

ТРЕХМЕРНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭВТРОФИКАЦИИ ПРИБРЕЖНЫХ МОРСКИХ АКВАТОРИЙ

Дано описание математической структуры трехмерной модели эвтрофикации прибрежных морских акваторий, методов калибрации ее параметров. Приведены результаты использования модели для выбора путей решения задачи улучшения экологического состояния вод бухты Картахена (Колумбия).

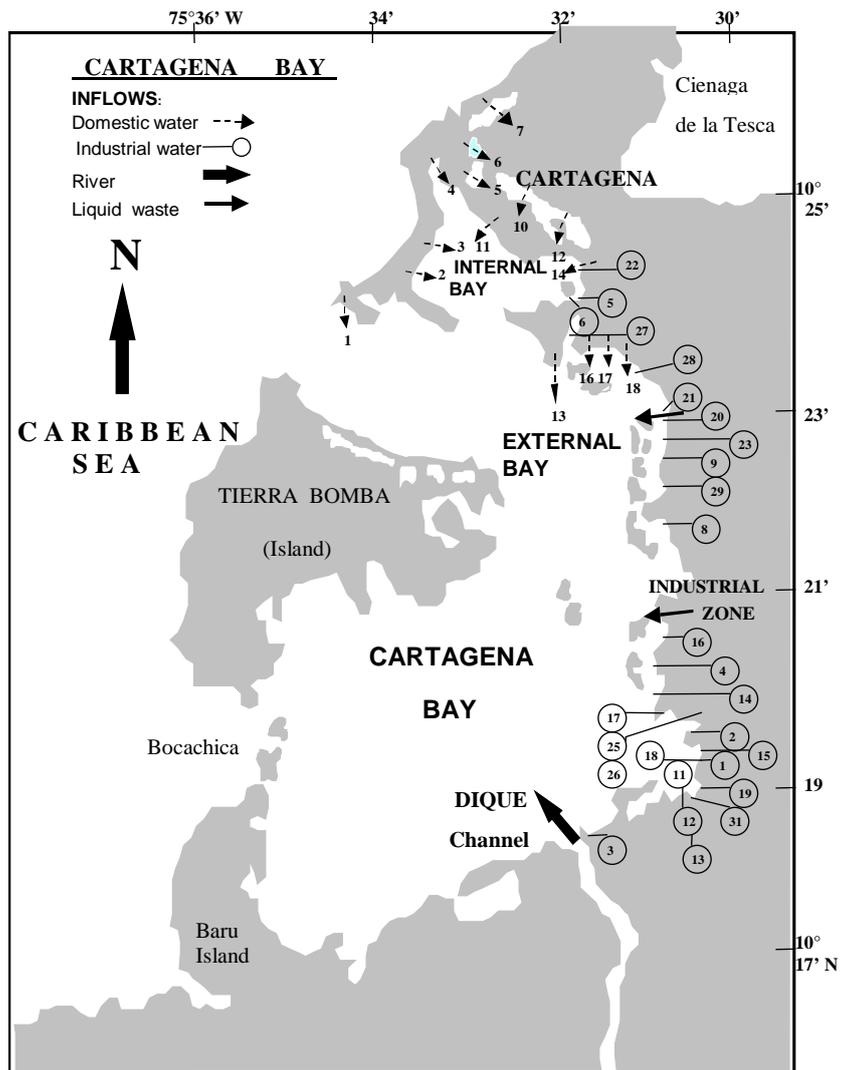
Ключевым экосистемным критерием качества водной среды эвтрофицированных морских акваторий и показателем их ассимиляционной емкости является внутригодовая динамика содержания растворенного в морской воде кислорода (процент насыщения). Именно эта характеристика является интегральным показателем соотношения интенсивностей процессов продуцирования и разложения органического вещества, а также влияния на них гидрометеорологического режима исследуемой акватории. Кроме того, уменьшение содержания кислорода в воде ниже некоторого критического порога (≈ 1 мл/л) приводит к гибели аэробных гидробионтов и изменению характера химико - биологических процессов, протекающих в морской среде. Морская среда полностью утрачивает свой рекреационный потенциал и качество ее становится неприемлемым по санитарно - гигиеническим показателям.

Поскольку содержание кислорода в морской воде определяется множеством противоположно направленных химико-биологических процессов, имеющих различную интенсивность, определяемую условиями среды обитания, то планирование и прогноз эффективности различных природоохранных мероприятий, направленных на уменьшение эвтрофикации морских акваторий и улучшение их кислородного режима, невозможен без привлечения математических моделей.

В данной работе рассматривается одна из моделей такого типа, которая была разработана и апробирована для решения проблемы эвтрофикации в бухте Картахена (Колумбия).

Бухта Картахена (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 Картахены, 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).



Р и с. 1. Схема бухты Картахены с расположением антропогенных источников загрязнения

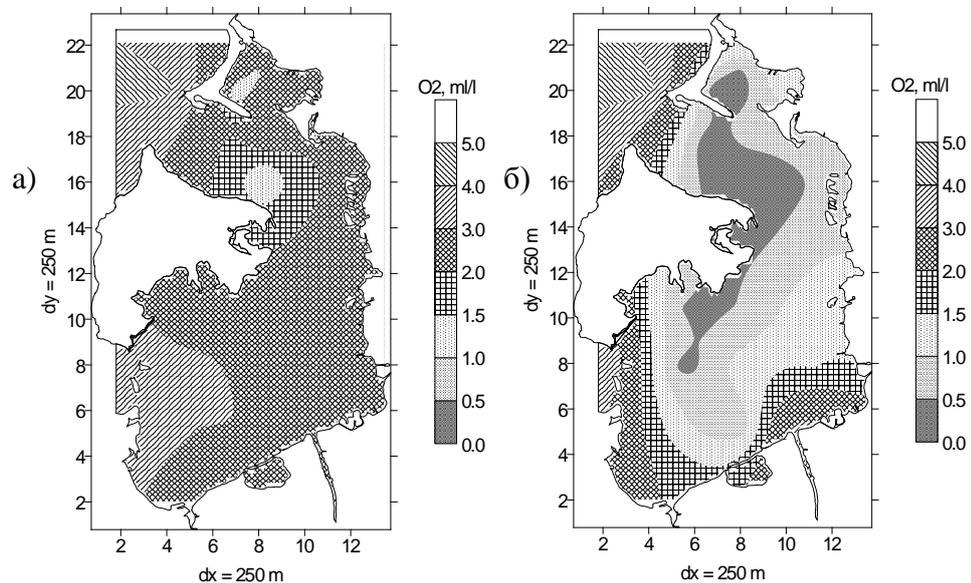
В южную часть Внешней бухты поступают пресные воды из канала Dique, соединяющего бухту с рекой Магдалена. Этот канал имеет искусственное происхождение. Расход канала Dique изменяется в течение года от $55 \text{ м}^3/\text{с}$ в сухой сезон года (февраль – апрель) до $250 \text{ м}^3/\text{с}$ в сезон дождей (сентябрь – октябрь). Влияние канала на гидрохимический режим бухты двояко. 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 в сезон дождей (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, поступающие как с водами канала Dique, так 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.



