

40

2000

ISSN 0130-2914

**МЕТЕОРОЛОГІЯ,
КЛІМАТОЛОГІЯ
ТА ГІДРОЛОГІЯ**



Розділ 2. ДОПОВІДІ

2.1 МЕТЕОРОЛОГІЯ ТА АГРОМЕТЕОРОЛОГІЯ

<i>Иванов С.В.</i> Особенности восстановления полей вариационными методами над районами с различным разрешением сети наблюдений	20
<i>Медведев Г.А., Абдул Елах Хаза А. Салех.</i> Нелинейная региональная модель краткосрочных прогнозов адвективных туманов.....	26
<i>Тучина У.А.</i> Процессы блокирования и их связь с теорией солитонов.....	35
<i>Лотфи Мухамед Саид.</i> О моделировании вертикального профиля индекса преломления над водной поверхностью.....	41
<i>Хаджи-Страти Е.Д.</i> Особенности нижнетропосферного струйного течения в антициклоне над Украиной.....	45
<i>Конєва С.І.</i> Вологовміст та перенос вологи над Поділлям в умовах засушливого літа 1999р.....	52
<i>Михайлюк В.І.</i> Гумусонакопичення в гідроморфних ландшафтах північно-західного Причорномор'я.....	59
<i>Наумов М.М.</i> Биологическое время растения подсолнечника как грубая динамическая система.....	64
<i>Наумов М.М.</i> Уравнение старения вегетативного органа растения.....	74
<i>Омар Фарид.</i> Агроклиматическая оценка эталонных урожаев некоторых овощных культур.....	79

2.2 ГІДРОЛОГІЯ ТА ГІДРОХІМІЯ

<i>Бойко В.М.</i> Розрахунок шарів стоку весняного водопілля в басейні річки Сейм.....	87
<i>Шакирзанова Ж.Р.</i> Обоснование методики территориально общего прогноза максимальных расходов воды весеннего половодья на реках юго-западной части лесной зоны.....	97
<i>Витовская Е.Т.</i> О структуре и параметрах формул максимального стока весеннего половодья СНиП 2.01.14-83.....	104

<i>Нагаева С.П.</i> Методика расчета слоев паводочного стока рек Молдовы.....	111
<i>Науменко Л.В.</i> Расчетная продолжительность притока воды со склонов в русловую сеть в период весеннего половодья в бассейне р.Днестр.....	116
<i>Джабур Кхалдун.</i> О применимости некоторых региональных формул к расчету максимального стока дождевых паводков рек Карпат.....	123
<i>Гопченко Е.Д., Джабур Кхалдун.</i> О влиянии залесенности на естественную зарегулированность паводочного стока рек Карпат.....	132
<i>Овчарук В.А.</i> Исследование структуры формулы максимального стока весеннего половодья И.А.Железняка.....	137
<i>Краснова О.В.</i> О применимости формул предельной интенсивности к расчету максимальных модулей дождевого стока малых рек Закарпатья.....	142
<i>Фан Ван Тинь.</i> Групповые оценки статистических параметров годового стока рек западной части Украинского Полесья.....	150
<i>Фисина Н.И.</i> Применение метода интерполяции для подсчета стока биогенных элементов.....	160
<i>Колодеев Е.И., Дж. Мерка.</i> Оценка трендов в рядах поземного стока.....	167
<i>Лобода Н.С.</i> Разложение полей базисного стока на естественные, ортогональные составляющие и расчет грунтового стока рек западной части Украинского Полесья.....	173
<i>Тучковенко Ю.С.</i> Химико-биологический блок модели эвтрофикации бухты Картахена.....	181

The expansion of base flow fields on empirical orthogonal functions and calculation of river groundwater flow (west part of Ukrainian Poles'e)

Loboda N.S.

There have been investigated structure of base flow (west part of Ukrainian Poles'e) with empirical orthogonal functions. The approach for calculation of groundwater flow series of uninvestigated rivers have been developed and realised by using of results of the expansion of base flow on empirical orthogonal functions.

УДК 551.468.4:574.4

Гучковенко Ю.С., к.ф.-м.н.

Одесский филиал Института биологии южных морей АН Украины,
Centro de Investigaciones oceanograficas e hidrograficas (Cartagena de Indias,
Colombia)

Химико-биологический блок модели эвтрофикации бухты Картахена

Приведено описание химико-биологического блока модели эвтрофикации бухты Картахена (Колумбия). Модель использовалась для оценивания эффективности инженерных мероприятий, направленных на улучшение качества вод и кислородного режима бухты. Модель прошла тестирование и может быть использована при моделировании аналогичных водных объектов. В статье описаны также современный гидрохимический режим бухты и формирующие его факторы.

