

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВТРОФИКАЦИИ ВОД СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

---

**Abstract:** The three-dimensional numerical simulation model of water eutrophication of northwestern part of the Black Sea (NWBS) is developed. The model is calibrated on the base of the data of longterm ecological monitoring and is adapted to conditions of Dnieper-Bug and Odessa regions in NWBS.

**Key words:** eutrophication, numerical modelling, a northwestern part of Black Sea.

**Анотація:** Розроблено тривимірну числову імітаційну модель евтрофікації вод північно-західної частини Чорного моря (ПЗЧМ). Модель калібрована за даними багаторічного екологічного моніторингу й адаптована до умов Дніпровсько-Бузького й Одеського районів ПЗЧМ.

**Ключові слова:** евтрофікація, числове моделювання, північно-західна частина Чорного моря.

**Аннотация:** Разработана трехмерная численная имитационная модель эвтрофикации вод северо-западной части Черного моря (СЗЧМ). Модель калибрована по данным многолетнего экологического мониторинга и адаптирована к условиям Днепровско-Бугского и Одесского районов СЗЧМ.

**Ключевые слова:** эвтрофикация, численное моделирование, северо-западная часть Черного моря.

### 1. Введение

Северо-западная часть Черного моря (СЗЧМ) имеет следующие характерные особенности: наличие эстуарных областей четырех крупнейших черноморских рек – Дуная, Днепра, Южного Буга и Днестра; обилие мелководных заливов и лиманов, сообщающихся с открытым морем через узкие проливы; развитие в весенне-летний период обостренного сезонного пикноклина, обусловленного прогревом поверхностных вод и распреснением их под влиянием речного стока; доминирование ветровой составляющей в формировании циркуляции вод на большей части акватории. На основе термогидродинамической модели МЕССА (Model for Estuarine and Coastal Circulation Assessment; Hess, 1989) разработана трехмерная имитационная модель эвтрофикации вод этой шельфовой морской акватории [1, 2].

Цель представляемой работы заключается в описании особенностей структуры модели эвтрофикации, разработанной для северо-западной части Черного моря, представлении результатов калибровки ее параметров, адаптации и верификации.

### 2. Описание модели и результаты моделирования

Характерная особенность термогидродинамической модели – возможность ее использования для расчетов динамики вод и распространения примеси в морских акваториях, отдельные участки которых имеют меньший (подсеточный) размер в одном из горизонтальных направлений, чем шаг расчетной сетки (например, проливы, каналы, устья рек). В основу модели положена полная система уравнений гидротермодинамики в приближении Буссинеска, несжимаемости и гидростатики, включающая уравнения: движения для горизонтальных составляющих вектора скорости течения, гидростатического приближения, неразрывности, состояния, сохранения тепла и солей. Для моделирования течений и переноса субстанций на подсеточных масштабах в каналах или реках исходная система уравнений интегрировалась поперек потока (т.е. в нормальном к потоку направлении в горизонтальной плоскости). Новая система уравнений, используемая в модели, получена в результате объединения проинтегрированных поперек потока и исходных уравнений таким образом, чтобы при отсутствии канала (трехмерный поток) получалась исходная

система уравнений в традиционной форме, а при его наличии – осредненные поперек потока уравнения (двумерный поток). Численная реализация полученной системы уравнений выполнена в криволинейной по вертикали системе координат с использованием неявных конечно-разностных схем.

Метод решения гидродинамической задачи предусматривает расщепление полной скорости течений на среднюю по глубине скорость (баротропная составляющая) и отклонения от нее на каждом расчетном горизонте (бароклинная составляющая). Вертикальная турбулентная вязкость аппроксимируется на основе полуэмпирической теории турбулентности как функция устойчивости водной колонки и локального вертикального сдвига скорости течений. Коэффициенты горизонтального турбулентного обмена рассчитываются исходя из значения локального горизонтального сдвига баротропной составляющей скорости течений и пространственного шага горизонтальной конечно-разностной сетки.

Модель содержит блоки расчета потока тепла через поверхность моря (на основе метеорологических данных), усвоения гидрометеорологической информации на границах расчетной области и позволяет воспроизводить пространственно-временную изменчивость уровня моря, термохалинной структуры вод, трехмерного поля течений и интенсивности турбулентного обмена на временных отрезках от нескольких суток до годового цикла в акваториях морского шельфа со сложными морфологическими и гидрологическими характеристиками. Модель дополнена блоком переноса неконсервативной примеси, позволяющим описывать одновременное распространение в трехмерном пространстве до 15 неконсервативных элементов, обладающих различными свойствами.

