы: общего фитопланктона, холодолюбивого зоопланктона, теплолюбивого зоопланктона, личинок хамсы, хамсы. Кроме концентраций живых организмов в модель экосистемы включим концентрации биогенных элементов и детрита. Моделируется известный из наблюдений годовой ход концентрации фитопланктона, обусловленный действием приводного ветра в зимний период (январь – февраль). Если в этот период времени ветер имеет скорость, превышающую 15 м/с в течение более 26 суток, то годовой ход концентрации фитопланктона имеет один максимум, приходящийся на август. В противном случае кривая годовой изменчивости фитопланктона имеет два максимума: весенний, в марте – июне и летний, в июле-августе. Чтобы учесть условия существования личинок, было установлено лимитирование их концентрации в зависимости от количества кормов и от количества рыб, производящих икру. Для этого принималось, что в каждый момент вре-

мени концентрация личинок определяется тем из этих двух влияющих факторов, который имеет наименьшее значение. С этой целью сравниваются между собой оба фактора и определяется тот из них, который имеет минимальное значение. Кроме того, учитывается конечное время, необходимое для развития рыб из личинок. Подобная зависимость введена и для лимитирования количества рыб. Анализ результатов наблюдений за процессами в морской экосистеме СЗЧМ, учитывающий перечисленные выше особенности динамики процессов планктонного сообщества дает возможность построить концептуальную модель экосистемы. Концептуальная модель формализуется с использованием метода ABC. При этом учитываются перечисленные выше особенности динамики процессов планктонного сообщества. Используем введенные выше обозначения для процессов, формирующих экосистему. Под переменными x_i являющимися функциями времени (t) и горизонтальных координат (x, y) будем подразумевать концентрации следующих субстанций: x_1 – фитопланктона PP, x_2 – холодолюбивого зоопланктона ZPC, x_3 – теплолюбивого зоопланктона ZPH, x_4 – личинок рыб LF, x_5 – рыб F, x_6 – биогенов B, x_7 – детрита D. Применяя стандартное уравнение метода ABC [1] и в соответствии с причинно-следственными связями получим следующую систему динамических уравнений модели:

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

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

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

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

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

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

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

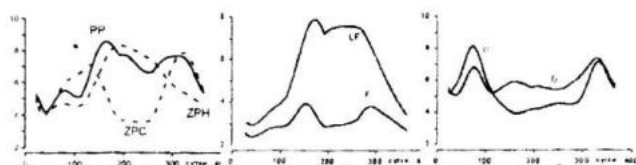
где a_{ij} , c_i , a_{if} – коэффициенты модели, W – скорость ветра, RF – речной сток.

В правые части уравнений модели входят операторы управления A_i и дополнительные функции f_i , которые представляют внешние влияния являющиеся функциями от $T(t, x, y)$ – температуры, $W(t, x, y)$ – скорости ветра, x, y – горизонтальных координат на акватории, t – текущего времени, формирующие изменчивость процессов в экосистеме СЗЧМ. Также вводится дополнительная функция влияния $f_i(t, x, y)$, зависящая от координат на плоскости акватории, которая представляет влияние поверхностной концентрации хлорофилла.

Результаты расчетов и их анализ.

Вычислительные эксперименты по модели проводились так, чтобы можно было выполнять сопоставление между собой сценариев развития 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. В качестве единицы измерения времени выбраны одни сутки. Расчеты проводились на 365 безразмерных единиц времени (шагов вычислений).

Рассмотрим сценарии развития процессов для слабых ветров (не более 15 м/с) в зимний период, декабрь – январь. Известно, что максимальная величина теплового воздействия на экосистему характерна для июля – августа, минимальная – для декабря – января. На расчетной кривой концентрации фитопланктона видны три максимума (рис. 1а) его развития.



Р и с. 1. Сценарии развития биологических процессов в морской экосистеме СЗЧМ при слабых ветрах в зимний период года (декабрь – январь)

Третий осенний максимум был воспроизведен моделью благодаря удачному использованию в модели параметризации процессов в экосистеме. В зимне –

весенний период активное развитие получают виды диатомового комплекса. Низкие значения продукции всегда характерны для первой половины зимнего периода. Как следует из результатов расчетов, показанных на рис. 1 а, с конца января по март первичная продукция увеличивается. Максимумы продукции зависят от метеорологических условий. Когда происходит быстрый прогрев вод в начале весеннего периода, максимум продукции возникает уже в марте (80 сутки). При медленном прогреве вод максимум смещается на конец весны. После весеннего максимума (на протяжении примерно месяца) скорость образования фитопланктона снижается из-за понижения концентрации биогенных элементов и появления гетеротрофных организмов (РР, В, D на рис. 1 а, б).