Бухта Cartagena расположена на колумбийском побережье Карибского моря в квадрате с координатами $10^{\circ}26'$ - $10^{\circ}16'$ с.ш. и $75^{\circ}30'$ - $75^{\circ}35'$ с.ш. (рис.1). Бухта имеет следующие морфологические характеристики: максимальная протяженность в меридиональном направлении составляет ≈ 16 км, в широтном - 9 км, площадь водной поверхности ≈ 82 км², средняя глубина 16 м, максимальная 26 м. Бухта состоит из двух частей: Внешней бухты, которая связана с Карибским морем двумя проливами, и Внутренней бухты, расположенной на севере и имеющей связь с морем только через Внешнюю бухту. На берегах Внутренней бухты расположен исторически известный город - порт Картахена, 40 % неочищенных хозяйственно-бытовых стоков которого сбрасывается в бухту. Кроме того, восточное побережье

Внешней бухты является индустриальной зоной города Картахена, в которой находятся 29 промышленных предприятий. Имея суммарный расход $\approx 1.42 \cdot 10^6$ м³/сут, атропогенные источники ежедневно поставляют в воды бухты ≈ 2.57 тонны минеральных форм азота, 0.48 тонны минерального фосфора и 22.2 тонны мертвого органического вещества (по БПК₅).

В южную часть Внешней бухты поступают пресные воды из канала Dique, соединяющего бухту с рекой Магдалена. Этот канал имеет искусственное происхождение. Расход канала Dique изменяется в течение года от 55 м³/с в сухой сезон года (февраль – апрель) до 250 м³/с в сезон дождей (сентябрь–октябрь). Влияние канала на гидрохимический режим бухты двойко. С одной стороны, канал является мощным поставщиком минеральных форм азота и фосфора, а также минеральной взвеси, которая определяет прозрачность вод бухты. С другой стороны, под влиянием пресного стока канала в бухте формируется мощный приповерхностный (0 - 4 м) пикноклин, который препятствует вертикальному водообмену поверхностных и придонных слоев. В результате, загрязняющие вещества, выносимые с водами канала, распространяются на акватории бухты в пределах поверхностного распресненного слоя, который одновременно является фотическим.

Глубина проливов, соединяющих бухту с морем, составляет в основном 0.5 – 3 м. Исключение представляет навигационный канал в южном проливе, который имеет ширину 100 м и глубину 30 м. Поскольку максимальные глубины в самой бухте Картахена достигают 26 м, то гидродинамическая промывка морскими водами придонных слоев бухты затруднена. Обновлению вод бухты в результате горизонтальной адвекции чистых морских вод способствует наличие приливных колебаний уровня моря на открытой морской границе. Важно отметить, что морские воды имеют большую плотность (за счет повышенной солености), чем распресненные воды бухты, и поэтому после прохождения мелководных проливов как бы стекают по дну в более глубокие части бухты, обновляя воды придонного слоя.

Ветровой режим бухты характеризуется преобладанием сильных (со среднесуточной скоростью до 8 м/с) северо-восточных ветров пассатного происхождения в сухой период года (январь – май) и слабых (до 3 м/с) ветров во влажный период (август – ноябрь).

В сезон дождей, когда расход канала Dique максимален, а вертикальный турбулентный обмен вследствие отсутствия ветров минимален, в приповерхностном слое бухты формируется резкий пикноклин, который препятствует массо- и газообмену между поверхностным и придонным слоями. Биогенные вещества, поступаю

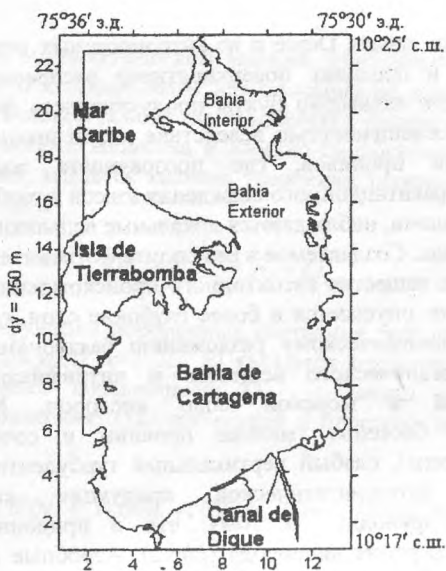


Рис.1 – Схема бухты Картахена

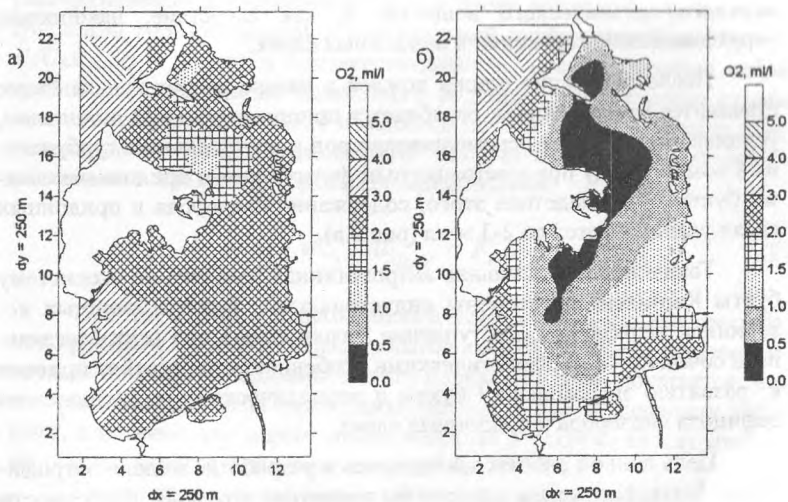


Рис.2 – Содержание кислорода (мл/л) в придонном слое бухты Картахена в сухой (а) и влажный сезоны года