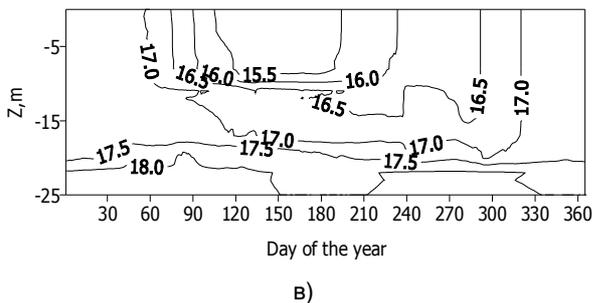
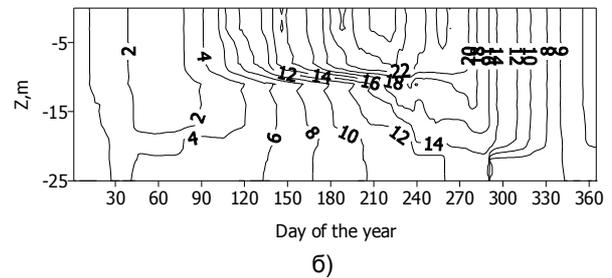
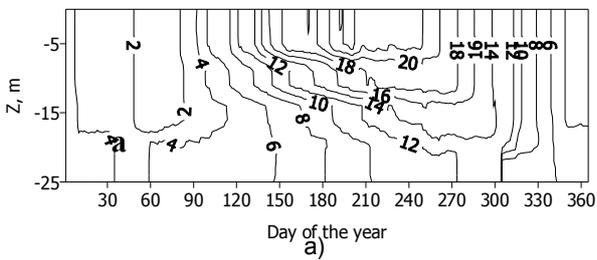


Рис. 1. Рассчитанная в 1-мерном варианте модели по метеорологическим данным внутригодовая изменчивость вертикального распределения температуры воды  $T$ , °C (а – 1983 г., б – 1994 г.) и солёности  $S$ , ‰ (в – 1994 г.)

Отдельные результаты численных экспериментов по адаптации гидротермодинамической модели МЕССА к условиям северо-западной части Черного моря приведены на рис. 1 – 3. Модель адекватно описывает образование и разрушение сезонного термоклина, динамику ВКС, распространение трансформированных речных вод, развитие в летний период ветрового прибрежного апвеллинга, пространственно-временную изменчивость термохалинной структуры вод в целом.

