

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ
НА АКВАТОРИИ ОЗЕР ЯЛПУГ-КУГУРЛУЙ**

Приведены результаты численного математического моделирования распространения загрязняющих веществ на акватории придунайских озер Ялпуг-Кугурлуй. В качестве источников загрязнения рассматриваются дунайские воды, поступающие в водоем через соединительные каналы, и сток р.Ялпуг.

Ключевые слова: загрязнение, Придунайские озера, моделирование

Система двух взаимосвязанных озер Ялпуг-Кугурлуй образует самый крупный водоем Придунайской озерной системы. При этом озеро Ялпуг является самым глубоким водоемом этой группы, а озеро Кугурлуй фактически представляет собой южную мелководную часть озера Ялпуг, связанную с ним относительно широкой протокой (рис. 1). Озеро Кугурлуй связано с р.Дунай системой соединительных каналов (Скунда, 105 км, Репинда), через которые осуществляется наполнение озер дунайской водой в период паводков. В северную часть озера Ялпуг впадает малая река с аналогичным названием.

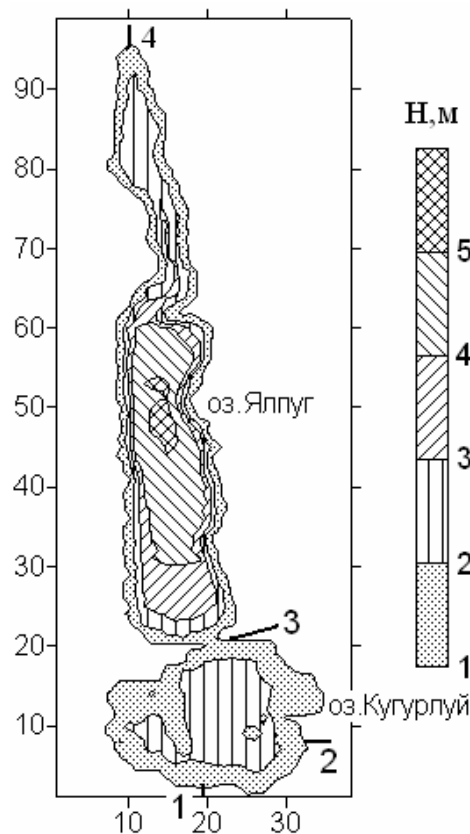


Рис. 1 – Батиметрическая карта озер Ялпуг-Кугурлуй, м, при отметке уровня воды 2,46 м БС. Оси размечены в номерах узлов расчетной сетки. Пространственный шаг $\Delta x = \Delta y = 500$ м. Обозначения соединительных каналов с р. Дунай: 1- Скунда; 2 – 105 км; 3 – Репинда; 4 – р. Ялпуг.

Водоем используется для питьевого водоснабжения прилегающих населенных пунктов, рыбоводства, рекреации, а в летние месяцы осуществляется забор воды в

ирригационных целях. Учитывая, что речные воды – потенциальный источник загрязнения водоема, актуальной представляется задача исследования пространственно-временной изменчивости загрязнения вод оз.Ялпуг-Кугурлуй веществами, поступающими в водоем с дунайскими водами в период наполнения водоема и со стоком р.Ялпуг. В решении этой задачи заключается цель представляемой статьи.

Ранее, в работах [1,3,6] были исследованы особенности ветровой циркуляции вод, формирования уровня трофности, изменчивости составляющих водно-солевого баланса водоема в различные по водности годы.

Методы и материалы исследования. Для установления особенностей распространения загрязняющих веществ в водах оз.Ялпуг-Кугурлуй использовалась численная нестационарная гидродинамическая модель [2, 5]. При расчетах акватория водоема покрывалась горизонтальной расчетной сеткой 29×96 узлов с шагом 500 м. Использовались 4 расчетных уровня по вертикали в σ - системе координат. Глубины в лимане задавались соответствующими отметке уровня воды в водоеме 2.46 м БС (рис. 1).