Поведение расчетной кривой концентрации фитопланктона в летний период года может быть интерпретировано следующим образом. В июне – первой половине августа (165 – 205 сутки) наступает основной максимум в развитии фитопланктона, благодаря развитию пиропитовых водорослей. В этих условиях продукция летнего максимума фитопланктона может превышать весеннюю продукцию. После завершения летнего периода в сентябре – октябре наступает позднее осеннее развитие с повышением первичной продукции. Однако в холодное время, несмотря на повышение первичной продукции, численность рыб уменьшается, поскольку исчезает комфортная для их обитания температура. 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 из-за малого освещения и влияния зимней вертикальной циркуляции, которая захватывает поверхностный слой, по мощности превышающий критическую глубину фотосинтеза. Адекватными следует считать результаты моделирования динамики холодолюбивого и теплолюбивого зоопланктона, изображенные на рис.1а пунктирными кривыми ZPC и ZPH. Они вполне правдоподобно отражают нарастание биомасс зоопланктона в зависимо-

сти от сезона, которое известно из наблюдений. Правдоподобно выглядит и соотношение организмов ZPC и ZPH в общей биомассе зоопланктона СЗЧМ.

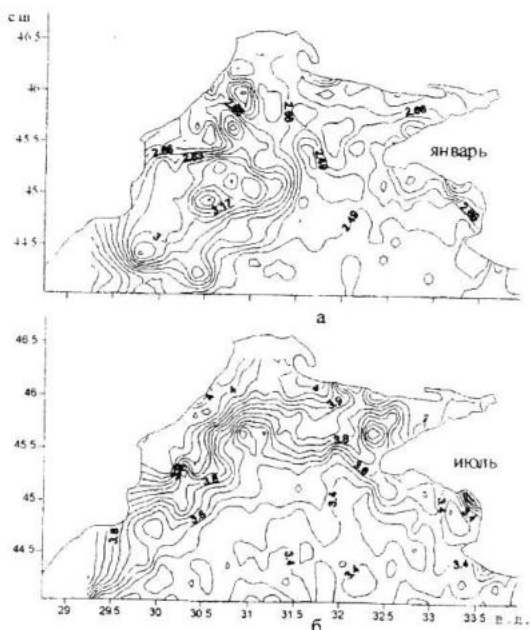
Самой многочисленной у хамсы является июльская генерация молоди. Она в основном определяет численность сеголеток в августе. Сопоставление процентов выживания икры и личинок в июле показывает, что у икры они отличаются от года к году в 1,1 раза, а у личинок – более 6 раз. Амплитуда межгодовых колебаний 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. 1 б, демонстрируют соответствие между численностью личинок и сеголеток хамсы. Как следует из рис. 1в, ход изменения концентраций биогенов в морской воде зимой совпадает а летом находится в противофазе с внутригодовым ходом концентрации фитопланктона и детрита, изображенных на рис. 1а,в. Подобная зависимость свидетельствует о значительном влиянии, которое оказывает рост концентрации фитопланктона на потребление биогенов и детрита. В модельных сценариях положительная связь концентрации фитопланктона и концен-

трации детрита (рис. 1в) явно выражена на протяжении всего года а концентрация биогенов преимущественно в холодные периоды.

Пространственно-временные расчеты дают возможность оценить распределение морских ресурсов по акватории СЗЧМ. Рассмотрим распределения концентрации рыб по акватории в периоды экстремальных достижений их численности приходящиеся на январь и июль приведенные на рис. 2 а,б. Из рис. 2 а,б можно видеть, что как при минимальной численности в январе так и при максимальной в июле концентрация рыб по акватории распределена неравномерно. Это характерно и на протяжении всего года.

Имеются районы, где в любой сезон года концентрация рыб наблюдается более высокая, чем в других местах. Эти районы совпадают с местами проникновения распресненных речных вод поступающих от стоков Дуная, Днепра и Буга. Для этих вод характерно повышенное содержание биогенов и детрита. Кроме того в них проявляются благоприятные для развития рыб температура воды, содержание хлорофилла и фитопланктона. Это прибрежные районы западной, северной и восточной частей акватории СЗЧМ. По всем сезонным распределениям концентрации рыб на акватории прослеживаются границы между их экстремальными концентрациями, которые хорошо соответствуют фронтальным зонам обусловленным водами речных стоков. Подобная картина распределений по акватории характерна и для других составляющих планктонного сообщества. То есть у всех составляющих планктонного сообщества наблюдаются общие черты распределений по акватории, обусловленные водами Дуная, Днепра и Буга.

