

К.А.Слепчук\*, С.А.Майборода\*\*

*\*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь*

*\*\*Экспериментальное отделение*

*Морского гидрофизического института НАН Украины, пос.Кацивели*

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОДОВОЙ ДИНАМИКИ ФИТОПЛАНКТОНА, БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И КИСЛОРОДА В АКВАТОРИИ СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЫ**

Описывается использование одномерного варианта модели качества вод *МЕССА* с целью осуществления прогноза динамики фитопланктона, биогенных элементов и кислорода поверхностных вод акватории Севастопольской бухты. Данные, полученные в процессе вычислительного эксперимента, сопоставляются с натурными данными, осредненными за 2001 – 2005 гг. Сделан вывод о необходимости дальнейшей калибровки модели в целях улучшения модельного результата и дальнейшего использования трехмерного варианта модели.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *биогеохимическое моделирование, биогенные элементы, кислород, фитопланктон.*

Влияние океанологических факторов на экологическое состояние прибрежных морских акваторий при решении проблем рационального природопользования остается актуальным на протяжении многих десятков лет. Длительное загрязнение прибрежной полосы моря из различных источников (хозяйственно-бытовые и промышленные сточные воды, морской транспорт, речной сток, ливневые воды, стекающие с населенных, промышленных и сельскохозяйственных территорий и пр.) часто приводят к необратимым воздействиям на морскую среду и представляют большую опасность для здоровья людей при использовании акватории в целях рекреации. При этом без исследования гидрологического и гидрохимического режимов прибрежных вод изучить поведение загрязняющих веществ и влияния различных источников загрязнения на экологическое состояние морской среды не представляется возможным.

Чтобы контролировать качество водной среды, необходимо использовать математические модели. Созданию математической модели, как правило, предшествует экологический мониторинг исследуемой экосистемы и целый ряд специализированных экспериментов для оценки интенсивности связей между компонентами экосистемы [1].

Для оценки состояния морской экосистемы требуются натурные наблюдения из различных областей знаний: гидрофизики, гидрогеологии, гидрохимии, гидробиологии, метеорологии, которые выполняются на основе различных методик с разной точностью и дискретностью. Не всегда эти натурные наблюдения выполнены в достаточном количестве в разных точках пространства. Применение математического моделирования позволяет не только восполнить пробелы в точках отсутствия натуральных данных, но и осуществить модельную оценку состояния экосистемы в условиях изменчивости ее компонентов.

Кроме того, математическое моделирование позволяет получить прогноз

эволюции экосистемы при взаимном влиянии природно-климатических и антропогенных факторов.

**Материалы и методы.** В данной работе было проведено моделирование годовой динамики фитопланктона, биогенных элементов и кислорода в акватории Севастопольской бухты. Севастопольская бухта очень активно используется на протяжении более двух столетий в различных сферах народного хозяйства. Бухта является гаванью для военных и торговых судов. По берегам бухты расположена историческая часть города Севастополя, а также промышленные предприятия (судоремонтные и судостроительные, нефтебаза, ТЭЦ и др.). В бухте функционируют более 30 выпусков сточных вод – аварийных, временных и постоянно действующих, через которые поступает от 10 до 15 тыс. м<sup>3</sup> сточных вод в сутки. Основной объем стоков сбрасывается без очистки [1]. Бухта используется для судоходства и в рекреационных целях.

Экологический мониторинг Севастопольской бухты осуществляется как составная часть мониторинга морской среды Севастопольского региона. Совместные междисциплинарные исследования экосистемы Севастопольской бухты научными учреждениями Национальной академии наук Украины – Морским гидрофизическим институтом и Институтом биологии южных морей были начаты в 1998 г.