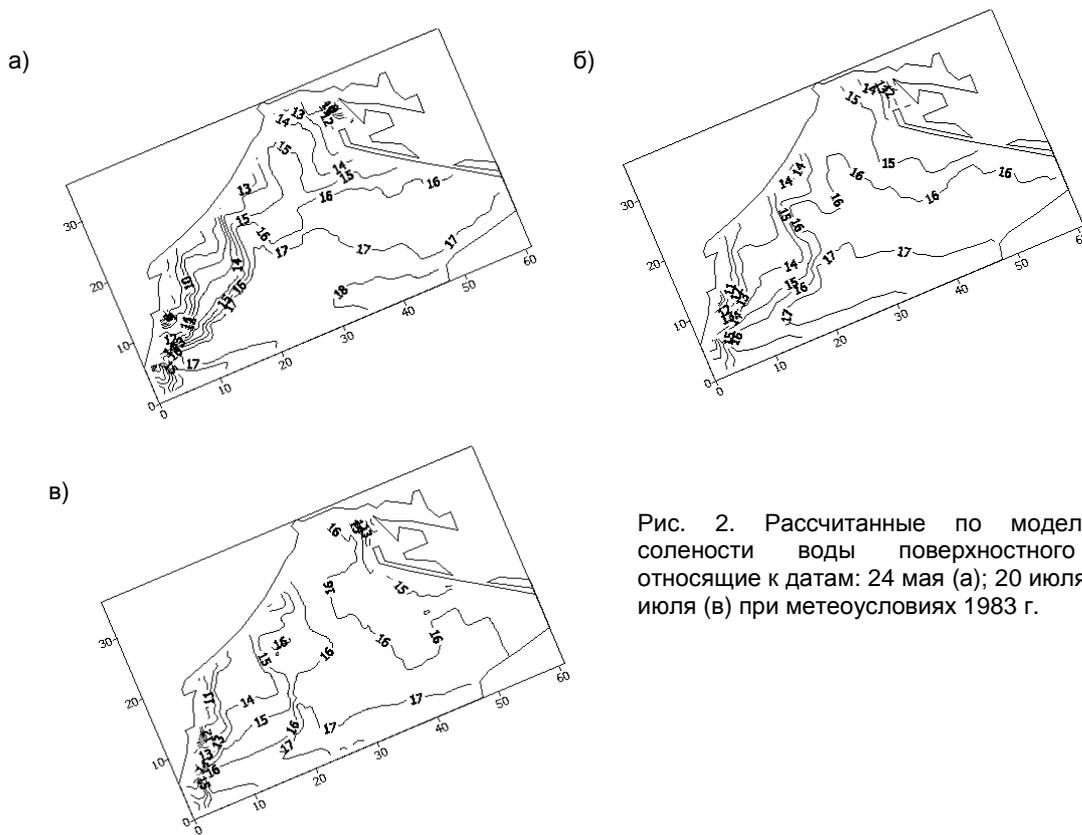


Рис. 2. Рассчитанные по модели поля солёности воды поверхностного слоя, относящие к датам: 24 мая (а); 20 июля (б) и 30 июля (в) при метеоусловиях 1983 г.

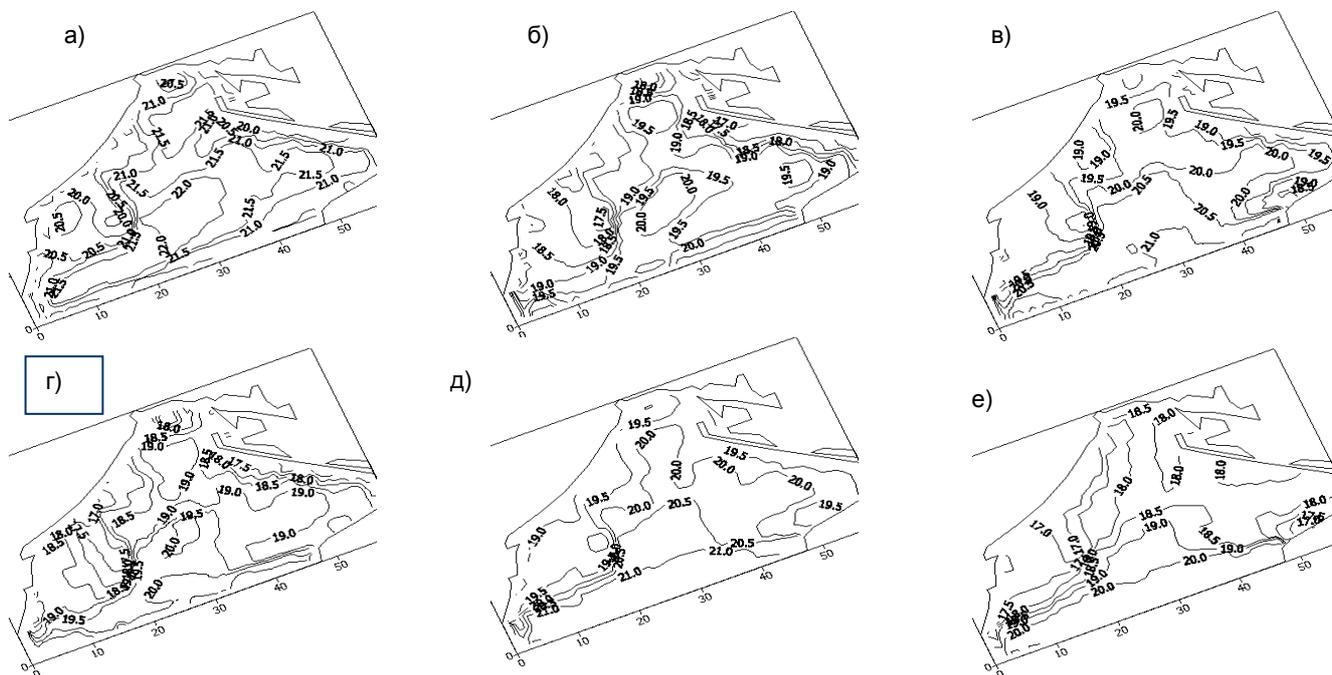


Рис. 3. Рассчитанные по модели поля температуры воды поверхностного слоя, относящие к датам: а) 20 июля; б) 25 июля; в) 9 августа; г) 14 августа; д) 29 августа; е) 13 сентября при гидрометусловиях 1983 г.