щие с водами канала Dique и из антропогенных источников, распространяются в пределах поверхностного распресненного слоя. На большей части акватории бухты продуктивность фитопланктона лимитируется освещенностью вследствие малой прозрачности вод. Однако вблизи проливов, где прозрачность вод увеличивается вследствие гравитационного осаждения взвеси и разбавления чистыми морскими водами, наблюдаются локальные всплески продуктивности фитопланктона. Создаваемое в результате фотосинтеза фитопланктона органическое вещество автохтонного происхождения под действием силы тяжести опускается в более глубокие слои, где, отмирая, подвергается биохимическому разложению бактериями. На окисление мертвого органического вещества и нитрификацию расходуется растворенный в морской воде кислород. Морфологические особенности бассейна (мелкие проливы в сочетании большой глубиной бухты), слабый вертикальный турбулентный обмен вод и отсутствие фотосинтетической продукции кислорода ниже пикноклина приводят к тому, что в придонных слоях воды развивается дефицит кислорода (рис.2). Аэробные гидрохимические условия на большей части придонного слоя акватории бухты сменяются на анаэробные, что влечет за собой гибель аэробных организмов, замедление процессов биохимического разложения мертвого органического вещества и, как следствие, накопление неразложившейся органики в придонных слоях.

После окончания сезона дождей в январе расход канала Dique становится минимальным, ослабляется приповерхностный пикноклин, усиливается ветровое перемешивание вод и вертикальный турбулентный обмен между приповерхностным фотическим и придонным слоями бухты. Как следствие этого, содержание кислорода в придонных слоях увеличивается до 2-3 мл/л (рис.2.а).

Таким образом, сильная антропогенная нагрузка на экосистему бухты Картахена со стороны промышленных и антропогенных источников загрязнения, поступление загрязненных вод реки Магдалена, в сочетании с морфологическими особенностями бассейна привели к развитию эвтрофикации бухты и периодическому возникновению дефицита кислорода в придонных слоях.

Цель данной работы заключалась в разработке модели эвтрофикации бухты Картахена, которая бы адекватно отражала особенности ее гидрохимического режима и могла бы использоваться для оценки эффективности различных природоохранных мероприятий, направленных на улучшение ее кислородного режима.

Описание математической модели. Математическим аппаратом, традиционно используемым для описания на единой методической и математической основе взаимодействия физико-динамических процессов транспорта вещества и химико-биологических процессов его транслокации, является система уравнений переноса неконсервативных субстанций:

$$DC_i + LC_i = F_i + Q_i, \quad (1)$$

где C – вектор-функция переменных состояния экосистемы, элементами которой $C_i(x,y,z,t)$ ($i=1, \dots, R$) являются концентрации (биомассы) моделируемых компонентов; Q_i – вклад антропогенных источников загрязнения; D, L – временной и пространственный операторы задачи:

$$L = u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial}{\partial z};$$

$$D = \frac{\partial}{\partial t},$$

t – время; u, v, w – компоненты скорости течений в пространстве x, y, z , рассчитываемые в гидродинамическом блоке модели; k_x, k_y, k_z – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии; $F_i(C, x, y, z, t)$ – функции неконсервативности, представляющие собой составленные на основе балансового подхода алгебраические суммы членов, которые описывают локальные потоки вещества между компонентами модели, обусловленные различными (био)химическими реакциями и биологическими взаимодействиями:

$$dC_i / dt|_{local} = F_i \quad (2)$$

При построении химико-биологического блока модели трехмерное пространство делится на отдельные ячейки, соответствующие сеточным боксам гидродинамического блока. При этом полагается, что внутри бокса элементы экосистемы связаны только локальными потоками, в то время как перемещение вещества и энергии между ячейками осуществляется в результате переноса.

Гидродинамический блок модели представляет собой известную модель Хесса МЕССА [8] для эстуарных зон, модифицированную Лоуниным [9]. В частности, модель была дополнена блоком переноса

примеси, в котором для описания горизонтального переноса использовалась численная схема FCT [4,5], а для вертикального - TVD [7].

Химико-биологический блок модели включает в себя следующие параметры экосистемы: B_f - фитопланктон, B_b - бактериопланктон, B_{org}^{DET} - детрит, B_{org}^{DIS} - растворенное органическое вещество, C_{PO4} - фосфаты, C_{NH4} - аммоний, C_{NO2} - нитриты, C_{NO3} - нитраты, C_{O2} - растворенный кислород.