Исходная система уравнений модели в приближении Буссинеска в правой декартовой системе координат записывается следующим образом.

Уравнения движения:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + B_x^{-1} \frac{\partial B_x u}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + fv + B_x^{-1} \frac{\partial}{\partial x} \left(2B_x A_h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + (1 - \beta_c) \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h \left[\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \beta_c C_{ws} B_x^{-1} u|u|. \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial vu}{\partial x} + B_y^{-1} \frac{\partial B_y v}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} - fu + B_y^{-1} \frac{\partial}{\partial y} \left(2B_y A_h \frac{\partial v}{\partial y} \right) + (1 - \beta_c) \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h \left[\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \beta_c C_{ws} B_y^{-1} v|v|. \quad (2)$$

Уравнение неразрывности

$$B_x^{-1} \frac{\partial B_x u}{\partial x} + B_y^{-1} \frac{\partial B_y v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (3)$$

Уравнение переноса неконсервативной примеси

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + B_x^{-1} \frac{\partial}{\partial x} \left(B_x u C_i - B_x D_h \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + B_y^{-1} \frac{\partial}{\partial y} \left(B_y v C_i - B_y D_h \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left((w + w_{gi}) C_i - D_v \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) = F_i(C_i, x, y, z) + Q_i(x, y, z, t). \quad (4)$$

Уравнение гидростатики

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -g\rho. \quad (5)$$

Здесь u, v, w - компоненты вектора скорости течений \vec{v} в направлениях x, y, z , соответственно; t – время; P – давление; $\rho_0 = const$; f - параметр Кориолиса; A_h, A_v – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентности, соответственно; ρ – плотность воды; g – ускорение свободного падения; C_i – концентрация i -го загрязняющего вещества в воде; w_{gi} – гравитационная скорость осаждения примеси; D_h и D_v – коэффициенты горизонтальной и вертикальной диффузии, соответственно; B_x и B_y – безразмерная, относительно размера ячейки расчетной сетки, ширина

потока в напрямленнях x і y , відповідно; β_c – множитель равный нулю, если канал отсутствует, и единице - в случае наличия канала; C_{ws} – коэффициент бокового трения о стенки канала; F_i – функция неконсервативности i -ой примеси (вещества), описывающая химико-биологические процессы ее трансформации; Q_i – приток вещества от внешних источников.

В такой модификации модель позволяет рассчитывать течения и перенос примеси в каналах, имеющих подсеточный масштаб в одном из горизонтальных направлений (ширина потока меньше шага расчетной сетки). Уравнения (1) - (4) автоматически переходят в традиционные уравнения, если положить $\beta_c = 0$ и $B_x = B_y = 1$.

При численной реализации приведенной выше системы уравнений переходят к криволинейной по вертикали системе координат (σ - системе), что, с одной стороны, улучшает вычислительные свойства модели, а с другой - позволяет более точно описать вертикальную динамическую структуру вод и распределение примеси в области малых глубин. Для этого используется спрямляющее преобразование дна вида:

$$\sigma = (h - z)/H; \quad H = h + d, \quad (6)$$

где σ - новая координата, изменяющаяся от поверхности до дна в пределах $[0, -1]$; H - полная локальная глубина; d - глубина при невозмущенном уровне моря; h - отклонение уровня моря от его невозмущенного состояния.