Химико-биологический блок модели представляет собой систему взаимообусловленных дифференциальных уравнений, которые описывают биогеохимические циклы биогенных элементов, продукцию и деструкцию органического вещества, динамику кислорода в локальной

точке водной среды. Переменными блока являются: фитопланктон, фосфор фосфатов, азот аммония, нитраты, растворенный органический фосфор и азот, взвешенный органический фосфор и азот, детритная и растворенная части биохимического потребления кислорода, которое рассматривается как кислородный эквивалент косного органического вещества, растворенный кислород. Рассчитывается также показатель БПК<sub>5</sub>. Диаграмма связей между химико-биологическими переменными модели эвтрофикации представлена на рис. 4.

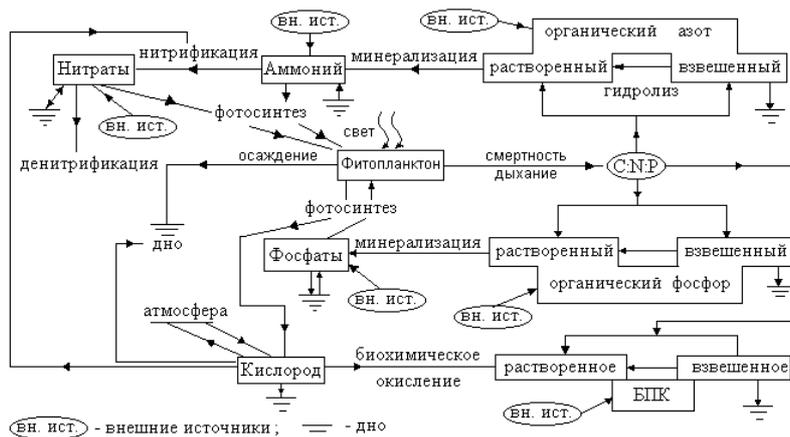


Рис. 4. Структурная диаграмма химико-биологического блока модели эвтрофикации вод северо-западной части Черного моря