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

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, которая адекватно отражает особенности гидрохимического режима бухты Картахена, и использовании этой модели для оценки эффективности различных природоохранных мероприятий, направленных на улучшение кислородного режима бухты.

Описание математической модели. *Гидродинамический блок модели* представляет собой известную модель Хесса МЕССА [1] для эстуарных зон, модифицированную Лониным [2]. В частности, модель была дополнена блоком переноса примеси с использованием транспортных конечно-разностных схем.

Основные уравнения гидродинамического блока модели записываются следующим образом:

$$u_t + \{(uu)_x + (uv)_y + (uw)_z\} = -\alpha_0 P_x + fv + (2A_h u_x)_x + (A_h [v_x + u_y])_y + (A_v u_z)_z \quad (1)$$

$$v_t + \{(vu)_x + (vv)_y + (vw)_z\} = -\alpha_0 P_y - fu + (2A_h v_y)_y + (A_h [u_y + v_x])_x + (A_v v_z)_z \quad (2)$$

$$P_z = -\rho g, \quad (3)$$

$$u_x + v_y + w_z = 0 \quad (4)$$

$$\rho = \rho_0 [1 + F_\rho(S, T)], \quad (5)$$

$$S_t + (uS - D_h S_x)_x + (vS - D_h S_y)_y + (wS - D_v S_z)_z = 0, \quad (6)$$

$$T_t + (uT - D_h T_x)_x + (vT - D_h T_y)_y + (wT - D_v T_z)_z = R, \quad (7)$$

$$C_t + (uC - D_h C_x)_x + (vC - D_h C_y)_y + (wC - D_v C_z)_z = FI, \quad (8)$$

где u , v и w – компоненты вектора скорости течения в направлениях x , y и z , соответственно; t – время; f – параметр Кориолиса; P – давление; g – ускорение свободного падения; α_0 – удельный объем воды; ρ – плотность воды; A_h и A_v – коэффициенты горизонтального и вертикального турбулентного обмена импульсом; D_h , D_v – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии тепла и примеси; T – температура и S – соленость воды; C – концентрация примеси химического или биологического происхождения; R – внутренний источник тепла; FI – внутренние локальные потоки примеси C , обусловленные трансформацией веществ в результате протекания в системе процессов физико-химической и биологической природы. Индексы 'x', 'y', 'z' и 't' означают соответствующие производные.

Система (1) – (8) требует задания граничных условий, которые определяются в модели следующим образом.

На поверхности моря ($z = 0$):

$$\begin{aligned}
(\tau_{xx}, \tau_{yy}) &= \rho A_v (u'_z, v'_z); \quad D_v T_{,z} = Q_T / (\rho C_W); \\
D_v S_{,z} &= Q_S; \quad D_v C_{,z} = Q_C^{\text{top}}; \quad w = dh/dt, \quad P = P_a.
\end{aligned} \tag{9}$$

Здесь, τ_{xx}, τ_{yy} - компоненты вектора касательного напряжения трения ветра; Q_T, Q_S - потоки тепла и соли, вычисляемые на основе метеорологических данных; Q_C^{top} - поток примеси через водную поверхность; h - отклонение уровня моря от невозмущенного состояния; C_W - удельная теплоемкость; P_a - атмосферное давление.

На дне ($z = H$):

$$(\tau_{bx}, \tau_{by}) = \rho A_v (u'_z, v'_z); \quad D_v T_z = 0; \quad D_v S_z = 0; \quad D_v C_z = Q_c^{\text{bot}}, \tag{10}$$

где τ_{bx}, τ_{by} - компоненты вектора касательного напряжения придонного трения; Q_c^{bot} - поток, характеризующий обмен примесью между водой и донными отложениями.

На границах с открытым морем задаются фоновые океанские значения моделируемых переменных, если поток входит в расчетную область, и используются рассчитанные по модели значения в противном случае. Колебания уровня моря на морской границе определяются приливным режимом, а также прохождением через нее длинных волн различных типов:

$$(T, S, C) = \begin{cases} (T_*, S_*, C_*), & \text{если } \bar{v}\bar{n} \leq 0 \\ f(T, S, C), & \text{если } \bar{v}\bar{n} > 0 \end{cases}, \quad h = h_0 + \bar{v}\bar{n} \sqrt{\frac{H}{g}}, \tag{11}$$

где (T_*, S_*, C_*) - фоновые (океанские) значения моделируемых переменных; $f(T, S, C)$ - функция численной экстраполяции значений переменных модели из области расчетов на ее границу; $\bar{v}\bar{n}$ - проекция вектора течений, рассчитанного в граничных точках области, на нормаль к этой границе; $H = h + d$ - полная глубина; d - глубина при невозмущенном уровне моря; h - возмущение уровня моря.

В точках выхода канала Dique и антропогенных источников задаются расходы воды Q_r , ее минерализация, термический режим и содержание в ней загрязняющих субстанций C^{riv} :

$$\begin{aligned}
U &= Q_r / (B_x \Delta L H) \quad \text{и} \quad V = Q_r / (B_y \Delta L H); \quad u' = u_{\text{top}} \cos(\pi z / H) \quad \text{и} \quad v' = v_{\text{top}} \cos(\pi z / H); \\
T &= T_{\text{top}} + (T_{\text{top}} - T_{\text{bot}})(1 - \cos(\pi z / H)); \quad S = S_{\text{top}} + (S_{\text{top}} - S_{\text{bot}})(1 - \cos(\pi z / H)); \\
C &= C_{\text{top}}^{\text{riv}} + (C_{\text{top}}^{\text{riv}} - C_{\text{bot}}^{\text{riv}})(1 - \cos(\pi z / H)).
\end{aligned} \tag{12}$$

Здесь, B_x и B_y - безразмерная ширина каналов относительно размера ΔL ячейки расчетной сетки; U и V - осредненные по вертикали компоненты вектора скорости; u' и v' - отклонения скорости от средних по глубине величин. Величины с индексом "top" соответствуют поверхностному слою воды, тогда как с индексом "bot" - придонному слою.