Уравнения движения в x, y, σ - системе координат принимают вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Hu}{\partial t} + B_x^{-1} \left(\frac{\partial HB_x uu}{\partial x} \right) + \frac{\partial Huv}{\partial y} + \frac{\partial u\tilde{w}}{\partial \sigma} = -gH \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{H}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} + fHv + \\ + B_x^{-1} \frac{\partial}{\partial x} \left(2HB_x A_h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + (1 - \beta_c) \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h H \left[\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right] \right) + H^{-1} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(A_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) - \\ - \beta_c C_{ws} HB_x^{-1} |u|u, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Hv}{\partial t} + \frac{\partial Hvu}{\partial x} + B_y^{-1} \frac{\partial (HB_y vv)}{\partial y} + \frac{\partial (v\tilde{w})}{\partial \sigma} = -gH \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{H}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y} - fHu + \\ + B_y^{-1} \frac{\partial}{\partial y} \left(2HB_y A_h \frac{\partial v}{\partial y} \right) + (1 - \beta_c) \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h H \left[\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right] \right) + H^{-1} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(A_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) - \\ - \beta_c C_{ws} HB_y^{-1} |v|v, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{где} \quad \tilde{w} = H \frac{\partial \sigma}{\partial t} = w - (1 + \sigma) \frac{\partial h}{\partial t} - u \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \sigma \frac{\partial H}{\partial x} \right) - v \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \sigma \frac{\partial H}{\partial y} \right). \quad (9)$$

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial h}{\partial t} + B_x^{-1} \frac{\partial}{\partial x} (HB_x u) + B_y^{-1} \frac{\partial}{\partial y} (HB_y v) + \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \sigma} = R - E, \quad (10)$$

где R – слой осадков, E – слой испарения.

Уравнение переноса неконсервативной примеси:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial HC_i}{\partial t} + B_x^{-1} \frac{\partial}{\partial x} \left(B_x H \left[u C_i - D_h \frac{\partial C_i}{\partial x} \right] \right) + B_y^{-1} \frac{\partial}{\partial y} \left(B_y H \left[v C_i - D_h \frac{\partial C_i}{\partial y} \right] \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left((\tilde{w} - w_{gi}) C_i - H^{-1} D_v \frac{\partial C_i}{\partial \sigma} \right) = HF_i(C_i, x, y, z, t) + HQ_i(x, y, z, t). \end{aligned} \quad (11)$$

Метод решения гидродинамической задачи предусматривает расщепление полной скорости течений на среднюю по глубине скорость (баротропная составляющая) и отклонения от нее на каждом расчетном горизонте (бароклинные составляющие). Это позволяет использовать при численном решении уравнений динамики различные временные шаги для баротропной и бароклинные составляющих горизонтальной скорости течений, поскольку первая связана с колебаниями уровня моря при прохождении длинных гравитационных волн и изменяется более быстро, чем вторая.

Компоненты баротропной составляющей скорости течений определяются как

$$U = \int_{-1}^0 u d\sigma \quad \text{и} \quad V = \int_{-1}^0 v d\sigma, \quad (12)$$

а проинтегрированные по вертикали уравнения движения имеют вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial HU}{\partial t} + B_x^{-1} \frac{\partial}{\partial x} (HB_x \theta_{uu} UU) + \frac{\partial}{\partial y} (H\theta_{uv} UV) = -gH \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{H}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} + \\ & + fHV + B_x^{-1} \frac{\partial}{\partial x} \left(2A_h HB_x \frac{\partial U}{\partial x} \right) - (1 - \beta_c) \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h H \left[\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right] \right) + \tau_{sx} - \\ & - \tau_{bx} - \beta_c C_{ws} B_y^{-1} H \theta_{su} U |U|, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial HV}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (H\theta_{uv} UV) + B_y^{-1} \frac{\partial}{\partial y} (HB_y \theta_{vv} VV) = -gH \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{H}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y} - \\ & - fHU + B_y^{-1} \frac{\partial}{\partial y} \left(2A_h HB_y \frac{\partial V}{\partial y} \right) + (1 - \beta_c) \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h H \left[\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right] \right) + \tau_{sy} - \\ & - \tau_{by} - \beta_c C_{ws} B_y^{-1} H \theta_{sv} V |V|, \end{aligned} \quad (14)$$

где $\theta_{uu} = \int_{-1}^0 \frac{uu}{UU} d\sigma$, $\theta_{uv} = \int_{-1}^0 \frac{uv}{UV} d\sigma$, $\theta_{vv} = \int_{-1}^0 \frac{vv}{VV} d\sigma$, $\theta_{su} = \int_{-1}^0 \left(\frac{u}{U} \right) \left| \frac{u}{U} \right| d\sigma$,

$$\theta_{sv} = \int_{-1}^0 \left(\frac{v}{V} \right) \left| \frac{v}{V} \right| d\sigma.$$