Для прогноза динамики фитопланктона, биогенных элементов и кислорода использовалась модель качества вод *MECCA (Model for Estuarine and Coastal Circulation Assessment)*. Эта модель состоит из трех блоков:

- гидродинамического, описывающего динамику вод (течения, интенсивность турбулентного обмена) на исследуемой акватории при различных гидрометеорологических условиях с учетом морфологических особенностей бассейна;

- блока переноса примеси, в котором рассчитывается перераспределение примеси в пространстве с течением времени под действием течений и диффузионного обмена;

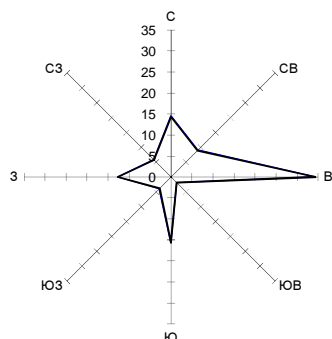
- химико-биологического блока, в котором определяются функции неконсервативности  $F_i(\vec{C}, x, y, z, t)$  моделируемых веществ, трансформация которых в каждой локальной точке пространства осуществляется химическим, физико-химическим и (или) биологическим путем [2].

В соответствии с принципами осреднения, модель может иметь различную пространственно-временную разрешающую способность. Калибровка и эксплуатация трехмерной прогностической модели водной экосистемы предъявляет высокие требования к вычислительным возможностям ЭВМ и требует значительных, зачастую нереальных затрат машинного времени и времени исследователя [2]. Поэтому на начальном этапе будет использоваться одномерный (с разрешением по вертикальной координате) вариант, где все данные осреднены в одной точке при средней глубине водоема. Для расчетов применялись метеоданные:

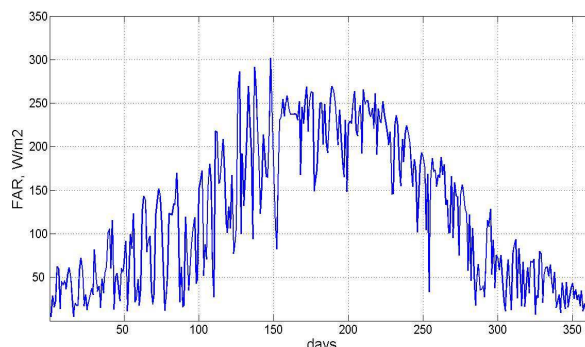
- срочные данные скорости и направления ветра за 2005 г., которые представлены розой ветров на рис.1;

- срочные данные температуры воздуха за 2005 г.;

- срочные данные фотосинтетически активной радиации за 2010 г., которые представлены на рис.2;



Р и с . 1 . Роза повторяемости (%) скорости ветра по направлениям за 2010 г.



Р и с . 2 . Фотосинтетически активная радиация за 2005 г.

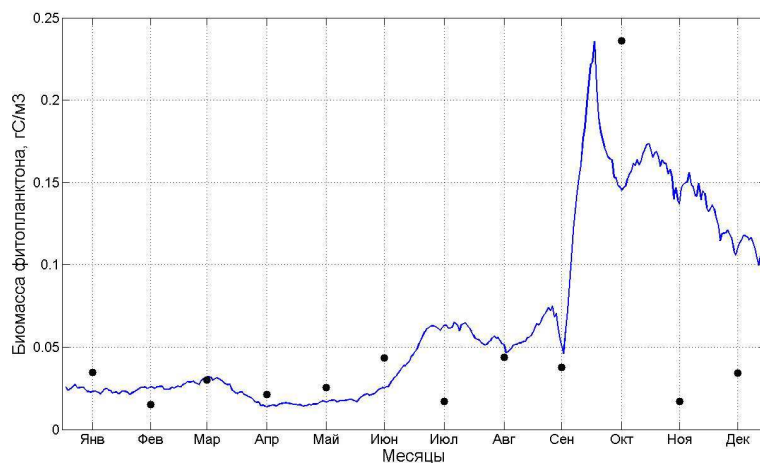
– среднемесячные данные влажности и балла облачности за 2005 г.