Уравнения модели переводились в σ - систему координат по вертикали с использованием следующего выражения:

$$\sigma = -(h - z) / H. \tag{13}$$

В этой системе вертикальная координата изменяется от 0 на поверхности моря до -1 на дне.

Метод решения гидродинамической задачи включает расщепление физических процессов на баротропную и бароклинную составляющие. Компоненты баротропной составляющей скорости определяются как

$$U = \int_{-1}^0 u d\sigma \quad \text{и} \quad V = \int_{-1}^0 v d\sigma,$$

а проинтегрированные по вертикали уравнения движения имеют вид:

$$(HU)_t + (H\theta_{uu}UU)_x + (H\theta_{uv}UV)_y = -gHh_x - \alpha_0 HP_{a'x} - HG_x^* + \\ + fHV + (2A_h HU)_x + (A_h H[V_x + U_y])_y + \tau_{sx} - \tau_{bx}, \quad (14)$$

$$(HV)_t + (H\theta_{uv}UV)_x + (H\theta_{vv}VV)_y = -gHh_y - \alpha_0 HP_{a'y} - HG_y^* - \\ - fHU + (2A_h HV)_y + (A_h H[V_x + U_y])_x + \tau_{sy} - \tau_{by}, \quad (15)$$

$$h_t + (HU)_x + (HV)_y = 0, \quad (16)$$

где $G_x = \alpha_0 g \left\{ \left[H \int_{\sigma}^0 (\rho - \rho_0) d\sigma \right]_x + (h_x + \sigma H_x)(\rho - \rho_0) \right\}$, $G_x^* = \int_{-1}^0 G_x d\sigma$;

$$G_y = \alpha_0 g \left\{ \left[H \int_{\sigma}^0 (\rho - \rho_0) d\sigma \right]_y + (h_y + \sigma H_y)(\rho - \rho_0) \right\}$$
, $G_y^* = \int_{-1}^0 G_y d\sigma$;

$$\theta_{uu} = \int_{-1}^0 (uu / UU) d\sigma; \quad \theta_{uv} = \int_{-1}^0 (uv / UV) d\sigma; \quad \theta_{vv} = \int_{-1}^0 (vv / VV) d\sigma.$$

Бароклинные компоненты вектора скорости определяются как отклонения от средней по глубине скорости $u' = u - U$ и $v' = v - V$, а уравнения для них записываются следующим образом:

$$(Hu')_t + (H(uu - \theta_{uu}UU))_x + (H(uv - \theta_{uv}UV))_y + (\tilde{w}u')_{,\sigma} = HG_x^* - HG_x + \\ + fHV + (2A_h Hu')_x + (A_h H[v'_x + u'_y])_y + H^{-1}(A_v u'_{,\sigma})_{,\sigma} - \tau_{sx} + \tau_{bx}; \quad (17)$$

$$(Hv')_t + (H(uv - \theta_{uv}UV))_x + (H(vv - \theta_{vv}VV))_y + (\tilde{w}v')_{,\sigma} = HG_y^* - HG_y - \\ - fHu' + (2A_h Hv')_y + (A_h H[v'_x + u'_y])_x + H^{-1}(A_v v'_{,\sigma})_{,\sigma} - \tau_{sy} + \tau_{by}; \quad (18)$$

$$(Hu')_x + (Hv')_y + H^{-1}(\tilde{w})_{,\sigma} = 0. \quad (19)$$

В уравнениях (17)-(18) \tilde{w} - вертикальная скорость, вычисляемая как:

$$\tilde{w} = Hd\sigma / dt = w - (1 + \sigma)h_t - u(h_x + \sigma H_x) - v(h_y + \sigma H_y). \quad (20)$$

Уравнение переноса неконсервативной субстанции C , с собственной скоростью гравитационного осаждения w_g , может быть представлено в следующей форме:

$$(HC)_t + (H(uC - D_h C_x))_x + (H(vC - D_h C_y))_y + \\ + ((\tilde{w} + w_g)C - H^{-1}D_v C_{,\sigma})_{,\sigma} = FI \quad (21)$$

Гидродинамические уравнения решались с использованием численных конечно-разностных методов, подробное описание которых дано в [1]. При

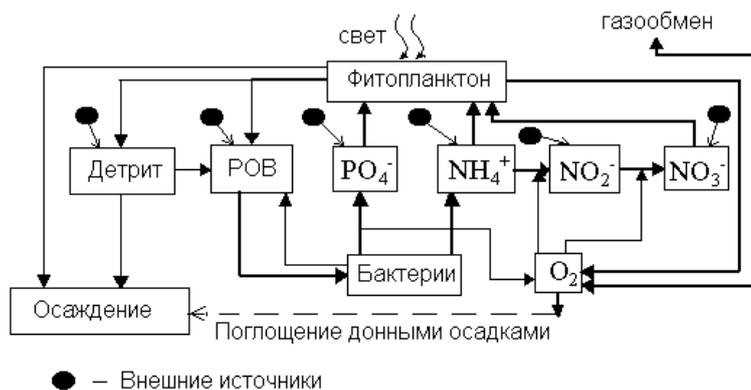
численной реализации уравнения (21) для описания горизонтального переноса использовалась численная схема FCT [3, 4], а для вертикального - TVD [5].

Число уравнений переноса (20), составляющих модель эвтрофикации, соответствует числу моделируемых химико-биологических компонент экосистемы. Правые части этих уравнений $Fl_i(C, x, y, z, t)$ представляют 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:

$$dC_i/dt|_{\text{local}} = Fl_i. \quad (22)$$

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 согласно системе уравнений (22), в то время как перемещение вещества и энергии между ячейками осуществляется в результате переноса (21).