Уравнение неразрывности для баротропной составляющей

$$\frac{\partial h}{\partial t} + B_x^{-1} \frac{\partial}{\partial x} (B_x HU) + B_y^{-1} \frac{\partial}{\partial y} (B_y HV) = R - E. \quad (15)$$

Бароклинные компоненты вектора скорости определяются как отклонения от средней по глубине скорости: $u' = u - U$ и $v' = v - V$, а уравнения для них получают вычитанием уравнений для баротропной составляющей скорости из уравнений для полной скорости:

$$\frac{\partial Hu'}{\partial t} + B_x^{-1} \frac{\partial}{\partial x} (B_x H [uu' - \theta_{uu} UU]) + \frac{\partial}{\partial y} (H [uv' - \theta_{uv} UV]) + \frac{\partial \tilde{w}u'}{\partial \sigma} =$$

$$fHv' + B_x^{-1} \frac{\partial}{\partial x} \left(2A_h HB_x \frac{\partial u'}{\partial x} \right) + (1 - \beta_c) \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h H \left[\frac{\partial v'}{\partial x} + \frac{\partial u'}{\partial y} \right] \right) +$$

$$+ H^{-1} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(A_v \frac{\partial u'}{\partial \sigma} \right) - \tau_{sx} + \tau_{bx} - \beta C_{ws} HB_x^{-1} (u|u| - \theta_{su} U|U|),$$

$$\frac{\partial H v'}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (H[uv - \theta_{uv} UV]) + B_y^{-1} \frac{\partial}{\partial y} (B_y H[vv - \theta_{vv} VV]) + \frac{\partial \tilde{w} v'}{\partial \sigma} =$$

$$- fHu' + B_y^{-1} \frac{\partial}{\partial y} \left(2A_h HB_y \frac{\partial v'}{\partial y} \right) + (1 - \beta_c) \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h H \left[\frac{\partial v'}{\partial x} + \frac{\partial u'}{\partial y} \right] \right) +$$

$$+ H^{-1} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(A_v \frac{\partial v'}{\partial \sigma} \right) - \tau_{sy} + \tau_{by} - \beta_c C_{ws} HB_y^{-1} (v|v| - \theta_{sv} V|V|).$$

Уравнение неразрывности для бароклинной составляющей

$$B_x^{-1} \frac{\partial}{\partial x} (B_x H u') + B_y^{-1} \frac{\partial}{\partial y} (B_y H v') + H^{-1} \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \sigma} = 0. \quad (18)$$

Конечно-разностная аппроксимация уравнений модели выполнялась с использованием неявных конечно-разностных схем. В частности, при аппроксимации дифференциальных уравнений для компонент баротропной составляющей скорости течения и уровня моря, использовался метод переменных направлений Аббота [13]. В уравнении (11) для описания горизонтального переноса применялась численная схема FCT [7, 8], а для вертикального - TVD [9]. Численные реализации остальных уравнений модели являются оригинальными и подробно описаны в [10].

Вертикальная турбулентная вязкость описывается на основе полуэмпирической теории турбулентности с использованием длины пути смешения. Мгновенная вязкость определяется как функция длины пути смешения, локального вертикального сдвига скорости и устойчивости водной колонки следующим образом

$$A_v = A_{v0} + A_z \left[C_{R0} (1 + C_{R1} R_i)^{-C_{R2}} \right], \quad D_v = D_{v0} + A_z \left[C_{R3} (1 + C_{R4} R_i)^{-C_{R5}} \right], \quad (19)$$

$$\text{где } A_z = [\kappa z (1 - z/H)]^2 \left(\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right)^{1/2}, \quad R_i = -g \frac{\partial \rho}{\partial z} / \left[\rho_0 \left(\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right) \right].$$

Здесь $\kappa = 0.4$ - постоянная Кармана; A_{v0} - пороговая вязкость; D_{v0} - пороговая диффузия; R_i - число Ричардсона; $C_{R0}, C_{R1}, C_{R2}, C_{R3}, C_{R4}$ и C_{R5} - константы, принимаемые равными 1.0; 10.0; 0.5; 1.0; 3.33 и 1.5, соответственно [12].

