

УДК 551.468.4:574.4

Тучковенко Ю.С., Тучковенко О.А. (Україна, Одеса)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ И ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОД СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

В естественных условиях биотический круговорот веществ в водных экосистемах сбалансирован таким образом, что в системе водная среда – биота имеет место фазовое равновесие по биогенным веществам: интенсивность процесса первичного продуцирования органического вещества фитопланктоном, в ходе которого потребляются минеральные соединения азота и фосфора, в конечном счете регулируется скоростью их регенерации при биохимическом окислении метаболических выделений и отмерших остатков гидробионтов (косного органического вещества) гетеротрофными бактериями. Неконтролируемое поступление в водную среду значительного количества биогенных веществ антропогенного происхождения влечет за собой увеличение скорости первичного продуцирования органического вещества, которое не успевает усваиваться организмами более высоких трофических уровней и отмирая создает благоприятную основу для развития гетеротрофных бактерий. В результате, резко сокращается время оборота биогенных веществ в экосистеме, увеличивается потребление кислорода на биохимическое окисление органического вещества при участии бактерий.

Процесс повышения уровня трофности акватории, т.е. уровня новообразования органического вещества в продукционно-биологическом процессе называется эвтрофикацией. Следствием процесса эвтрофикации на экосистемном уровне являются: изменение химического режима акватории, возникновение дефицита кислорода (гипоксии) либо полное его исчезновение в придонных слоях воды, резкое ухудшение условий обитания для высших гидробионтов, нарушение сбалансированности продукционно-деструкционных процессов, устойчивости, трофической структуры и динамики функционирования экосистемы.

Внутри водной экосистемы имеется значимый внутренний источник минеральных соединений биогенных элементов. Таковым является их регенерация в процессе биохимического окисления органического вещества. Поэтому для адекватного описания в модели негативных эффектов эвтрофикации необходимо рассматривать баланс продукционно-деструкционных процессов в экосистеме, т.е. замкнутые биогеохимические циклы основных биогенных элементов, определяющих первичную продукцию органического вещества в исследуемых участках акватории моря или водоемах.

Метод решения задачи. На основе термогидродинамической модели МЕССА (Model for Estuarine and Coastal Circulation Assessment; Hess, 1989) разработана трехмерная имитационная модель эвтрофикации вод северо-западной части Черного моря (СЗЧМ) [1, 2]. Эта шельфовая морская акватория 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.

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

(двумерний потік). Численна реалізація отриманої системи рівнянь виконана в криволинійній по вертикалі системі координат, з використанням неявних кінечно-різностних схем.

Метод рішення гідродинамічної задачі передбачає розщеплення повної швидкості течій на середню по глибині швидкість (баротропна складова) і відхилення від неї на кожному розрахунковому горизонті (бароклінічна складова). Вертикальна турбулентна в'язкість апроксимується на основі напівемпіричної теорії турбулентності як функція стійкості водної колонки і локального вертикального сдвигу швидкості течій. Коефіцієнти горизонтального турбулентного обміну розраховуються виходячи з значення локального горизонтального сдвигу баротропної складової швидкості течій і просторового кроку горизонтальної кінечно-різностної сітки.

Модель містить блоки розрахунку потоку тепла через поверхню моря (на основі метеорологічних даних), усвоєння гідрометеорологічної інформації на границях розрахункової області і дозволяє воспроизводити просторово-часову змінність рівня моря, термохалінної структури вод, тривимірного поля течій і інтенсивності турбулентного обміну на часових відрізках від декількох суток до річного циклу в акваторіях морського шельфу со складними морфологічними і гідрологічними характеристиками. Модель доповнена блоком переносу неконсервативної приміси, дозволяючим описувати одночасне розповсюдження в тривимірному просторі до 15 неконсервативних елементів, володіючих різними властивостями.