Также использовался годовой ход прозрачности, осредненный за 2001 – 2005 гг., начальные значения температуры морской воды, солености, концентрации фитопланктона, биогенных элементов, кислорода, органического фосфора и органического азота, которые задаются на 1 января расчетного года.

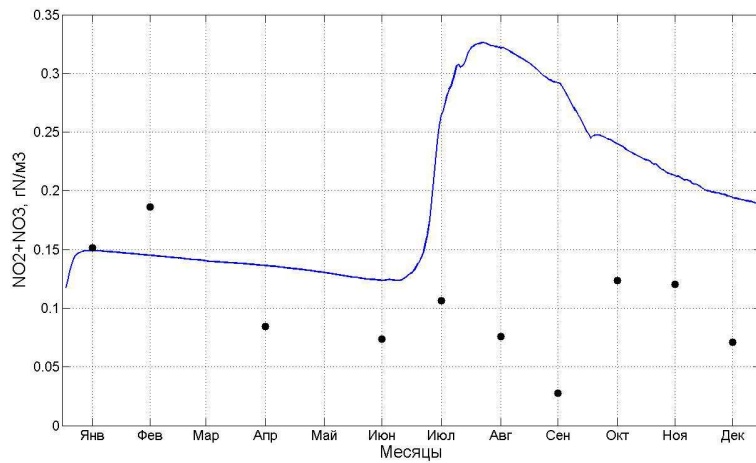
**Обсуждение результатов. Фитопланктон.** На рис.3 представлена динамика фитопланктона, где кривая линия соответствует данным, рассчитанным по модели, а точки – натурным данным, осредненным за 2001 – 2005 гг.

Натурные данные по фитопланктону изменялись от  $0,015 \text{ гС/м}^3$  в марте до  $0,236 \text{ гС/м}^3$  в октябре. Модельные данные – от  $0,011 \text{ гС/м}^3$  в апреле до  $0,235 \text{ гС/м}^3$  в октябре. Максимум биомассы фитопланктона в октябре в натурных данных объясняется «цветением» крупноразмерной диатомеи *Cerataulina pelagica* (C1.) Hend и *Nitzschia tenuirostris* Gran [3].

**Биогенные элементы** – материальная основа первичной продуктивности водоема и ведущий фактор в его эвтрофикации. Содержание в воде Севастопольской бухты минеральных форм фосфора (фосфатов) и азота (аммония, нитратов и нитритов) находится в прямой зависимости от источников их по-



Р и с . 3 . Динамика фитопланктона в Севастопольской бухте.



Р и с . 4 . Динамика азота нитритов и нитратов в Севастопольской бухте.

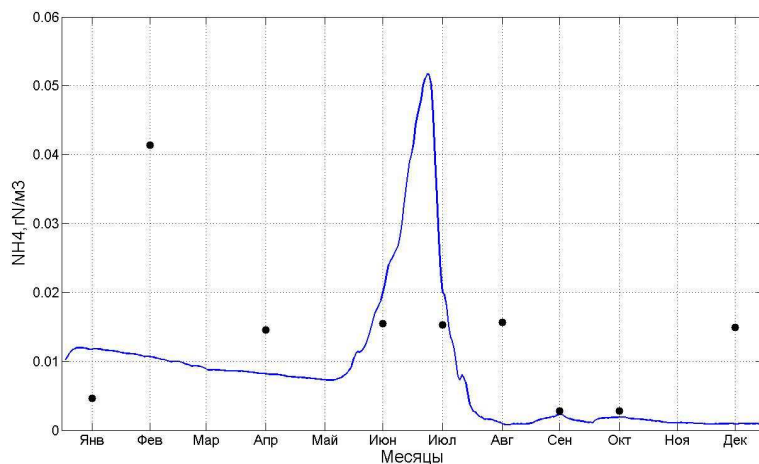
ступления (речной и ливневый стоки, муниципальные и промышленные сточные воды и пр.), а также от степени их вовлечения в биологические процессы.

На рис.4 представлена динамика азота нитратов и нитритов. Кривая линия – расчет модели, точки – натурные данные, осредненные за 2001 – 2005 гг.