Химико-биологический блок модели включает в себя следующие параметры экосистемы: B_f - фитопланктон, B_b - бактериопланктон, B_{org}^{DET} - детрит, $B_{org}^{DIS} = B_{org}^{ant} + B_{org}^{nat}$ - растворенное органическое вещество, C_{PO4} - фосфаты, C_{NH4} - аммоний, C_{NO2} - нитриты, C_{NO3} - нитраты, C_{O2} - растворенный кислород. Диаграмма связей между компонентами экосистемы представлена на рис.3.



Р и с. 3. Структурная диаграмма химико-биологического блока модели эвтрофикации и связей между его элементами

Для локальной точки пространства уравнения блока записываются следующим образом:

$$\frac{dB_f}{dt} = (1 - \gamma_f) \sigma_f(I_z, C_{PO4}, C_N) B_f - \mu_f B_f, \quad (23)$$

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

$$f_1(I) = \frac{1}{\Delta Z} \int_{Z_1}^{Z_2} f_z(I_z) dz = \frac{2.718}{\Delta Z \alpha} [\exp(-R_{Z1}) - \exp(-R_{Z2})], \quad R_{Zi} = \frac{I_0}{I_{opt}} \exp(-\alpha Z_i),$$

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

$$f_2(C_N, C_{PO4}) = \min\left\{\frac{C_N}{Ck_N + C_N}, \frac{C_{PO4}}{Ck_{PO4} + C_{PO4}}\right\}, \quad C_N = C_{NH4} + C_{NO3}.$$

$$\frac{dB_b}{dt} = V_b^{\max} \left(\frac{B_{org}^{DIS}}{Bk_{org} + B_{org}^{DIS}} - \frac{B_b}{B_b^{\max}}\right) B_b, \quad (24)$$

$$\frac{dB_{org}^{DET}}{dt} = \lambda_f \eta_f \mu_f B_f \beta_{O2/C} \beta_{m3/L} - \delta B_{org}^{DET}, \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \frac{dB_{org}^{nat}}{dt} = & \left[(\gamma_f \sigma_f(I_z, C_{PO4}, C_N) + (1 - \lambda_f) \eta_f \mu_f) B_f + \mu_b B_b - \right. \\ & \left. - \frac{V_B^{\max}}{\theta} \frac{B_{org}^{nat}}{Bk_{org} + B_{org}^{DIS}} B_b \varepsilon_{ing} \right] \beta_{O2/C} \beta_{m3/L} + \delta B_{org}^{DET}, \end{aligned} \quad (26.a)$$

$$\frac{dB_{org}^{ant}}{dt} = Q_{org}^{ant} - \frac{V_B^{\max}}{\theta} \frac{B_{org}^{ant}}{Bk_{org} + B_{org}^{DIS}} B_b \varepsilon_{ing} \beta_{O2/C} \beta_{m3/L}, \quad (26.b)$$

$$\begin{aligned} \frac{dC_{PO4}}{dt} = & \left[\left(\frac{1}{\theta} - 1\right) \beta_{P/C} B_{org}^{nat} + \left(\frac{1}{\theta} - \omega_p\right) \beta_{P/C} B_{org}^{ant} \right] \frac{V_B^{\max}}{Bk_{org} + B_{org}^{DIS}} B_b \beta_{m3/L} \varepsilon_{ing} - \\ & - \sigma_f(I_z, C_{PO4}, C_N) B_f \beta_{P/C} \beta_{m3/L}, \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \frac{dC_{NH4}}{dt} = & \left[\left(\frac{1}{\theta} - 1\right) B_{org}^{nat} \beta_{N/C} + \left(\frac{1}{\theta} - \omega_N\right) B_{org}^{ant} \beta_{N/C} \right] \frac{V_B^{\max}}{Bk_{org} + B_{org}^{DIS}} B_b \beta_{m3/L} \varepsilon_{ing} - \\ & - \chi \sigma_f(I_z, C_{PO4}, C_N) B_f \beta_{N/C} \beta_{m3/L} - v_{N1} C_{NH4} \varepsilon_{ing}, \end{aligned} \quad (28)$$

$$\frac{dC_{NO2}}{dt} = v_{N1} C_{NH4} \varepsilon_{ing} - v_{N2} C_{NO2} \varepsilon_{ing}, \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \frac{dC_{NO3}}{dt} = & v_{N2} C_{NO2} \varepsilon_{ing} - (1 - \chi) \sigma_f(I_z, C_{PO4}, C_N) B_f \beta_{N/C} \beta_{m3/L} \\ & - v_{DN} (C_{NO3} - C_{NO3}^{crit}) - v_{foto} (C_{NO3} - C_{NO3}^{crit}), \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \frac{dC_{O2}}{dt} = & \left[\sigma_f(I, C_{PO4}, C_N) B_f - \frac{V_b^{\max}}{\theta} \frac{B_{org}}{Bk_{org} + B_{org}} B_b \varepsilon_{ing} \right] \beta_{O2/C} \beta_{m3/L} - \\ & - (\beta_{O2/N1} v_{N1} C_{NH4} + v_{N2} \beta_{O2/N2} C_{NO2}) \varepsilon_{ing} - Q_{O2}^{bot} \pm Q_{O2}^{atm}. \end{aligned} \quad (31)$$

Здесь t – время, ч; 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; V_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 скорость роста бактерий равна половине от максимальной, мгО₂/л; B_b^{max} – максимально возможная биомасса бактерий, мгС/м³; δ – удельная скорость автолиза детрита, 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; $\varepsilon_{ing} = f(C_{O_2})$ – параметр ингибции процессов биохимического окисления органического вещества и нитрификации при дефиците содержания

кислорода в морской воде ($0 < \varepsilon_{ing} < 1$), рассчитываемый по формуле: $\varepsilon_{ing} = C_{O_2} / (C_{O_2} + Ck_{O_2})$, где Ck_{O_2} - константа полунасыщения процесса, мг/л; $\omega_p = \beta_{P/C} / \beta_{P/C}^{ant}$, $\omega_N = \beta_{N/C} / \beta_{N/C}^{ant}$ - соотношения между содержанием фосфора и азота в органическом веществе естественного и антропогенного происхождения; ν_{N1}, ν_{N2} - удельная скорость первой и второй стадий нитрификации, ч⁻¹; ν_{DN} - удельная скорость денитрификации в придонных слоях, где содержание кислорода менее 1 мг/л, ч⁻¹; ν_{foto} - удельная скорость убыли нитратов, ч⁻¹, за счет физико-химических процессов в поверхностном слое; $C_{NO_3}^{crit}$ - минимальная концентрация нитратов, при которой прекращаются процессы нитрат-редукции, мг/л; $\beta_{O_2/C}$ - коэффициент перевода углеродных единиц органического вещества мгС в кислородные мгО₂, мгО₂/мгС; $\beta_{P/C}, \beta_{N/C}, \beta_{P/C}^{ant}, \beta_{N/C}^{ant}$ - стехиометрические коэффициенты перехода от мгС к мгР, мгР/мгС, и мгN, мгN/мгС, для мертвой органики естественного B_{org}^{nat} и антропогенного B_{org}^{ant} происхождения; $\beta_{O_2/N1}, \beta_{O_2/N2}$ - кислородные эквиваленты 1-й и 2-й стадий нитрификации, мгО₂/мгN; $\beta_{m^3/L} = 0.001$ - коэффициент перехода от кубических метров к литрам, м³/л.