Отримані результати. Відокремлені результати чисельних експериментів по адаптації гідротермодинамічної моделі МЕССА до умов північно-західної частини Чорного моря наведені на рис. 1- 3. Модель адекватно описує формування і руйнування сезонного термокліна, динаміку ВКС, розповсюдження трансформованих річкових вод, розвиток в літній період вітрового прибережного апвеллінга, просторово-часову змінність термохалінної структури вод в цілому.

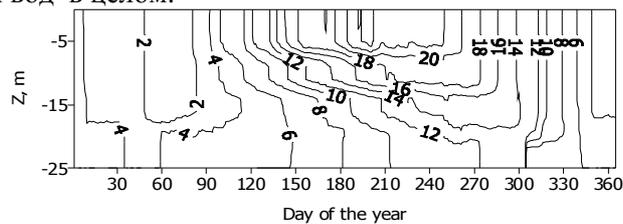


Рисунок 1 – Рассчитанная в 1-мерном варианте модели по метеорологическим данным 1983 г внутригодовая изменчивость вертикального распределения температуры воды T , °C.

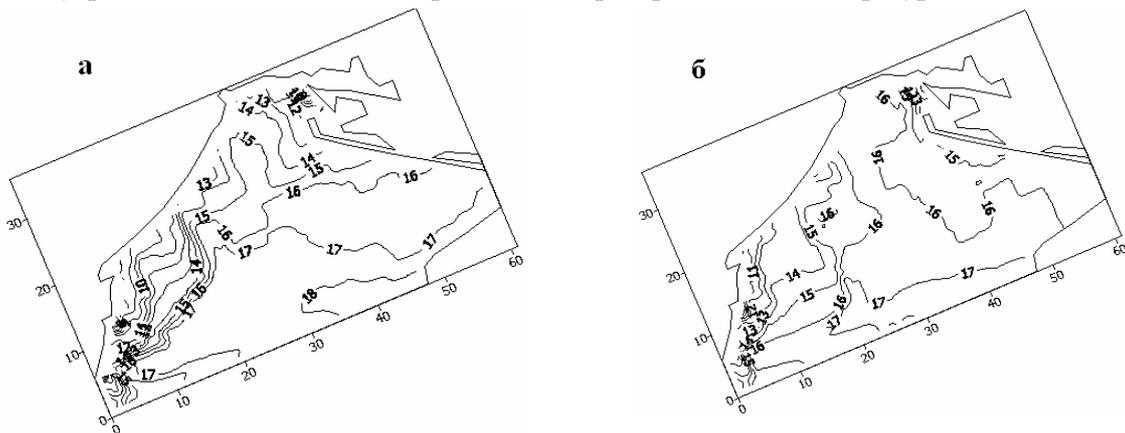


Рисунок 2 – Рассчитанные по модели поля солёности воды поверхностного слоя, относящиеся к датам: 24 мая (а) и 30 июля (б), при метеословиях 1983 г.

Хіміко-біологічний блок моделі представляє собою систему взаємообумовлених диференціальних рівнянь, які описують біогеохімічні цикли біогенних елементів, продукцію і деструкцію органічного речовини, динаміку кисню в локальній точці водної середовища. Змінними блоку є: фітопланктон, фосфор фосфатів, азот амонія, нітратів, розчинений органічний фосфор і азот, вважений органічний фосфор і азот, детритна і розчинена частини біохімічного споживання кисню, яке розглядається як кисневий еквівалент косого органічного речовини, розчинений кисень. Розраховується

также показатель БПК₅. Диаграмма связей между химико-биологическими переменными модели эвтрофикации представлена на рис. 4.

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.