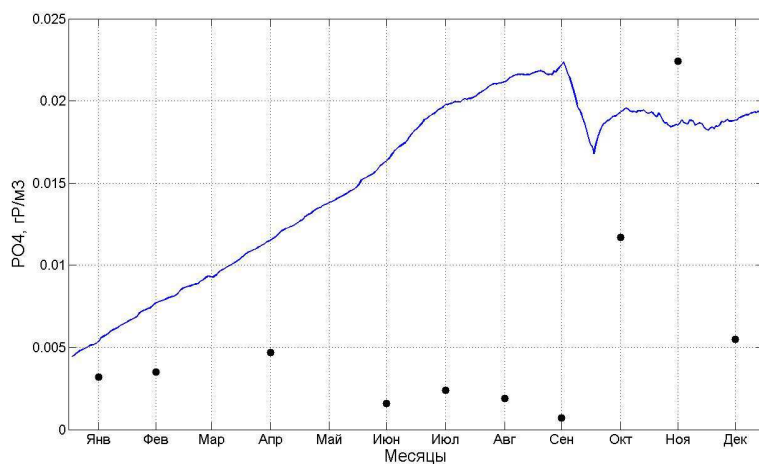
Натурные данные по нитритам и нитратам изменялись от 0,0204 гN/м<sup>3</sup> в сентябре до 0,0981 гN/м<sup>3</sup> в январе. Данные, рассчитанные по модели, плохо отражают динамику азота нитратов и нитритов, что требует дальнейшей калибровки модели. Но по модельным данным прослеживается связь максимума азота нитратов и нитритов в августе с максимумом цветения фитопланктона в октябре.

На рис.5 представлена динамика азота аммония. Кривая линия – расчет модели, точки – натурные данные, осредненные за 2001 – 2005 гг.

Диапазон изменчивости концентрации азота аммония в поверхностных водах определяется минимальным значением в феврале 0,0038 гN/м<sup>3</sup> и максимальным в декабре 0,0211 гN/м<sup>3</sup>. Данные, рассчитанные по модели, не отражают максимума азота аммония в океанологическую зиму, однако, макси-



Р и с . 5 . Динамика азота аммония в Севастопольской бухте.



Р и с . 6 . Динамика фосфора фосфатов в Севастопольской бухте.

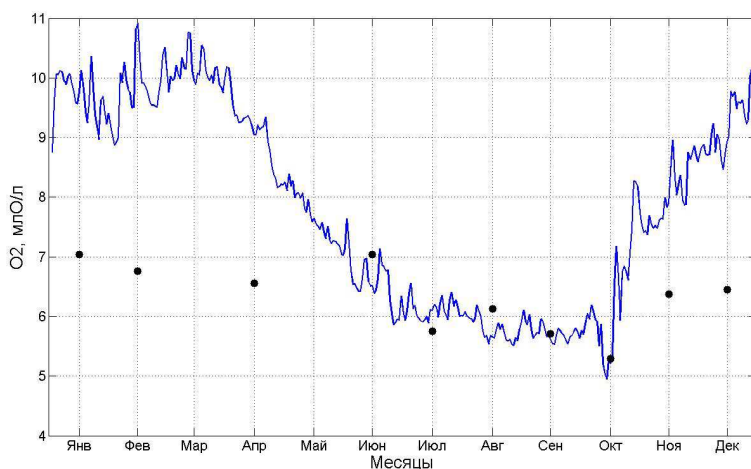
мум азота аммония в июле можно объяснить усилившимися процессами бактериальной деструкции органических веществ, когда потребление аммония фитопланктоном снижается [1].

На рис.6 представлена динамика фосфора фосфатов. Кривая линия – расчет модели, точки – натурные данные, осредненные за 2001 – 2005 гг.

Натурные данные по фосфатам изменялись от 0,001 гР/м<sup>3</sup> в сентябре до 0,014 гР/м<sup>3</sup> в ноябре. Данные, рассчитанные по модели, подобных результатов не отображают.