О точных количественных характеристиках концентрации рыб судить рано, однако можно оценить относительные соотношения между отдельными частями СЗЧМ. Наибольшие скопления рыб наблюдаются в западной и северной частях акватории. В такие периоды различие концентрации рыб по районам достигает 4 раз при зимах со слабыми ветрами. Обычно на западе акватории концентрация рыб выше, чем в центре и



Р и с. 2. Зимнее и летнее распределения концентрации рыб по акватории СЗЧМ

на востоке, у Крымского побережья выше, чем в центре до 2 раз. В Каркинитском заливе отмечается повышение концентрации рыб в большей мере на севере где по сравнению с остальной его частью преобладает поступление распресненных вод приносящих биогены и детрит в основном за счет стока вод Днепра, что подтверждается и наблюдениями [6].

О правдоподобности мест скопления рыб можно судить по их совпадению с положением распресненных вод, комфортной температуры воды, поступлением биогенов и детрита за счет выноса водами речных стоков Дуная, Днепра и Буга. Расположение повышенной концентрации рыб в местах их гидрологического комфорта обитания может служить косвенным признаком достоверности расчетов районов повышенной концентрации рыб. Например в июле высокая температура воды 24 – 25 °С наблюдается в центральной и восточной частях акватории. При этом более высокая концентрация рыб наблюдается в западной и северной частях акватории, где температура воды ниже и составляет 21 – 23 °С, однако соответствует их гидрологическому комфорту, рис. 2б. Хотя это оценочные результаты, однако, они свидетельствуют о значительном росте численности рыб в условиях спокойной ветровой деятельности в зимний период предшествующий развитию рассматриваемых составляющих планктонного сообщества в СЗЧМ. Это также указывает на то, что колебания численности поколений рыб формируются под влиянием естественных условий.

Заключение. Выполнена задача по установлению связи планктонного сообщества моря с гидрометеорологическими параметрами (скоростью ветра, температурой воды) во времени и по акватории СЗЧМ. Получена связь биологических ресурсов моря с местами их гидрологического комфорта. Найдено, что распределения максимальных концентраций рассматриваемых составляющих планктонного сообщества в СЗЧМ совпадают с районами выноса речных вод Дуная, Днепра и Буга, где создаются отмеченные благоприятные условия для размножения и питания.

Применение динамической модели процессов, развивающихся в морской экосистеме, позволяет исследовать возможные сценарии внутригодовой изменчивости этих процессов при различных не типичных факторах внешних влияний климатического или антропогенного происхождения. Она также дает возможность выполнять оценочный прогноз развития планктонного сообщества и местоположение его экстремальных концентраций на акватории СЗЧМ как во времени, так и по площади.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимченко И.Е., Жоров В.А., Исумнова Е.М., Лазарчук И.П. Динамическая модель интегрированных процессов в экосистеме северо-западного шельфа Черного моря. Мор. Гидрофиз. Журн., 2007, №4. – С. 48 – 69.
2. Маштакова Г.П. Влияние вод материкового стока на развитие фитопланктона в северо-западной части Черного моря. Труды АзЧерНИРО, 1964, вып.23. – С. 55 – 69.
3. Белько К.Н. Сезонные колебания численности и биомассы зоопланктона в Черном море в районе Карадага в 1957 – 1959 гг. Тр. Карадаг. Биол. Ст. АН УССР, 1962, вып. 18. – С. 44 – 59.
4. Дехник Т.В. и др. Размножение и экология массовых рыб Черного моря на ранних стадиях онтогенеза Киев, Наукова Думка, 1970. – 211 с.
5. Бородин С. В., Давыдова Е.П., Калинин Е.И., Пустовойтенко В.В., Станичный С.В. Комплексный оперативный спутниковый мониторинг Черного моря // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2007. – С. 109 – 111.
6. Новицкий В.П. Влияние динамики вод на характер распределения океанографических показателей биологической продуктивности и морских организмов в северо-западной части Черного моря // Океанографические исследования в Черном море. – М.: Труды АзчерНИРО. – 1968. – вып.27. – С. 3 – 17.