Коэффициенты горизонтального турбулентного обмена рассчитываются исходя из значения локального сдвига горизонтальной скорости и пространственного шага горизонтальной конечно-разностной сетки ΔL [14]

$$A_h = A_{h0} + C_{AH} \Delta L^2 \left[2 \left(\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right) + \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad D_h = A_h, \quad (20)$$

где коэффициент $C_{AH} = 0.1$ и $A_{h0} = 1.0 \text{ м}^2/\text{с}$ - фоновая величина.

Ветровые напряжения трения на верхней границе (воздух-вода) записываются как

$$\tau_{sx} = (C_{aw1} + C_{aw2}W_{10})W_{10}W_x; \tau_{sy} = (C_{aw1} + C_{aw2}W_{10})W_{10}W_y, \quad (21)$$

где W_x и W_y - составляющие вектора скорости ветра на высоте 10 м над уровнем моря по осям x и y , соответственно; W_{10} - модуль скорости ветра на высоте 10 м; C_{aw1} и C_{aw2} - коэффициенты трения, полагаемые равными 0.0008 и 0.000065 с/м, соответственно.

Придонные напряжения трения на нижней границе (вода-дно)

$$\tau_{bx} = \Phi u_b \text{ и } \tau_{by} = \Phi v_b, \text{ где } \Phi = \left[C_{wb1} + C_{wb2} (u_b^2 + v_b^2)^{1/2} \right]. \quad (22)$$

Здесь u_b и v_b - составляющие вектора придонной скорости течения; C_{wb1} и C_{wb2} - коэффициенты трения с типичными значениями 0.001 и 0.003 м/с, соответственно.

Граничные условия на поверхности моря определяются следующим образом

$$\tau_{sx} = A_v \frac{\partial u'}{\partial z} \text{ и } \tau_{sy} = A_v \frac{\partial v'}{\partial z}; D_v \frac{\partial S}{\partial z} = 0; w_{gi} C_i - D_v (C_i)_{,z} = 0. \quad (23)$$

$$\text{На дне: } \tau_{bx} = A_v \frac{\partial u'}{\partial z} \text{ и } \tau_{by} = A_v \frac{\partial v'}{\partial z}; D_v \frac{\partial S}{\partial z} = 0; w_{gi} C_i - D_v (C_i)_{,z} = Q_{ci}^{bot}. \quad (24)$$

Здесь, Q_{ci}^{bot} - поток примеси через границу «вода-донные отложения».

В точках впадения рек (каналов) граничные условия формулируются по типу «открытого канала» или «водопад». В первом случае задаются расходы воды Q_r , а также вертикальные профили бароклинной скорости, примеси:

$$U = Q_r / (B_x \Delta L H); V = Q_r / (B_y \Delta L H); u' = u_{top} \cos(\pi z / H); v' = v_{top} \cos(\pi z / H);$$

$$C = C_{top} + (C_{top} - C_{bot}) [(1 - \cos(\pi z / H))] \quad (25)$$

Здесь, ΔL - размер ячейки расчетной сетки; величины с индексом “top” соответствуют поверхностному слою воды, тогда как с индексом “bot” - придонному слою.

Задание граничных условий по типу «водопад» осуществляется следующим образом

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{Q_r}{B_x B_y \Delta L^2}; \frac{\partial HC}{\partial t} = \frac{C_{top} Q_r}{B_x B_y \Delta L^2}. \quad (26)$$

В качестве начальных условий принималось состояние покоя:

$$U = V = u' = v' = w = 0; A_h = A_{h0}, \quad A_v = A_{v0}, \quad D_v = D_{v0}. \quad (27)$$

Фоновый уровень концентрации примеси в начальный момент времени во внутренних точках расчетной области полагается равным нулю.