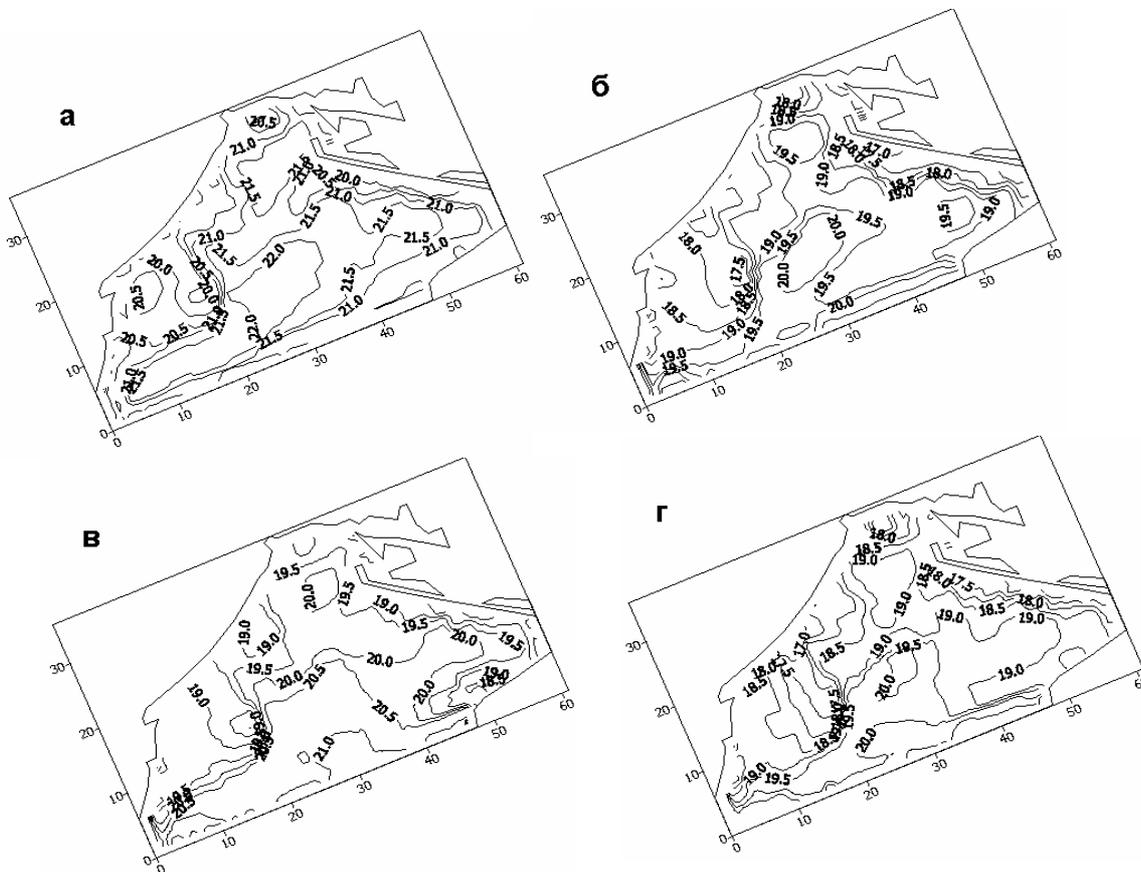


Рисунок 3 – Рассчитанные по модели поля температуры воды поверхностного слоя, относящие к датам: а) 20 июля; б) 25 июля; в) 9 августа; г) 14 августа, при гидрометусловиях 1983 г.

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

антропогенних источников загрязнения, расположенных в Одесском мегаполисе. Указанные закономерности подтверждаются данными полевых наблюдений.