$$\frac{dB_f}{dt} = (1 - \gamma_f) \sigma_f(I_z, C_{PO4}, C_N) B_f - \mu_f B_f, \quad (3)$$

$$\sigma_f = V_f^{\max} f_1(I) f_2(C_N, C_{PO4}),$$

$$f_1(I) = \frac{1}{\Delta z} \int_{z_1}^{z_2} f_z(I_z) dz = \frac{2.718}{\Delta z \alpha} [\exp(-R_{z1}) - \exp(-R_{z2})],$$

$$R_0 = \frac{I_0}{I_{opt}}, R_z = R_0 \exp(-\alpha z),$$

$$f_z(I_z) = \frac{I_z}{I_{opt}} \exp\left(1 - \frac{I_z}{I_{opt}}\right), \quad I_z = I_0 \exp(-\alpha z),$$

$$f_2(C_N, C_{PO4}) = \min\left\{\frac{C_N}{Ck_N + C_N}, \frac{C_{PO4}}{Ck_{PO4} + C_{PO4}}\right\},$$

$$C_N = C_{NH4} + C_{NO3}$$

$$\frac{dB_b}{dt} = V_b^{\max} \left(\frac{B_{org}^{DIS}}{Bk_{org} + B_{org}^{DIS}} - \frac{B_b}{B_b^{\max}} \right) B_b, \quad (4)$$

$$\frac{dB_{org}^{DET}}{dt} = \lambda_f \eta_f \mu_f B_f \beta_{O2/C} \beta_{m3/L} - \delta B_{org}^{DET}, \quad (5)$$

$$B_{org}^{DIS} = B_{org}^{ant} + B_{org}^{nat} \quad (6)$$

$$\frac{dB_{org}^{nat}}{dt} = [(\gamma_f \sigma_f (I_z, C_{PO4}, C_N) + (1 - \lambda_f) \eta_f \mu_f) B_f + \mu_b B_b - \frac{V_B^{max}}{\theta} \frac{B_{org}^{nat}}{Bk_{org} + B_{org}^{DIS}} B_B \varepsilon_{ing}] \beta_{O2/C} \beta_{m3/L} + \delta B_{org}^{DET}, \quad (6.a)$$

$$\frac{dB_{org}^{ant}}{dt} = Q_{org}^{ant} - \frac{V_B^{max}}{\theta} \frac{B_{org}^{ant}}{Bk_{org} + B_{org}^{DIS}} B_B \varepsilon_{ing} \beta_{O2/C} \beta_{m3/L}, \quad (6.b)$$

$$\frac{dC_{PO4}}{dt} = \left[\left(\frac{1}{\theta} - 1 \right) \beta_{P/C} B_{org}^{nat} + \left(\frac{1}{\theta} - \omega_P \right) \beta_{P/C} B_{org}^{ant} \right] \frac{V_B^{max}}{Bk_{org} + B_{org}^{DIS}} \times \times B_b \beta_{m3/L} \varepsilon_{ing} - \sigma_f (I_z, C_{PO4}, C_N) B_f \beta_{P/C} \beta_{m3/L}, \quad (7)$$

$$\frac{dC_{NH4}}{dt} = \left[\left(\frac{1}{\theta} - 1 \right) B_{org}^{nat} \beta_{N/C} + \left(\frac{1}{\theta} - \omega_N \right) B_{org}^{ant} \beta_{N/C} \right] \frac{V_B^{max}}{Bk_{org} + B_{org}^{DIS}} \times \times B_b \beta_{m3/L} \varepsilon_{ing} - \chi \sigma_f (I_z, C_{PO4}, C_N) B_f \beta_{N/C} \beta_{m3/L} - v_{N1} C_{NH4} \varepsilon_{ing}, \quad (8)$$

$$\frac{dC_{NO2}}{dt} = v_{N1} C_{NH4} \varepsilon_{ing} - v_{N2} C_{NO2} \varepsilon_{ing}, \quad (9)$$

$$\frac{dC_{NO2}}{dt} = v_{N2} C_{NO2} \varepsilon_{ing} - (1 - \chi) \sigma_f (I_z, C_{PO4}, C_N) B_f \beta_{N/C} \beta_{m3/L} - v_{DN} (C_{NO3} - C_{NO3}^{crit}) - v_{foto} (C_{NO3} - C_{NO3}^{crit}), \quad (10)$$

$$\frac{dC_{CO2}}{dt} = \left[\sigma_f (I, C_{PO4}, C_N) B_f - \frac{V_b^{max}}{\theta} \frac{B_{org}}{Bk_{org} + B_{org}} B_b \varepsilon_{ing} \right] \beta_{O2/C} \times \times \beta_{m3/L} - (\beta_{O2/N1} v_{N1} C_{NH4} + v_{N2} \beta_{O2/N2} C_{NO2}) \varepsilon_{ing} - Q_{O2}^{bot} \pm Q_{O2}^{atm} \quad (11)$$