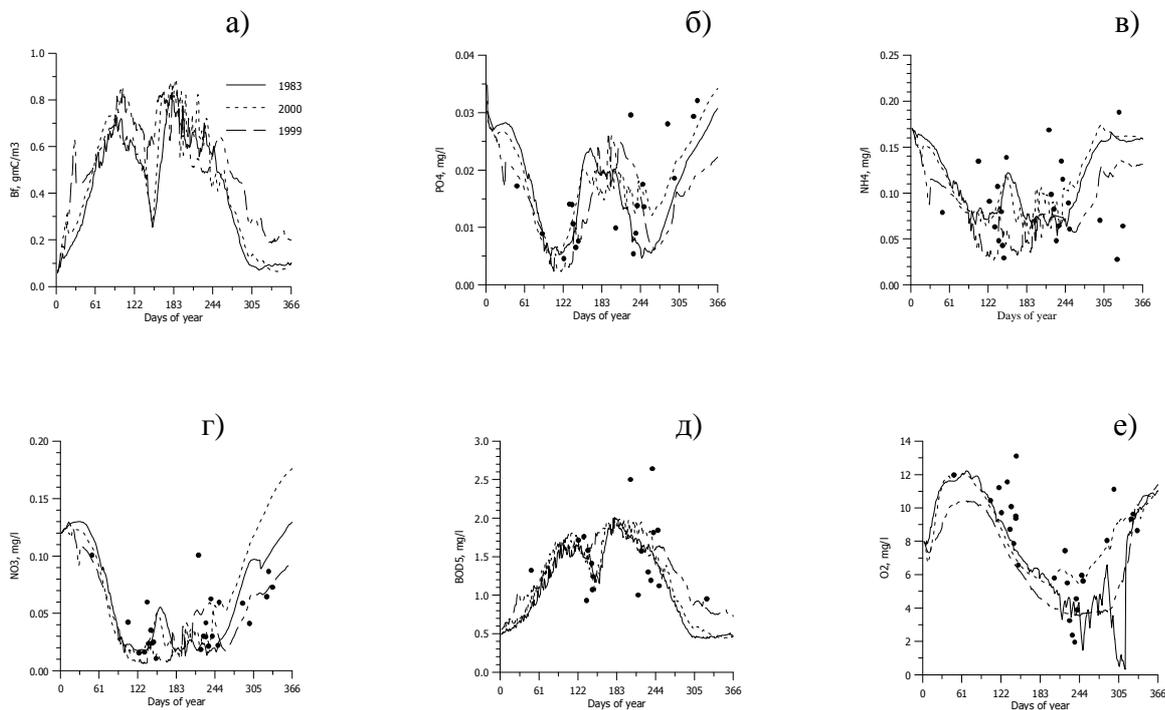


Рис. 5. Рассчитанный в 1-мерном варианте модели эвтрофикации годовой цикл биомассы фитопланктона (а), гС/м<sup>3</sup>, концентрации фосфора фосфатов (б), мгР/л, азота аммония (в) и нитратов (г), мгN/л, БПК<sub>5</sub> (д), мгО<sub>2</sub>/л, в поверхностном слое и содержания кислорода (е), мг/л, в придонном слое Одесского района СЗЧМ при гидрометеорологических условиях различных лет. Точками отмечены осредненные по пространству полигона наблюдаемые значения, полученные в период мониторинга 1988 – 1999 г. в Одесском районе