Программная реализация модели, выполненная на языке FORTRAN-90, позволяет рассчитывать ветровые и стоковые течения. С заданной временной дискретностью в ходе счета модель усваивает новую информацию о скорости и направлении ветра, величинах осадков и испарения, расходах воды по соединительным каналам и реки Ялпуг, концентрации примеси в речных водах. Между вводимыми дискретными значениями выполняется линейная интерполяция во времени.

Модельные расчеты проводились для периода времени с 1 марта по 31 сентября. Батиметрическая карта водоема построена на основе информации, полученной при выполнении проекта ТАСИС WW/SCRE1 / No.1 «Придунайские озера: устойчивое

восстановление и сохранение естественного состояния и экосистем» (2000-2002 гг.). Изменчивость скорости и направления ветра задавалась на основе данных наблюдений на ГМС Болград, выполненных в 2001 г. с 6-часовой дискретностью. Расход р.Ялпуг, приток вод р.Дунай по каналам, изменения уровня воды в озерах за счет дисбаланса осадки-испарение за расчетный период задавались на основе расчетов и оценок, выполненных в [3] (табл. 1).

Таблица 1 – Изменчивость расходов р.Ялпуг, притока дунайских вод по каналам, уровня воды в озерах за счет дисбаланса осадки-испарение, мм, для условий средневодного года [3]

Величина	Месяцы						
	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Расход р.Ялпуг, м ³ /с	5,79	0,27	0,18	0,77	1,15	0,95	0,41
Приток дунайских вод по каналам, м ³ /с:							
аналог 1985 г.,	25,4	18,0	49,7	11,0	–	–	–
аналог 2001 г.	32,0	93,0	12,7	–	–	–	–
Разница осадки – испарение, мм	41	-34	-54	-101	-124	-122	-57

Исследование пространственно-временной изменчивости загрязнения вод оз.Ялпуг-Кугурлуй веществами, поступающими в водоем с дунайскими водами и стоком р.Ялпуг проводилось на примере двух наиболее распространенных типов загрязняющих веществ (ЗВ) антропогенного происхождения: нефтепродуктов и патогенных микроорганизмов. Вероятность загрязнения дунайских вод нефтепродуктами значительно возрастает в связи с функционированием нефтетерминала портового комплекса Джурджулешты (Молдова) вблизи г.Рени. Патогенные микроорганизмы могут поступать с неочищенными сточными водами животноводческих ферм, канализационными сбросами. Из-за того, что практически вся территория бассейна реки Ялпуг находится на юге Молдавии, где уровень очистки сточных вод является неудовлетворительным, вероятность поступления в водоем ЗВ со стоком р.Ялпуг также велика.

При расчетах учитывалось самоочищение вод от рассматриваемых типов ЗВ в результате процессов их физической, химической и биологической трансформации. Деструкция и деградация ЗВ в водной среде описывалась кинетическим уравнением реакции 1- го порядка

$$F_i = \left. \frac{dC_i}{dt} \right|_{local} = -K_{ci}C_i, \quad (28)$$

где F_i – функция неконсервативности i -ой примеси в уравнении переноса (4); K_{ci} – коэффициент неконсервативности (деструкции) ЗВ, представляющий собой удельную скорость его трансформации в результате совокупного действия физико-химических и химико-биологических процессов самоочищения вод, без детализации их вкладов.

Коэффициент неконсервативности для нефтепродуктов K_{nf} задавался на основе приведенных в работе [4] данных лабораторных экспериментов по определению зависимости периода полураспада растворенных форм нефти τ_{nf} , в часах, от температуры воды T_w , в °С,

$$K_{nf} = \ln 2 / \tau_{nf}, \quad \text{где} \quad \tau_{nf} = 1260.42 - 54.928T_w + 0.5688T_w^2. \quad (29)$$

Удельная скорость патогенных микроорганизмов группы кишечной палочки (коли-формы (*Coliforms*)- аналог коли-индекса), в соответствии с [11], определялась зависимостью вида

$$K_{coli} = k_n \rho_T^{(T_w - 20)}, \quad (30)$$

где k_n – скорость гибели коли-форм в темноте при температуре воды $T_w = 20^\circ\text{C}$ и солености 0‰ , полагаемая равной $\approx 0.033 \text{ час}^{-1}$; $\rho_T = 1.07$ – основание поправочного коэффициента на температурные условия *in situ*.