Здесь t – время, [час]; B_f, B_b – биомассы фитопланктона и бактерий соответственно, [мгС/м³]; $C_{O_2}, C_{PO_4}, C_{NH_4}, C_{NO_2}, C_{NO_3}$ – содержание в морской воде кислорода, фосфора фосфатов, аммонийного, нитритного и нитратного азота соответственно, [мг/л]; B_{org}^{DET} – содержание взвешенного мертвого органического вещества (детрита), [мгО₂/л]; B_{org}^{DIS} – содержание растворенного органического вещества (РОВ) в морской воде, [мгО₂/л], которое складывается из органического вещества антропогенного B_{org}^{ant} и естественного B_{org}^{nat} происхождения; I_f^{max} – максимальная удельная скорость роста фитопланктона, [ч⁻¹]; I_0 – поток фотосинтетически активной солнечной радиации, проникающий через поверхность моря, [Вт/м²]; I_{opt} – оптимальная для фотосинтеза освещенность, [Вт/м²]; I_z – освещенность на глубине z , [Вт/м²]; $\alpha = \alpha_o + \alpha_{sus} + \alpha_f$ – суммарный коэффициент ослабления освещенности с глубиной, [м⁻¹], составными частями которого являются α_o – коэффициент экстинкции, характерный для океанских вод, α_{sus} и α_f – коэффициенты, учитывающие вклад минеральной взвеси и фитопланктона (самозатемнение) в ослабление потока фотосинтетически активной солнечной радиации: $\alpha_{sus} = 1.31 C_{susp}^{0.542}$, $\alpha_f = 0.0088B_f + 0.054B_f^2$, где C_{susp} – концентрация минеральной взвеси [мг/л]; Ck_N, Ck_{PO_4} – константы полунасыщения (Михаэлиса-Ментен) процесса утилизации фитопланктоном минеральных форм азота и фосфора [мг/л]; $\chi = C_{NH_4} \phi / [\phi C_{NH_4} + (1 - \phi) C_{NO_3}]$ – доля минерального азота, потребляемого фитопланктоном в форме аммония, где ϕ – коэффициент предпочтительности усвоения фитопланктоном аммония по отношению к нитратам; γ_f – доля продукции фитопланктона, идущая на обеспечение его жизнедеятельности (дыхание); μ_f – удельная скорость гибели фитопланктона [ч⁻¹]; σ_f – удельная скорость роста фитопланктона [ч⁻¹], определяемая условиями освещенности I и наличием в воде биогенных веществ – минеральных форм азота C_N и фосфора C_{PO_4} ; η_f – доля лабильной органики в отмершем органическом веществе фитопланктона; V_b^{max} – максимальная удельная скорость роста бактериопланктона, [ч⁻¹]; Bk_{org} – константа полунасыщения роста бактерий, равная концентрации органического субстрата, при которой реальная удельная ско-

рость роста бактерий равна половине от максимальной, $[\text{мгO}_2/\text{л}]$; B_b^{\max} - максимально возможная биомасса бактерий, $[\text{мгC}/\text{м}^3]$; δ - удельная скорость автолиза детрита, $[\text{ч}^{-1}]$; λ_f - доля детритной фракции в клетках фитопланктона ($0 < \lambda_f < 1$); $\mu_B = V_B^{\max} B_B^2 / B_B^{\max}$ - удельная скорость смертности бактериопланктона, (ч^{-1}) ; θ - экономический коэффициент для учета затрат энергии на рост; $\varepsilon_{\text{ing}} = f(C_{O_2})$ - параметр ингибиции процессов биохимического окисления органического вещества и нитрификации при дефиците содержания кислорода в морской воде ($0 < \varepsilon_{\text{ing}} < 1$), рассчитываемый по формуле: $\varepsilon_{\text{ing}} = C_{O_2} / (C_{O_2} + k_{O_2})$, где Ck_{O_2} - константа полунасыщения процесса, $[\text{мг}/\text{л}]$; $\omega_P = \beta_{P/C} / \beta_{P/C}^{\text{ant}}$, $\omega_N = \beta_{N/C} / \beta_{N/C}^{\text{ant}}$ - соотношения между содержанием фосфора и азота в органическом веществе естественного и антропогенного происхождения; v_{N1} , v_{N2} - удельная скорость первой и второй стадий нитрификации, $[\text{ч}^{-1}]$; v_{DN} - удельная скорость денитрификации в придонных слоях, где содержание кислорода менее $1 \text{ мг}/\text{л}$, $[\text{ч}^{-1}]$; v_{foto} - удельная скорость убыли нитратов $[\text{ч}^{-1}]$ за счет физико-химических процессов в поверхностном слое; $C_{NO_3}^{\text{crit}}$ - минимальная концентрация нитратов, при которой прекращаются процессы нитрат-редукции, $[\text{мг}/\text{л}]$; $\beta_{O_2/C}$ - коэффициент перевода углеродных единиц органического вещества мгC в кислородные мгO_2 , $[\text{мгO}_2/\text{мгC}]$; $\beta_{P/C}$, $\beta_{N/C}$, $\beta_{P/C}^{\text{ant}}$, $\beta_{N/C}^{\text{ant}}$ - стехиометрические коэффициенты перехода от мгC к мгP , $[\text{мгP}/\text{мгC}]$, и мгN , $[\text{мгN}/\text{мгC}]$, для мертвой органики естественно-го $B_{\text{org}}^{\text{nat}}$ и антропогенного $B_{\text{org}}^{\text{ant}}$ происхождения; $\beta_{O_2/N1}$, $\beta_{O_2/N2}$ - кислородные эквиваленты 1-й и 2-й стадий нитрификации, $[\text{мгO}_2/\text{мгN}]$; $\beta_{m^3/L} = 0.001$ - коэффициент перехода от кубических метров к литрам, $(\text{м}^3/\text{л})$.