**Растворенный кислород.** Сезонное распределение кислорода в бухте определяется двумя главными природными факторами: климатическими (температурный режим и гидродинамика вод) и биологическими. В апреле после конвективного перемешивания вод и весеннего массового «цветения» фитопланктона на поверхности и в придонных слоях наблюдаются максимальные концентрации кислорода.

На рис.7 представлена динамика кислорода. Кривая линия – расчет



Р и с . 7 . Динамика кислорода в Севастопольской бухте.

модели, точки – натурные данные, осредненные за 2001 – 2005 гг. Натурные данные по кислороду изменялись от 5,144 млО/л в августе до 7,324 млО/л в апреле. Данные, рассчитанные по модели, хорошо отражают динамику кислорода с июня по октябрь, но в остальные месяцы модель дает завышенные значения, что может быть объяснено тем, что модель не учитывает какие-то процессы, имеющие место в эти месяцы. И в модельных, и в реальных данных явно прослеживается связь кислорода с температурой, т.к. при высоких температурах воды интенсивность окислительных процессов усиливается и понижается растворимость кислорода.

**Выводы.** Моделирование биогеохимических процессов, протекающих при участии веществ естественного и антропогенного происхождения, играет важную роль при оценке состояния морских экосистем. Одномерный вариант модели в данной работе был использован с целью показать возможность применения модели и необходимость ее коррекции по отношению к отдельным компонентам экосистемы Севастопольской бухты. Модель хорошо отражает динамику фитопланктона, но существуют достаточно большие несоответствия между модельными и натурными данными в расчетах биогенных элементов, что может быть объяснено недостатком данных или неправильным учетом некоторых процессов в уравнениях динамики азота нитратов и нитритов, а также фосфора фосфатов. В уравнения блока эвтрофикации модели включены параметры (удельные скорости химико-биологических процессов) и коэффициенты в эмпирических уравнениях, описывающих изменчивость значений этих параметров в зависимости от характеристик среды и внешних факторов. Далее в одномерном варианте, привлекая математические методы оптимизации, можно будет варьировать эти параметры в рамках возможного диапазона их изменчивости, что позволит достичь максимального соответствия модельных результатов и данных наблюдений.

Авторы выражают благодарность Гидрометеорологической обсерватории г.Севастополя за предоставленные метеоданные, а также отделу планктона Института биологии южных морей НАН Украины за предоставленные данные по фитопланктону.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов В.А., Овсяный Е.И., Репетин Л.Н., Романов А.С., Игнатъева О.Г.* Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006.– 90 с.
2. *Иванов В.А., Тучковенко Ю.С.* Прикладное математическое моделирование качества вод шельфовых морских экосистем.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006.– 368 с.
3. *Лопухина О.А., Манжос Л.А.* Фитопланктон Севастопольской бухты (Черное море) в теплый и холодный периоды 2001 – 2002 гг. // Экология моря.– 2005.– вып.69.– С.25-31.

Материал поступил в редакцию 10.10.2012 г.

**АННОТАЦІЯ.** Описується використання одновимірного варіанта моделі якості вод МЕССА з метою здійснення прогнозу динаміки фітопланктону, біогенних елементів та кисню поверхневих вод акваторії Севастопольської бухти. Дані, отримані в

процесі обчислювального експерименту, зіставляються з натурними даними, усередненими за 2001 – 2005 рр. Зроблено висновок про необхідність подальшого калібрування моделі в цілях поліпшення модельного результату і подальшого використання тривимірного варіанту моделі.

*ABSTRACT.* The use of a one-dimensional version of the model of water quality MECCA is described, to forecast the growth of phytoplankton, nutrients and oxygen in the surface water area of the Sevastopol bay. The data obtained during computing experiment are compared with in situ data, which were averaged over 2001 – 2005. It is concluded that further calibration of the model in order to improve the model results and further use of the three-dimensional version of the model is needed.