Поглощение кислорода донными осадками в первом приближении может быть оценено с помощью эмпирической зависимости, приведенной в [6], на основе сведений о содержании кислорода в воде C_{O_2} :

$$Q_{O_2}^{hot} = a \cdot f(x, y) (C_{O_2})^b, \quad (32)$$

где $[Q_{O_2}^{hot}] = \text{мг/м}^2 \cdot \text{ч}$, $[C_{O_2}] = \text{мг/л}$, $a = \text{const}$ и $b = \text{const}$ - 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 [7]:

$$Q_{O_2}^{atm} = \gamma_{e,i} n_v n_t (C_{O_2}^S - C_{O_2}), \quad (33)$$

где $Q_{O_2}^{atm}$ - поступление (инвазия) или выделение (эвазия) кислорода, мг/м²ч; $\gamma_{e,i}$ - коэффициент инвазии (эвазии), л/м²ч; n_t - температурный коэффициент (при $T=30^\circ\text{C}$, $S=30-35$ ‰, $n_t = 1.1$), n_v - интегральный ветровой коэффициент:

$$n_v = \begin{cases} 1.0 + 0.27 w^2, \text{ для } w \leq 8 \text{ м/с} \\ -7.4 + 0.4 w^2, \text{ для } w > 8 \text{ м/с} \end{cases}, \quad (34)$$

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

Информация об источниках загрязнения бухты была предоставлена природоохранными организациями города Картахена. Схема расположения источников загрязнения представлена на рис.1.

При расчетах пространственная область Бухты Картахена аппроксимировалась расчетной сеткой 37 x 64 узла с шагом 250 м. Шаг по времени составлял 12 сек. в гидродинамическом блоке и 1 час в химико - биологическом. Коэффициент горизонтальной турбулентности полагался равным 0.1 м²/с.

Сезонная изменчивость ветровых условий, расходов канала Dique, прозрачности вод и метеорологических параметров для расчета потока фотосинтетически активной радиации задавались на основе климатических данных. Приливные колебания уровня на морской границе задавались на основе информации [8] о константах основных гармонических составляющих прилива в порту Картахена.

Оценка констант химико-биологического блока выполнялась на основе информации приведенной в научной литературе [9 – 11]; [6], данных лабораторных и натуральных экспериментов. Отдельные параметры модели (V_f^{\max} , V_B^{\max} , δ , v_{N1} , v_{N2}) были адаптированы к температурным условиям *in situ* (в течение всего года температура воды $\approx 30^\circ\text{C}$) на основе эмпирических и литературных источников. Основным критерием выбора того или иного значения констант модели являлось, с одной стороны, максимальное соответствие динамики описываемых моделью процессов данным натурных наблюдений, а, с другой стороны, соответствие этих значений оценкам, полученным другими исследователями.

Для упрощения задачи, калибровка модели на основе данных натурных наблюдений выполнялась первоначально в ее одномерном варианте (модель годовой динамики вертикального распределения компонент экосистемы, с учетом внешних потоков вещества и энергии). На этом этапе основная задача калибровки заключалась в достижении соответствия порядков получаемых по модели и наблюдаемых величин моделируемых компонент экосистемы.

Предварительное использование одномерного варианта модели обусловлено тем, что при настройке параметров и калибровке модели он требует значительно меньших затрат машинного времени, чем трехмерный вариант, что позволяет провести большое количество численных экспериментов с различным сочетанием параметров модели на период в несколько лет машинного времени с целью установления годового цикла изменчивости моделируемых компонент экосистемы. Используя одномерный вариант легче добиться баланса в продукционно - деструкционных процессах путем подбора соответствующих значений

параметров модели в рамках допустимой изменчивости их величин, установленной на основе анализа литературных данных.

Т а б л и ц а 1. Значения констант химико-биологического блока модели эвтрофикации бухты Картахена, установленные в результате ее калибровки.

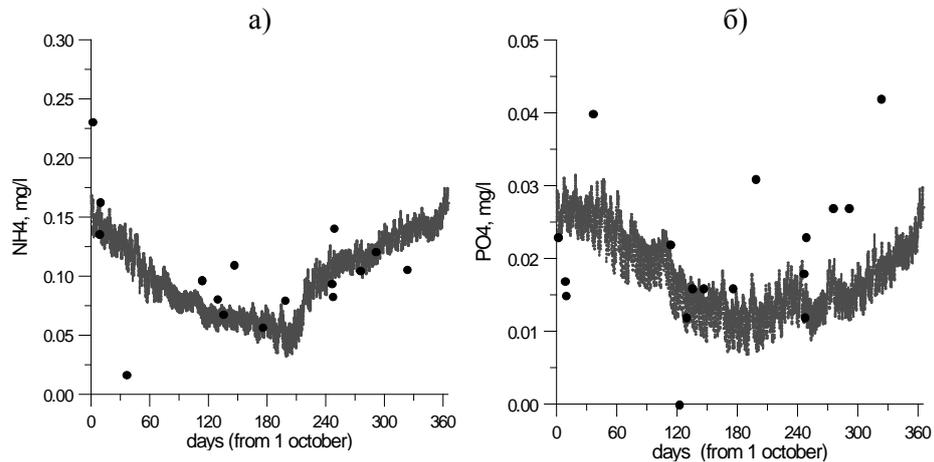
Величина	Значение	Ед.измерен.	Величина	Значение	Ед.измерен.
V_f^{\max}	4.0	сут ⁻¹	λ_f	0.4 (0.8)*	-
V_B^{\max}	2.0 (4.0)*	сут ⁻¹	Bk_{org}	1000.	мгС/м ³
Ck_{pO_4}	0.01	мгР/л	β_{C/Chl^a}	40.	мгС/мгХл «а»
Ck_N	0.073	мгN/л	$\beta_{P/C}$	0.024	мгР/мгС
γ_f	0.1	сут ⁻¹	$\beta_{N/C}$	0.176	мгN/мгС
μ_f	0.5	сут ⁻¹	$\beta_{P/C}^{ant}$	0.034	мгР/мгС
I_{opt}	110	Вт/м ²	$\beta_{N/C}^{ant}$	0.51	мгN/мгС
w_{gf}	1.0	м/сут	$\beta_{O_2/C}$	3.47	мгО ₂ /мгС
η_f	0.9	-	$\beta_{O_2/N1}$	3.4	мгО ₂ /мгN
δ	0.1	сут ⁻¹	$\beta_{O_2/N2}$	1.1	мгО ₂ /мгN
w_{gd}	1.0	м/сут	ν_{DN}	0.1	сут ⁻¹
ϕ	0.2	-	ν_{foto}	0.1	сут ⁻¹
Ck_{O_2}	1.0	мг/л	a	128.	мгО ₂ /м ² ч
V_{1N}	0.21	сут ⁻¹	b	0.66	-
V_{2N}	4.0	сут ⁻¹	γ_e	22.0	л/м ² ч
θ	0.33	-	γ_i	11.5	л/м ² ч