Поглощение кислорода донными осадками в первом приближении может быть оценено с помощью эмпирической зависимости, приведенной в [10], на основе сведений о содержании кислорода в воде C_{O_2} :

$$Q_{O_2}^{\text{bot}} = a \cdot f(x, y) (C_{O_2})^b, \quad (12)$$

где $|Q_{O_2}^{bot}| = \text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$, $|C_{O_2}| = \text{мл} \cdot \text{л}^{-1}$, $a = \text{const}$ и $b = 0.66$ – эмпирические коэффициенты, $f(x, y)$ – функционал, описывающий пространственную изменчивость поглощения кислорода донными осадками и определяемый как $f(x, y) = F_{org}^{act}(x, y) / F_{med}^{act}$, где $F_{org}^{act}(x, y)$ – поток органического вещества в донные отложения, полученный по модели в каждой расчетной точке, F_{med}^{act} – средняя величина потока органики в современных условиях.

Газообмен кислородом с атмосферой рассчитывается на основе зависимости вида [1]:

$$Q_{O_2}^{atm} = \gamma_{e,i} n_v n_t (C_{O_2}^S - C_{O_2}), \quad (13)$$

где $Q_{O_2}^{atm}$ – поступление (инвазия) или выделение (эвазия) кислорода, $[\text{мг}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}]$, $\gamma_{e,i}$ – коэффициент инвазии (эвазии), $[\text{л}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}]$, n_t – температурный коэффициент (при $T = 30^\circ\text{C}$, $S = 30\text{--}35 \text{‰}$, $n_t = 1.1$), n_v – интегральный ветровой коэффициент:

$$n_v = \begin{cases} 1.0 + 0.27w^2, & \text{для } -w \leq 8 \text{ м/с} \\ -7.4 + 0.4w^2, & \text{для } -w > 8 \text{ м/с} \end{cases}, \quad (14)$$

w – скорость ветра, $[\text{м}/\text{с}]$; $C_{O_2}^S$ – насыщающая (при данной T° и S) концентрация кислорода $[\text{мг}/\text{л}]$.

Оценка констант химико-биологического блока выполнялась на основе информации, приведенной в научной литературе [2,3,6,10], данных лабораторных и натуральных экспериментов. Константы, описывающие скорость химико-биологических процессов, приводились к температурным условиям *in situ*. Основным критерием выбора того или иного значения констант модели являлось, с одной стороны, максимальное соответствие динамики описываемых моделью процессов данным натуральных наблюдений, а, с другой стороны, соответствие этих значений оценкам, полученным другими исследователями.

Калибровка модели на основе данных натуральных наблюдений выполнялась последовательно в трех вариантах: нульмерном (модель годовой динамики химико-биологических параметров в фотическом слое), одномерном (модель годовой динамики вертикального распре-

деления компонент экосистемы с учетом внешних потоков вещества и энергии) и трехмерном.

Результаты моделирования. Численные эксперименты с трехмерной моделью эвтрофикации бухты Картахена проводились в два этапа. На первом этапе рассчитывались типовые поля элементов экосистемы бухты для сухого и влажного сезонов года. Под «типовым» (характерным) пространственным распределением химико-биологических характеристик экосистемы будем понимать такое их распределение, которое соответствует стационарному состоянию, к которому приходит экосистема при неизменных внешних воздействиях (антропогенных нагрузках, гидрометеорологических условиях) и заданных параметрах функционирования экосистемы.

Расчеты типовых распределений химико-биологических компонент экосистемы бухты для различных сезонов года преследовали следующие цели:

- верификация трехмерного варианта модели путем сравнения модельных полей с данными натурных наблюдений, уточнение констант модели на основе результатов численных экспериментов;
- определение характерных особенностей пространственной изменчивости элементов экосистемы бухты в сухой и влажный сезоны года, а также формирующих их причин;
- выяснение относительной роли в эвтрофикации бухты различных антропогенных источников загрязнения для нормирования их сбросов.

Некоторые результаты верификации трехмерного варианта модели приведены на рис.3.

На втором этапе описанная выше модель использовалась для оценки эффективности различных природоохранных мероприятий, направленных на улучшение кислородного режима бухты Картахена. В этих расчетах поглощение кислорода донными осадками корректировалось с учетом изменения потока органического вещества в донные отложения путем переопределения функционала $f(x, y) = F_{org}^{new}(x, y) / F_{med}^{act}$, где F_{org}^{new} - поток органического вещества в прогнозируемой ситуации.

Согласно плану развития города Картахена предполагается, что до 2025 года все городские коммунальные стоки будут выведены в центральную систему канализации со сбросом в открытое море далеко за пределами города. Сброс биогенных веществ и мертвой органики предприятиями индустриальной зоны планируется понизить на 80 %. Моделирование этого сценария показало, что данные мероприятия