Изменчивость среднемесячных значений температуры воды задавалась на основе данных наблюдений. Концентрация ЗВ в речных водах полагалась равной 100 условным единицам (процентам). Использование условных концентраций позволяет унифицировать результаты расчетов, поскольку фактически рассчитывается поле концентраций ЗВ в процентах от концентрации в источнике. Фоновая (начальная) концентрация ЗВ в водоеме принималась равной нулю. Рассматриваемые типы загрязняющих веществ можно рассматривать как примесь нейтральной плавучести, т.е. $w_{gi} = 0$.

Обсуждение полученных результатов. Результаты расчетов приведены на рис.2 – 4. Видно, что характер пространственно-временной изменчивости загрязнения водоема нефтепродуктами и патогенными микроорганизмами, поступающими с дунайскими водами, существенно различен. В период наполнения водоема нефтепродукты накапливаются в его водах, в результате чего граница области загрязнения смещается к северу (рис. 2.а-г). Область загрязнения вод оз.Ялпуг патогенными микроорганизмами занимает гораздо меньшую площадь, а ее северная граница относительно стабильна и не проникает на север далее центральной части водоема (рис. 3.а-г). При уменьшении объемов поступления дунайских вод, зона загрязнения патогенными микроорганизмами, в отличие от нефтепродуктов (рис. 2.г), сокращается и локализуется в районах расположения источников загрязнения - соединительных каналов (рис. 3.г). При прекращении поступления дунайских вод в оз.Ялпуг-Кугурлуй, очищение его вод от патогенных микроорганизмов происходит в течение одной декады (рис.3.д,е), в то время, как загрязнение нефтепродуктами сохраняется на уровне, превышающем 10 % (от концентрации в источнике), до сентября (рис. 2.д-ж). Наряду с общей тенденцией уменьшения концентрации нефтепродуктов в водоеме, в этот период имеет место сглаживание пространственных градиентов их распределения по акватории водоема.

Указанные особенности пространственно-временной изменчивости загрязнения вод оз.Ялпуг-Кугурлуй нефтепродуктами и патогенными микроорганизмами, поступающими с дунайскими водами, обусловлены различиями в их устойчивости к деструкции, протекающей биологическим, химико-биологическим и физико-химическим путем. Значения коэффициентов неконсервативности для рассматриваемых типов загрязняющих веществ отличаются на порядок (например, согласно формулам (29) - (30), при $T_w = 15^\circ\text{C}$ $K_{nf} = 1.23 \cdot 10^{-3} \text{ час}^{-1}$,

$K_{coli} = 2.4 \cdot 10^{-2} \text{ час}^{-1}$). Как результат, самоочистительный потенциал вод озер в отношении «биохимически мягкого» загрязняющего вещества, каким являются патогенные микроорганизмы, оказывается достаточным для стабилизации уровня и локализации области загрязнения в районах расположения источников поступления дунайских вод в заданных объемах. Однако в отношении нефтепродуктов, самоочистительная способность водоема, определяемая интенсивностью процессов гидродинамического разбавления и химико-биологической деструкции, оказывается ниже интенсивности поступления загрязняющего вещества с дунайскими водами, в результате чего происходит его накопление в водоеме.