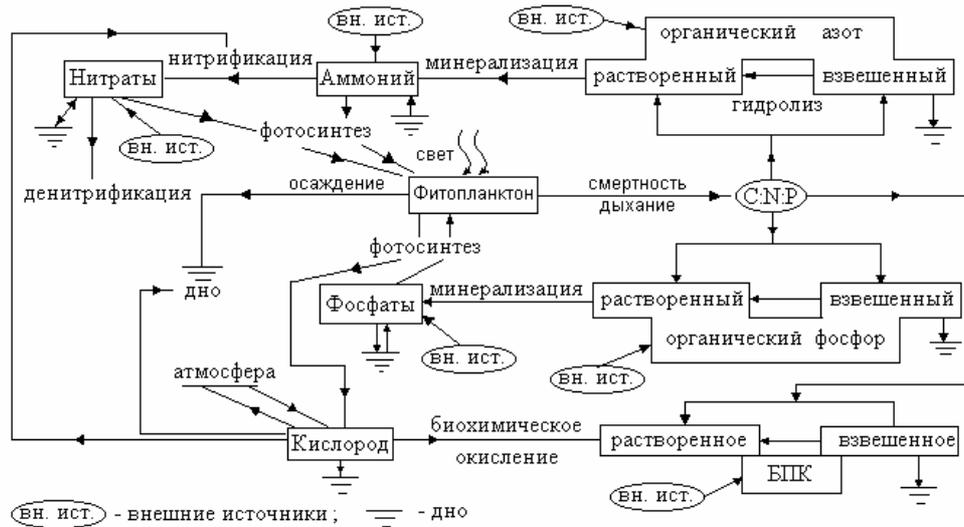


Рисунок 4 – Структурная диаграмма химико-биологического блока модели эвтрофикации вод северо-западной части Черного моря

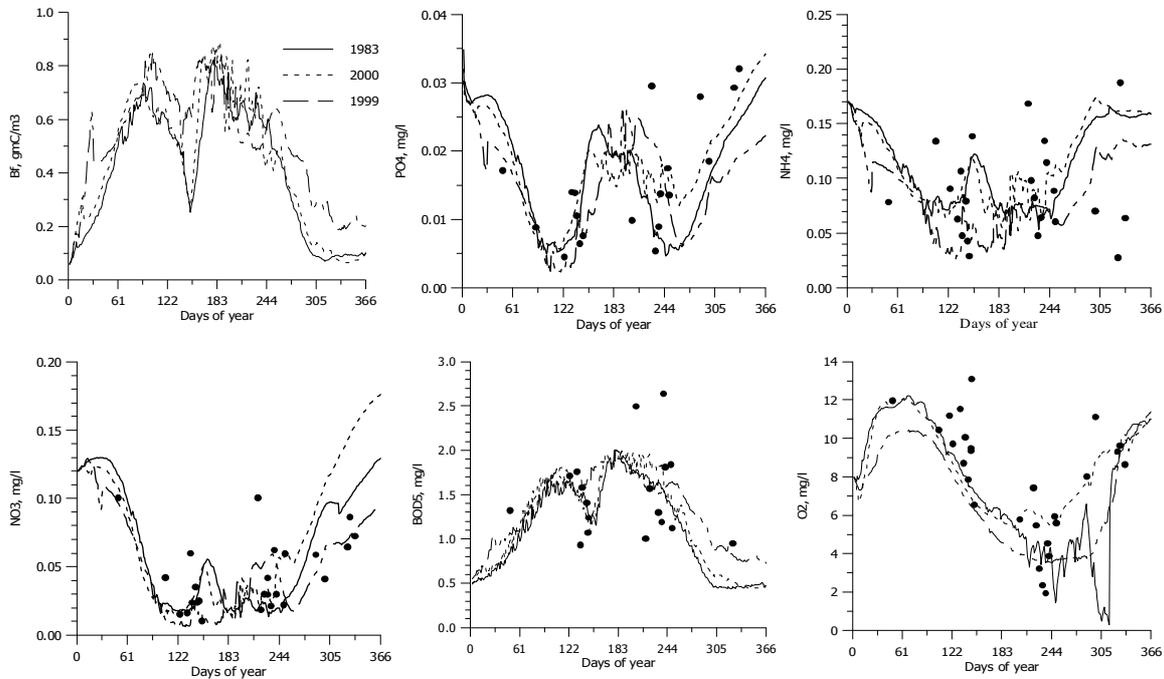


Рисунок 5 – Рассчитанный в 1-м варианте модели эвтрофикации годовой цикл биомассы фитопланктона (а), $гС/м^3$, концентрации фосфора фосфатов (б), $мгР/л$, азота аммония (в) и нитратов (г), $мгN/л$, БПК₅ (д), $мгO_2/л$, в поверхностном слое и содержания кислорода (е), $мг/л$, в придонном слое Одесского района СЗЧМ при гидрометеорологических условиях различных лет. Точками отмечены осредненные по пространству полигона наблюдаемые значения, полученные в период мониторинга 1988 – 1999 гг. в Одесском районе