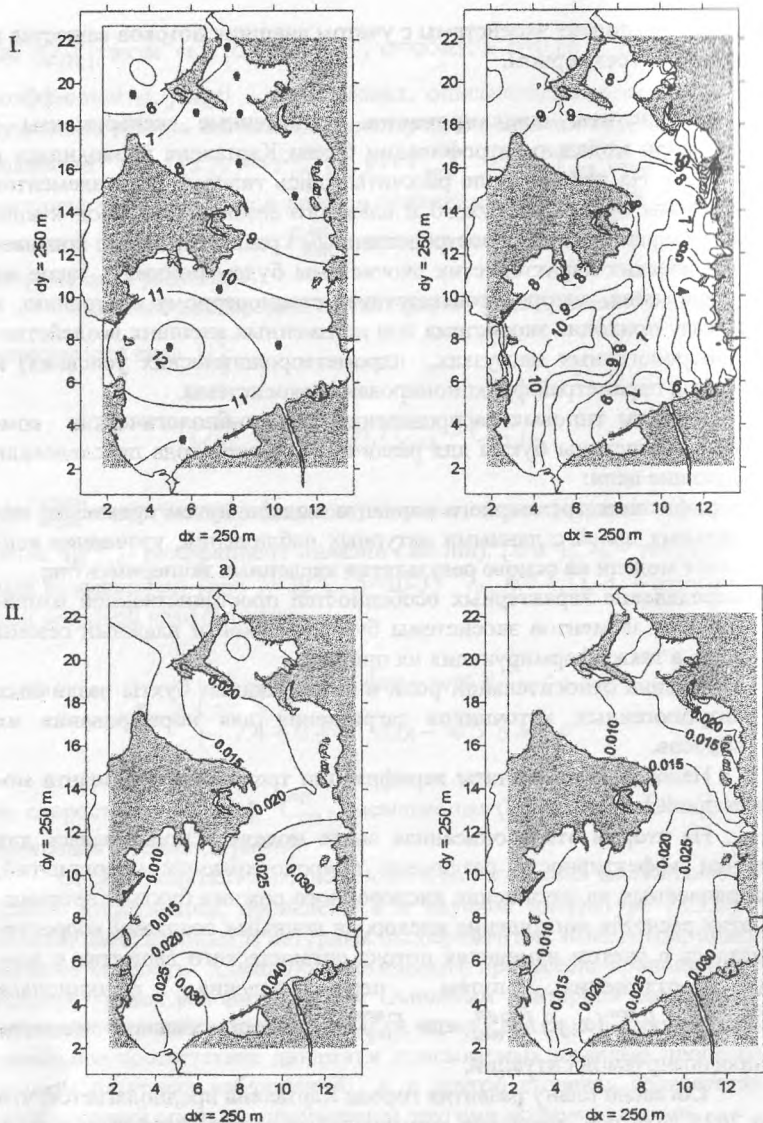


Рис.3 – Пространственное распределение (I) биомассы фитопланктона (в мг-хл «А»/м³) и (II) содержания фосфатов (в мг/л) в поверхностном слое бухты Картахена в сухой сезон (январь), полученные по данным наблюдений (а) и по модели (б). Точками отмечены пункты наблюдений.

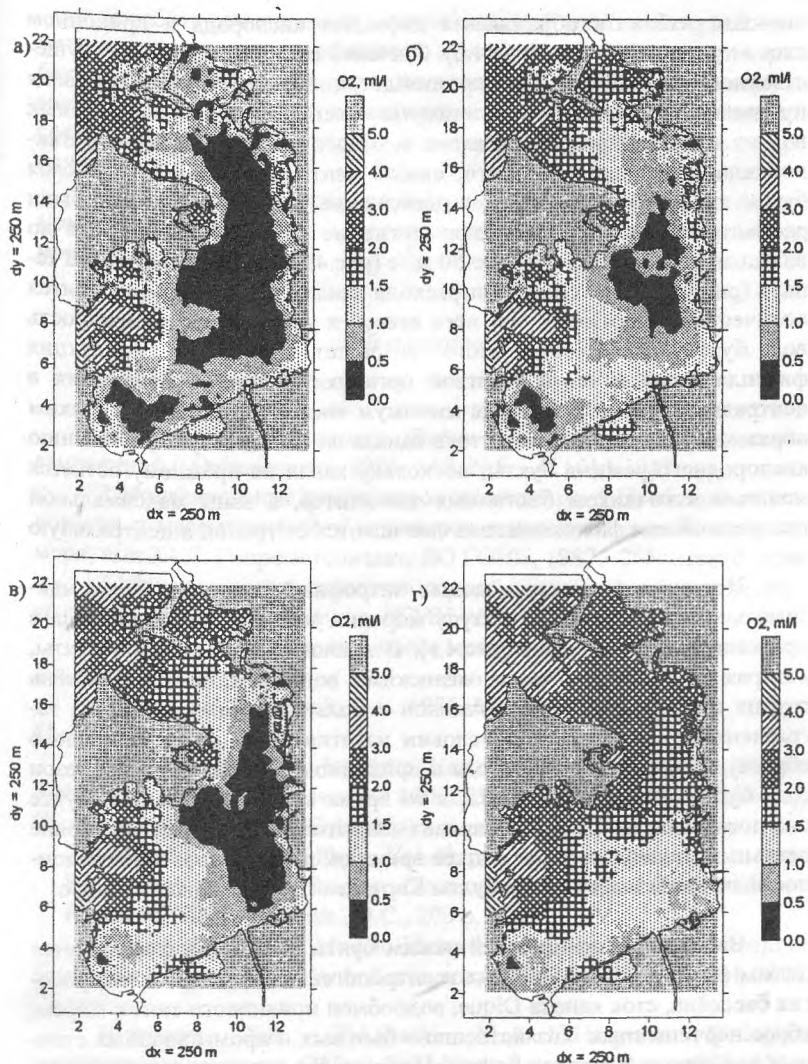


Рис.4 – Распределение кислорода (мл/л) в придонном слое бухты Картахена во влажный сезон года, полученное по модели для современных условий (а), при илъятии 100% бытового и 80% промышленного стока загрязненных вод (б), предыдущий вариант при ограничении расхода канала Dique до $50 \text{ m}^3/\text{с}$ (в), тот же вариант при полном закрытии канала (г)