* - значения, использованные в одномерном варианте модели.

Калибровка модели в трехмерном варианте проводилась путем сравнения пространственного распределения компонент экосистемы, получаемых по модели, с наблюдаемыми полями и потребовала незначительной коррекции констант модели, определенных в нульмерном варианте. Рассчитывались типовые поля элементов экосистемы бухты для сухого и влажного сезонов года. Под «типовым» (характерным) пространственным распределением химико-биологических характеристик экосистемы понимается такое их распределение, которое соответствует стационарному состоянию, к которому приходит экосистема при неизменных внешних воздействиях (антропогенных нагрузках, гидрометеорологических условиях) и заданных параметрах функционирования экосистемы.

Некоторые результаты калибровки модели приведены на рис. 4 – 5. Несмотря на значительную формализацию задачи, изменчивость химико-биологических элементов экосистемы, полученная по модели, в целом соответствует данным натурных наблюдений. Константы химико-биологического блока модели эвтрофикации бухты Картахена, принятые в

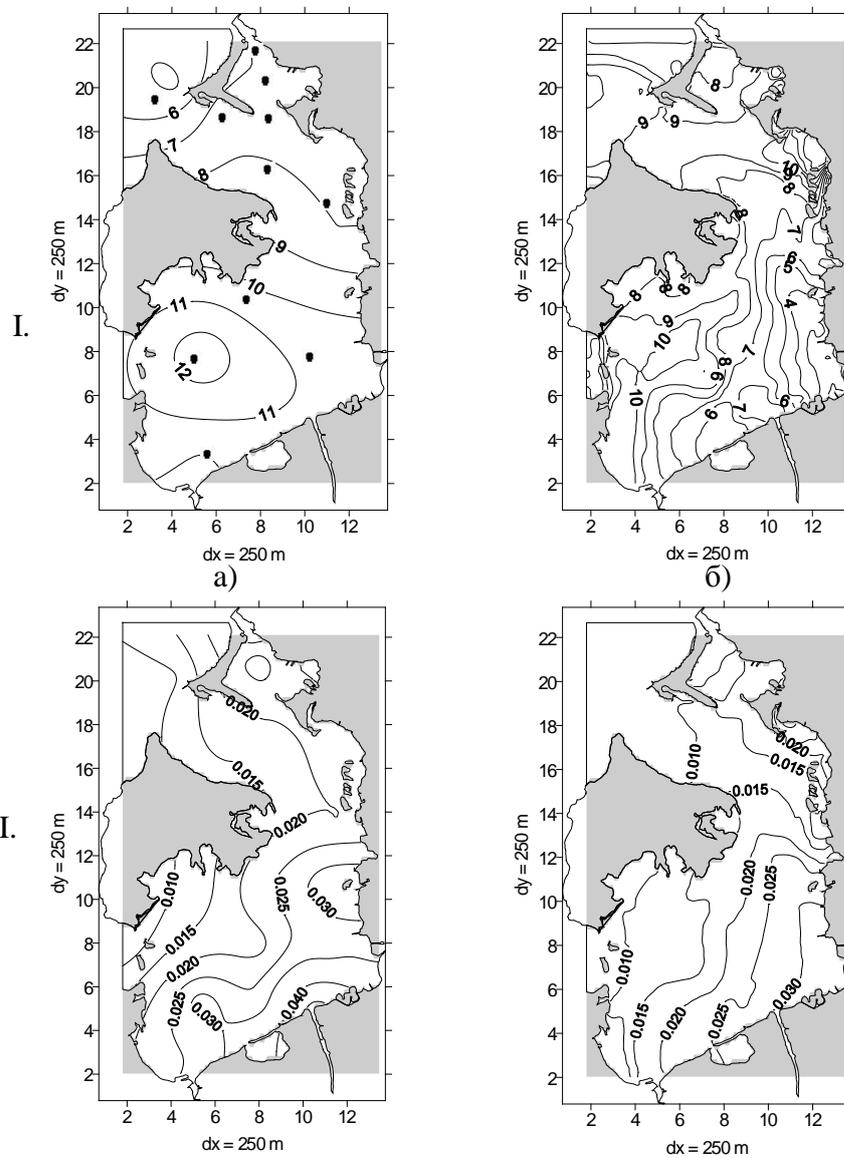
результате калибровки модели на основе экспериментальных и литературных данных, а также в результате численных экспериментов с одномерным и трехмерными вариантами модели, представлены в таблице 1.