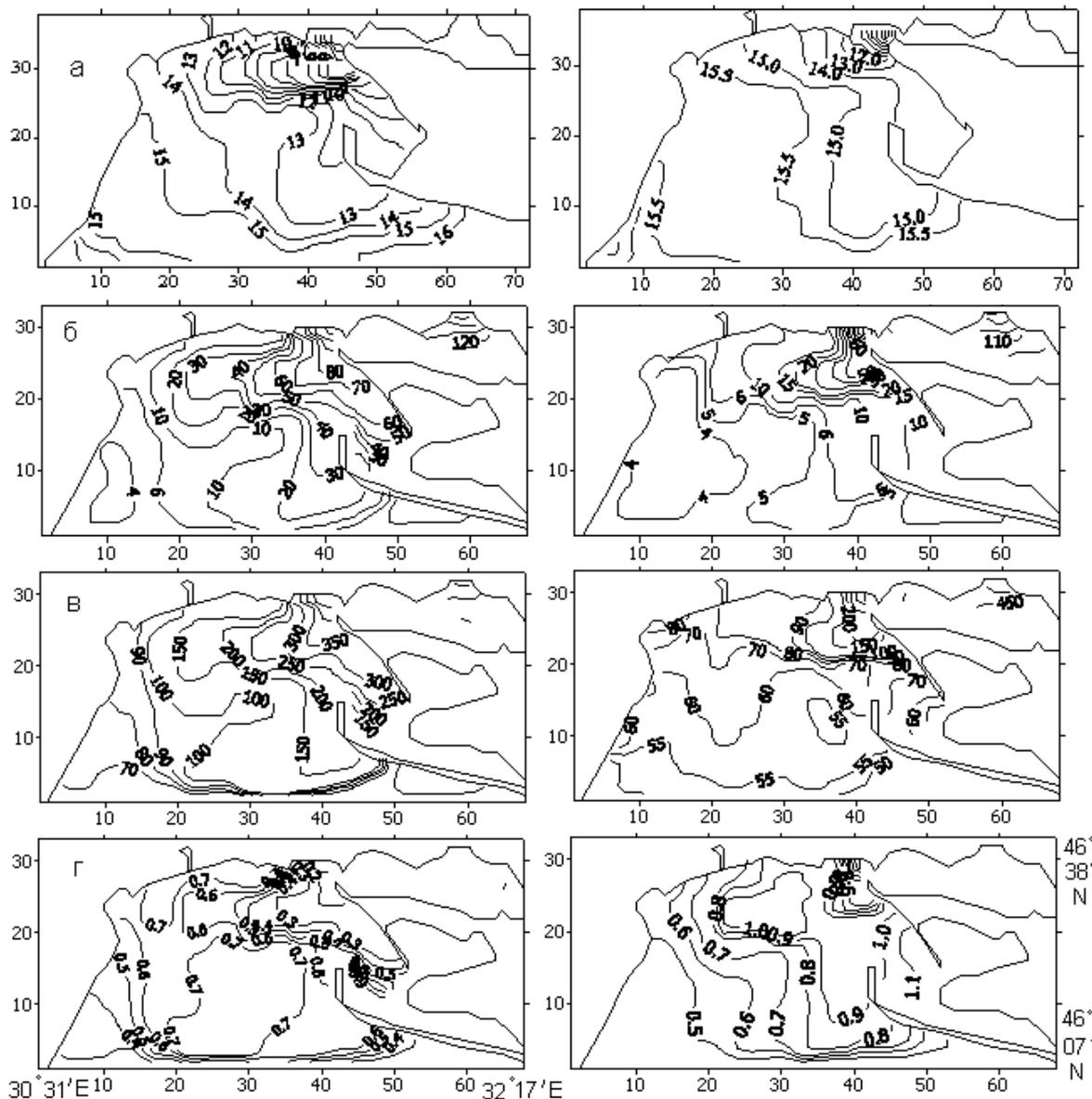


Рис. 6. Полученное в 3-мерном варианте модели пространственное распределение концентрации фосфатов (а, б),  $\text{мгP}/\text{м}^3$ , азота аммония (в, г),  $\text{мгN}/\text{м}^3$ , биомассы фитопланктона (д, е),  $\text{гC}/\text{м}^3$ , для Днепровско-Бугского района СЗЧМ в конце мая (слева) и начале августа (справа)

В модели циклы азота и фосфора на абиотическом уровне рассматриваются отдельно, что позволяет учесть возможные различия в скоростях минерализации органических форм фосфора и азота, а также в соотношении между азотом и фосфором в составе автохтонного и аллохтонного (в том числе поступающего из антропогенных источников) органического вещества. Удельные скорости химико-биологических процессов представлены в виде функций от характеристик состояния морской среды. Косное органическое вещество, выраженное в единицах азота, фосфора и кислорода, разделено на взвешенную и растворенную части, первая из которых осаждается под действием силы тяжести.

Калибровка параметров химико-биологического блока модели выполнялась на основе данных двенадцатилетнего экологического мониторинга Одесского района северо-западной части Черного моря, проводимого Одесским филиалом Института биологии южных морей. Результаты калибровки модели в 1-мерном (по вертикали) варианте приведены на рис. 5.

На рис.6 приведены некоторые результаты моделирования изменчивости пространственного распределения фосфатов, аммонийного азота и биомассы фитопланктона в поверхностном слое Днепровско-Бугского и Одесского районов СЗЧМ, полученные с помощью трехмерного варианта модели.

Численные эксперименты с моделью показали, что доминирующее влияние на продуктивность вод Одесского района СЗЧМ оказывает речной сток Днепра и Южного Буга. Максимумы биомассы фитопланктона соответствуют району Одесской банки и северной оконечности Тендровской косы. В Одесском районе максимальные биомассы в весенне-летний период отмечались в северной части акватории; визуально прослеживалось повышение концентраций биогенных элементов в фотическом слое у побережья, обусловленное функционированием береговых антропогенных источников загрязнения, расположенных в Одесском мегаполисе. Указанные закономерности подтверждаются данными полевых наблюдений.

С помощью модели были выполнены оценки относительных вкладов в эвтрофикацию вод акватории Одесского региона СЗЧМ береговых антропогенных источников и речного стока Днепра и Южного Буга [3].

### **3. Выводы**

Описанная в работе модель эвтрофикации вод северо-западной части Черного моря и приведенные результаты численных экспериментов с ней показали, что модель адекватно отражает основные особенности пространственно-временной изменчивости моделируемых гидрологических и химико-биологических характеристик вод исследуемой акватории. В дальнейшем модель может быть использована для исследования особенностей развития процесса эвтрофикации и прогнозирования возможных изменений уровня трофности и сапробности вод СЗЧМ в связи с возможными изменениями антропогенных нагрузок и климатическими изменениями характеристик речного стока.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Тучковенко Ю.С. Трехмерная математическая модель качества вод Днепровско-Бугского приустьевого района северо-западной части Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: НАН Украины, МГИ, 2005. – Вып. 12. – С. 374–391.
2. Тучковенко Ю.С. Математическая модель формирования термохалинной структуры и циркуляции вод в лиманах, приустьевых и шельфовых областях северо-западной части Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: НАН Украины, МГИ, 2003. – Вып. 9. – С. 138–153.
3. Тучковенко Ю.С., Сапко О.Ю. Эвтрофицирование вод Одесского региона северо-западной части Черного моря береговыми источниками загрязнения // Вісник Одеського державного екологічного університету. – Київ: КНТ, ОДЕКУ, 2005. – Вип.1. – С. 195–205.