позволят избежать образования дефицита кислорода в придонном слое внутренней бухты (рис.4.б). Однако во внешней бухте существенного улучшения не произойдет, поскольку остается основная причина образования этого минимума – вынос загрязненных пресных вод из канала Dique, образование мощного приповерхностного пикноклина и, вследствие этого, слабая вентиляция придонного слоя бухты кислородом. Поэтому, в дополнение к вышесказанному, были рассмотрены еще два сценария: снижение расхода канала Dique во влажный период года с 150 до 50 м³/с (рис.4.в) и полное закрытие канала (рис.4.г). При снижении расхода канала до 50 м³/с уменьшится количество выносимой из него взвеси и увеличится прозрачность вод бухты. Вследствие этого возрастет первичная продукция фитопланктона и поток мертвой органики в донные отложения в центральной части бухты, где минимум кислорода углубится. Таким образом, частичное изъятие стока канала не способствует улучшению кислородного режима бухты, поскольку канал по-прежнему остается мощным источником биогенных элементов, а зоны максимальной продуктивности фитопланктона смещаются от границ в центральную часть бухты.

При полном закрытии канала эвтрофный статус вод бухты максимально приблизится к статусу морских вод, дефицит кислорода в придонном слое исчезнет (рис.4.г). В южной части Внешней бухты, которая слабо промывается океанскими водами и где расположена группа промышленных источников с большим объемом сброса загрязненных вод (даже при условии изъятия 80 % их современного сброса), содержание кислорода в придонном слое во влажный сезон года будет превышать 1.5мл/л, в то время как во Внутренней бухте она повысится до 2.5 мл/л. Вариант закрытия канала является вполне реальным, поскольку в настоящее время он потерял свое навигационное значение и имеет кроме бухты Картахена другие выходы в море.

Выводы. Кислородный режим бухты Картахена формируется целым комплексом природных и антропогенных факторов: морфология бассейна, сток канала Dique, водообмен приливного типа с морем, сброс неочищенных хозяйственно – бытовых и промышленных сточных вод города, ветровой режим. Поэтому без использования математической модели практически невозможно оценить эффективность различных природоохранных мероприятий, направленных на улучшение современной ситуации.

В работе описан химико-биологический блок трехмерной математической модели эвтрофикации, в которой явно учитывается роль бактериопланктона в минерализации мертвой органики и регенерации минеральных форм азота и фосфора, а также различия в химическом составе органического вещества естественного и антропогенного происхождения.

Модель прошла успешную апробацию в бухте Картахена и может использоваться для решения аналогичных задач в глубоких морских заливах и бухтах.

Литература

- 1.Ляхин Ю.И. О скорости обмена кислородом между океаном и атмосферой // Океанология, 1980, т.18, N 6. – С.1014-1021.
- 2.Моделирование компонентов экосистемы // Проблемы исследования и математического моделирования экосистемы Балтийского моря, вып.3.- Л: Гидрометеиздат, ЛО ГОИН, 1987.- 255с.
- 3.Моделирование процессов переноса и трансформации вещества в море.-Л:Гидрометеиздат, ЛГМИ, 1979.- 290 с.
- 4.Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей; в 2-х томах,- М:Мир, 1991.
- 5.Boris, J.P. and Book, D.L. 1976. Methods Comput. Phys., 16, pp. 85-129.
- 6.Danish Hydraulic Institute. User Guide and Reference Manual Water Quality Module, release 2-4 MIKE21, December 1994, (Haskoning-Carinsa, 1996, Cartagena, Colombia).
- 7.Harten A.J. J.Comput.Phys., Vol.49, pp: 357-393, 1983.
- 8.Hess K.W. MECCA Program Documentation. NOAA Technical Report NESDIS 46, Wash., D.C., 200 p, 1989.
- 9.Lonin, S.A. 1997. Modelo Hidrodinámico del CIOH y Cálculo de Transparencia para la Bahía de Cartagena. Boletí Científico CIOH, N.18, Cartagena.
- 10.Parsons T.R., Takahashi M., H.Hargrave Biological oceanographic processes. Oxford, New York, Pergamon Press,1984– 324p.

Chemical-biological block of eutrophication model of Cartagena Tuchkovenko Y. S.

Chemical-biological block of mathematical model of eutrophication for Cartagena Bay (Colombia) is described. The model is dedicated to study of engineering alternative efficiency for improvement of the water quality and oxygen regime at the bay. The model has been tested and can be applied for other similar water bodies. The paper contains an actual hydrochemical regime description at the bay and the main factors, which are forming this regime.