Р и с. 4. Внутригодовая изменчивость аммония (а) и фосфатов (б) в поверхностном слое бухты Картахены, полученная по одномерной модели (кривая) и пространственным осреднением данных наблюдений (точки)

Результаты моделирования. Описанная выше модель использовалась для оценки эффективности различных природоохранных мероприятий, направленных на улучшение кислородного режима бухты Картахены. 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 Картахены 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 позволят избежать образования дефицита кислорода в придонном слое Внутренней бухты (рис. 6, б). Во Внешней бухте, хотя дефицит кислорода несколько уменьшится, однако качественно ситуация не изменится, т.к. в придонном слое большей части акватории содержание кислорода останется по-прежнему менее 1.5 мл/л. Объясняется это тем, что несмотря на существенное уменьшение сбросов антропогенными источниками, не ликвидирована основная причина образования дефицита кислорода: вынос из канала Dique пресных вод с высоким содержанием биогенных веществ,



Р и с. 5. Пространственное распределение биомассы фитопланктона (в мг-хл «а»/м³) (I) и содержания фосфатов (в мг/л) (II) в поверхностном слое бухты Картагена в сухой сезон (январь), полученные по данным наблюдений (а) и по модели (б). Точками отмечены пункты наблюдений

образование мощного приповерхностного пикноклина и, вследствие этого, слабая вентиляция придонного слоя бухты кислородом. Поэтому, в дополнение к вышесказанному, были рассмотрены еще три сценария (альтернативы):

- 1) снижение расхода канала Dique во влажный период года с 150 до 50 м³/с (расход в период сухого сезона);
- 2) снижение расхода канала Dique во влажный период года со 150 до 50 м³/с и уменьшение содержания минеральных форм азота и фосфора в водах канала в два раза;
- 3) полное закрытие канала.

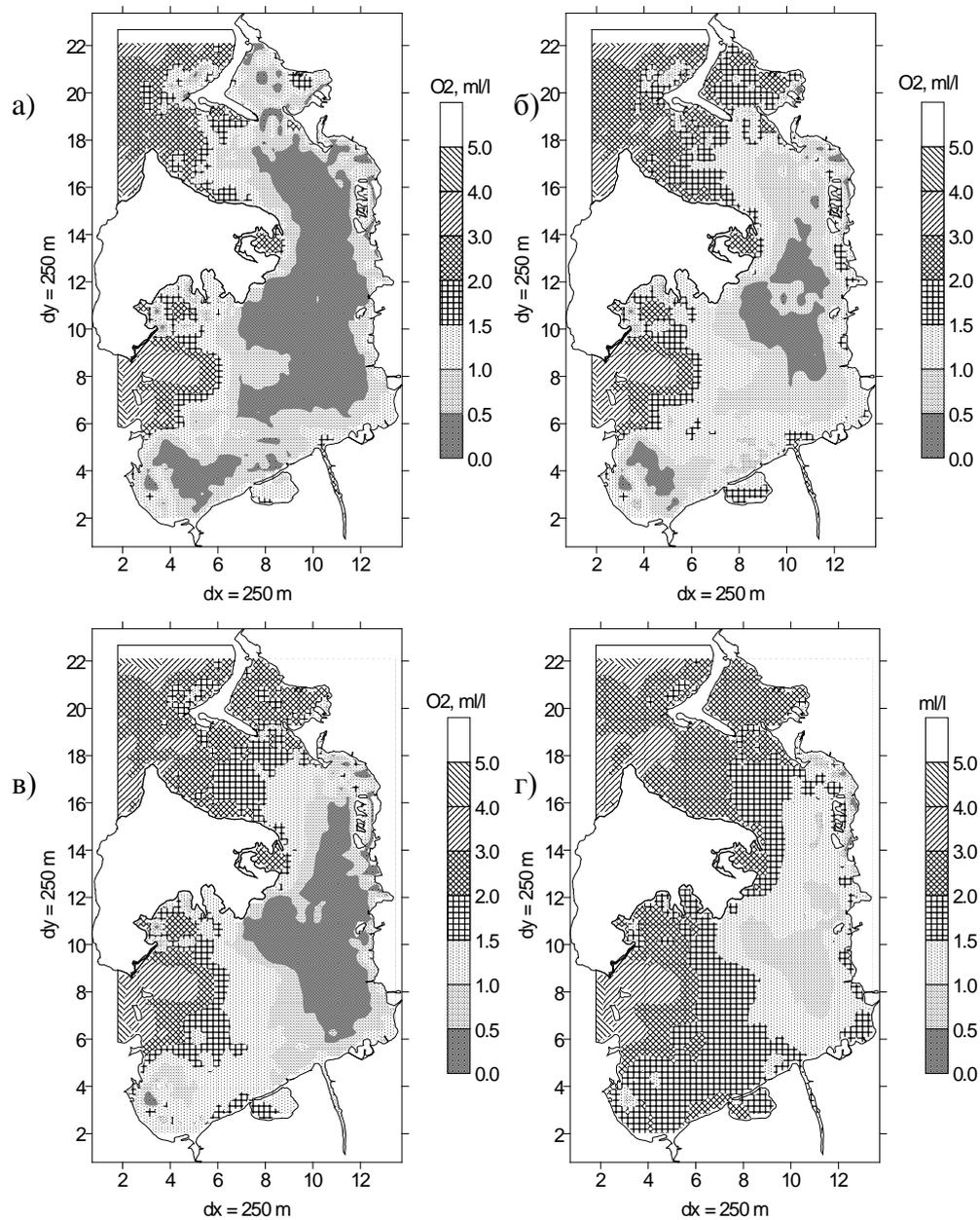
При снижении расхода канала до 50 м³/с уменьшится количество выносимой из него взвеси и увеличится прозрачность вод бухты. Этот эффект учитывается заданием поля прозрачности характерного для сухого сезона. При увеличении прозрачности возрастет первичная продукция фитопланктона и поток мертвой органики в донные отложения в центральной части бухты, где минимум кислорода углубится (рис. 6, в). 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.

Уменьшение содержания биогенных веществ в водах канала, в сочетании с ограничением его стока до 50 м³/с, дает значительно лучшие результаты. На большей части акватории бухты значительно уменьшается биомасса фито- и бактериопланктона, поток органического вещества в донные отложения и, как следствие, ослабевает дефицит кислорода в придонном слое (рис. 6, г).

При полном закрытии канала, эвтрофный статус вод бухты максимально приблизится к статусу морских вод, дефицит кислорода в придонном слое исчезнет (рис. 7, б). 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 1.5 мл/л, в то время как во Внутренней бухте она повысится до 2.5 мл/л.