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. При решении задачи эвтрофикации модельные расчеты проводились в два этапа: с учетом и без учета сбросов биогенных веществ береговыми источниками загрязнения Одесского региона. Затем результаты расчетов сравнивались и в каждой точке расчетной области определялось процентное соотношение между полученными значениями моделируемых веществ, которое характеризует вклад береговых антропогенных источников в наблюдаемые в фотическом слое их концентрации.

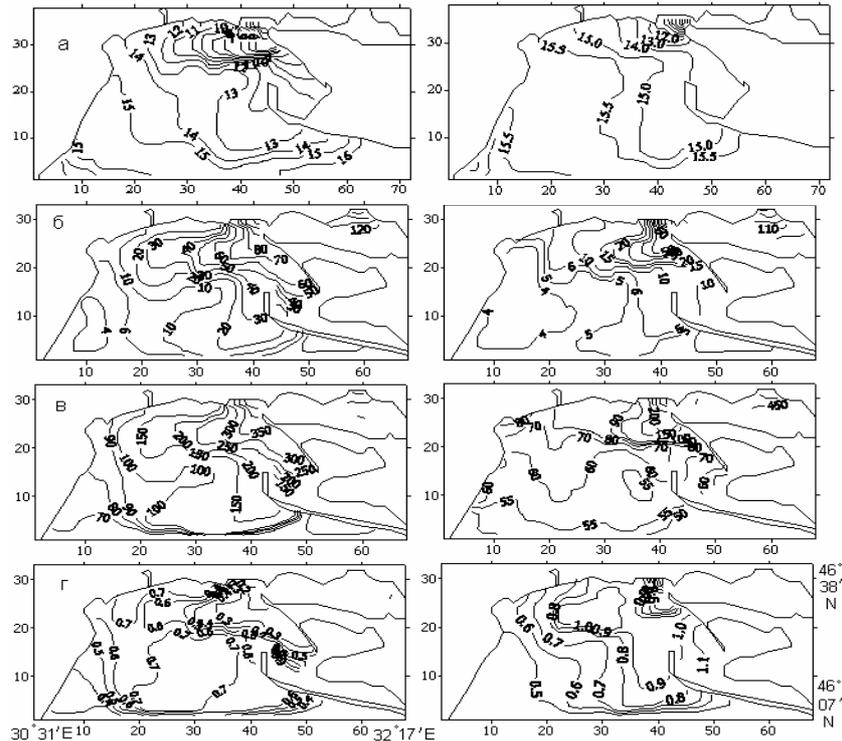


Рисунок 6 – Полученное в 3-мерном варианте модели пространственное распределение концентрации фосфатов (а, б), мгP/м^3 , азота аммония (в, г), мгN/м^3 , биомассы фитопланктона (д, е), гC/м^3 , для Днепроовско-Бугского района СЗЧМ в конце мая (слева) и начале августа (справа)

Выводы

Использование модели позволило установить насколько экологическая ситуация в исследуемой акватории может быть управляемой на региональном уровне. Показано, что путем нормирования сбросов береговых антропогенных источников возможно существенно улучшить экологическую ситуацию лишь в районах основных выпусков сточных вод в пределах двухмильной природоохранной прибрежной зоны; нормирование сбросов биогенных веществ береговыми источниками наиболее эффективно в весенний период; предпочтительно уменьшать сбросы загрязняющих веществ, содержащих фосфор – биогенный элемент, лимитирующий первичную продукцию органического вещества; уровень трофности вод в мористой части акватории формируется под доминирующим влиянием речного стока Днепра и Южного Буга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тучковенко Ю.С. Трехмерная математическая модель качества вод Днепроовско-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.