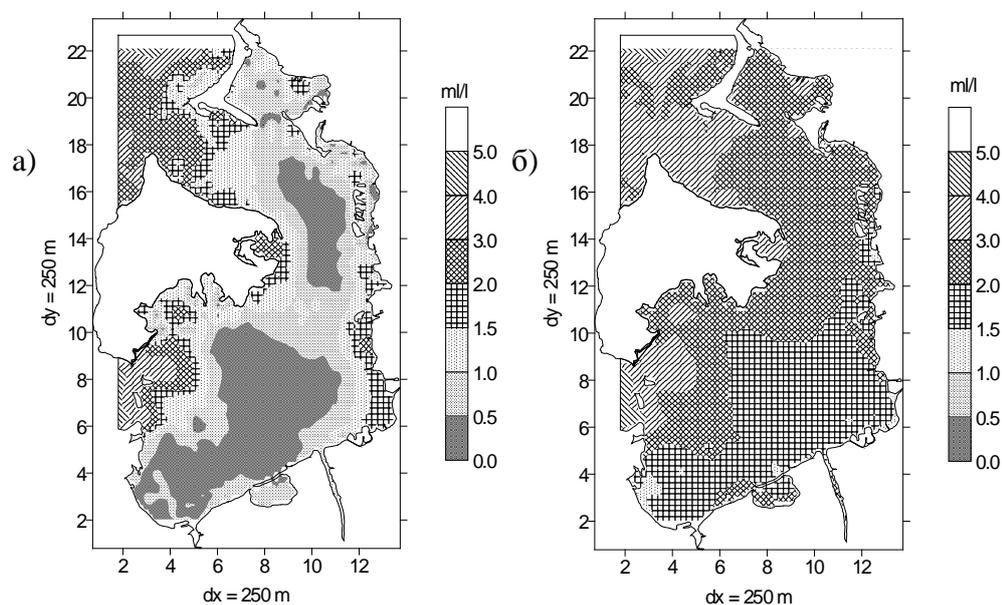
Рассмотренные выше варианты ограничения стока канала Dique либо его полного закрытия являются вполне реальными. В настоящее время канал потерял свое навигационное значение и имеет кроме бухты Картахена другие выходы в море. Кроме того, в настоящее время выполнено предварительное техническое обоснование проекта строительства в канале шлюза, который ограничит вынос загрязненных пресных вод на акваторию бухты Картахена, перераспределив сток канала в другие рукава, впадающие в открытое море. Кроме того планируется объединить всю систему озер канала Dique в единую сеть. При прохождении этих озер загрязненные воды реки Магдалена будут очищаться от биогенных элементов.

В заключение отметим, что ограничение сбросов загрязняющих веществ антропогенными источниками в указанных выше пределах является первоочередным условием решения проблемы улучшения



Р и с. 6. Распределение кислорода (мл/л) в придонном слое бухты Картахена во влажный сезона года, полученное по модели для современных условий (а), при изъятии 100 % бытового и 80 % промышленного стока загрязненных вод (б), предыдущий вариант при ограничении расхода канала Dique до $50 \text{ м}^3/\text{с}$ (в), тот же вариант при уменьшении содержания биогенных веществ в водах канала в два раза (г)

кислородного режима бухты. Моделирование сценария с закрытием канала Dique, при сохранении современных объемов сброса загрязненных вод антропогенными источниками, показало, что вместо ожидаемого улучшения ситуации, наоборот, произойдет ее ухудшение (рис. 7, а). Объясняется это тем, что при закрытии канала прозрачность вод бухты увеличится до 6 м и перестанет быть фактором лимитирующим фотосинтез, в то время как поставок биогенных элементов от антропогенных источников будет достаточно для поддержания продуктивности фитопланктона на высоком уровне.



Р и с. 7. Распределение кислорода (мл/л) в придонном слое бухты Картахена во влажный сезона года, полученное по модели при полном закрытии канала без ограничения стока антропогенных источников загрязнения (а) и при условии изъятия 100 % бытового и 80 % промышленного стока загрязненных вод (б)

Выводы. Кислородный режим бухты Картахена формируется сложным комплексом природных и антропогенных факторов, среди которых можно выделить: морфологию 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 описана математическая модель 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.

Моделирование с помощью математической модели эвтрофикации различных сценариев улучшения экологической ситуации в бухте Картахена показало, генеральная стратегическая линия должна заключаться в максимальном ограничении стока канала Dique и уменьшении содержания в его водах биогенных веществ. Одновременно должно проводиться нормирование сбросов антропогенных источников загрязнения.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hess K.W.* MECCA Program Documentation NOAA. Technical Report NESDIS 46.– Wash. , D.C. , USA, 1989. – 200 p.
2. *Lonin S.A.* Modelo Hidrodinámico del CIOH y Cálculo de Transparencia para la Bahía de Cartagena // Boletín Científico CIOH.– N 18.– Cartagena.– 1997.– P. 85-92.
3. *Флетчер К.* Вычислительные методы в динамике жидкостей.– т.2.– М:Мир, 1991.– 551 с.
4. *Boris, J.P. and Book, D.L.* Methods Comput. Phys.– 16.– 1976. –P. 85 – 129.
5. *Harten A.J.* J.Comput.Phys.– Vol.49.– 1983.– P. 357 – 393.
6. *Parsons T.R., Takahashi M., H.Hargrave* Biological oceanographic processes. – Oxford, New York, Pergamon Press, 1984. – 324 p.
7. *Ляхин Ю.И.* О скорости обмена кислородом между океаном и атмосферой // Океанология.- 1980.- т.18.- N 6. – С.1014-1021.
8. *Vjorn Kjerfve.* Tides of the Caribbean Sea // Journal of geophysical research – Vol. 86, N C5.– 1981.– P. 4243-4247.
9. *Моделирование* компонентов экосистемы. Проблемы исследования и математического моделирования экосистемы Балтийского моря.– Вып. 3.– Л: Гидрометеиздат, ЛО ГОИН.– 1987.- 255с.
10. *Моделирование* процессов переноса и трансформации вещества в море.– Л:Гидрометеиздат, ЛГМИ, 1979.– 290 с.
11. *User Guide and Reference Manual Water Quality Module, release 2-4 MIKE21.* Danish Hydraulic Institute.– Haskoning-Carinsa, Cartagena, Colombia, December 1994. – 124 p.

Одесский филиал Института биологии южных морей НАН Украины
г.Одесса
Centro de Investigaciones oceanograficas e hidrograficas
Cartagena de Indias, Colombia