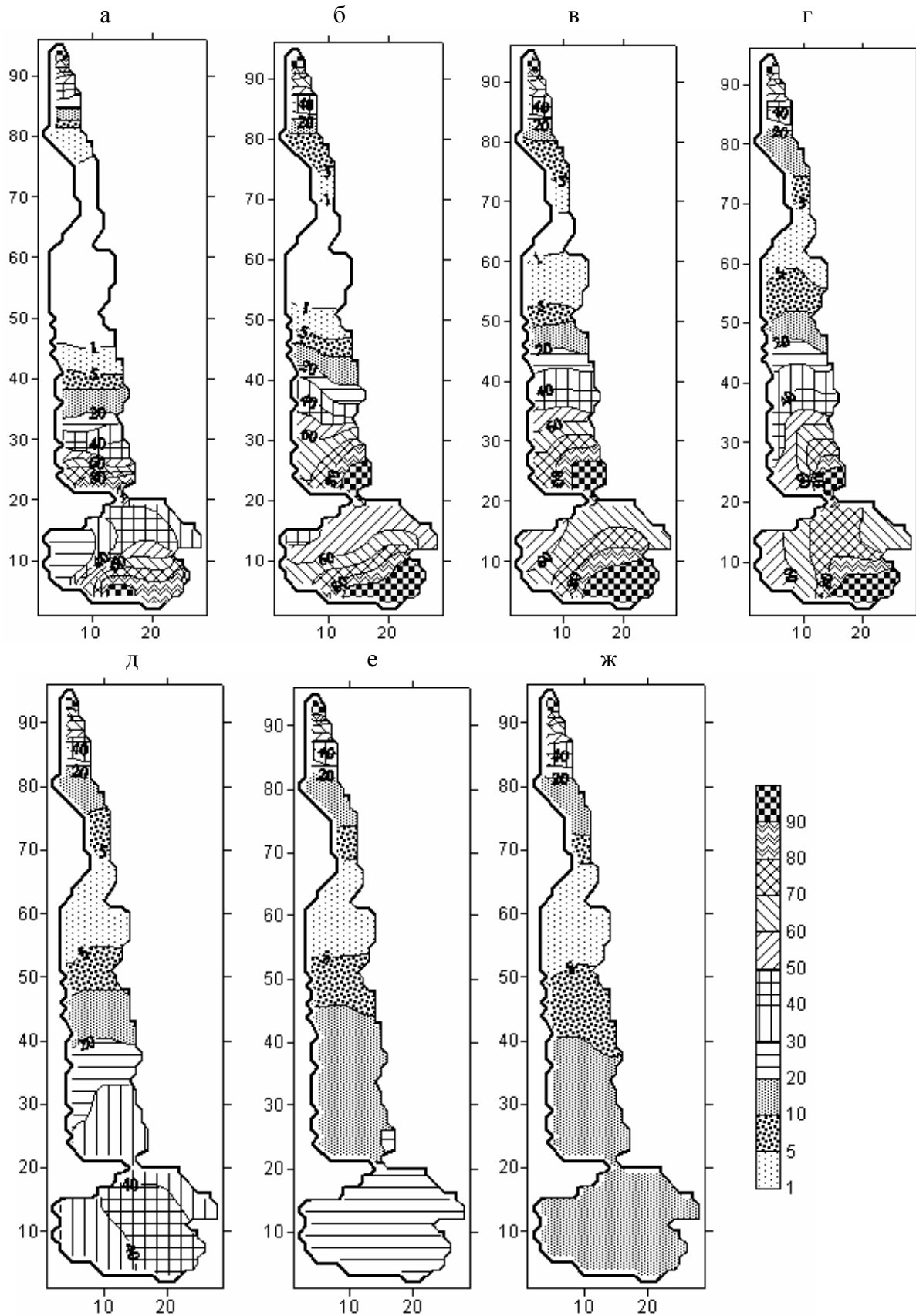


Рис. 2 – Уровень забруднення вод оз.Ялпуг-Кугурлуй нафтопродуктами (в % от концентрации в источнике), которые поступают с дунайскими водами и стоком р.Ялпуг: а) конец марта; б) апреля; в) мая; г) июня; д) июля; е) августа; ж) сентября. Приток дунайских вод соответствует 1985 г.

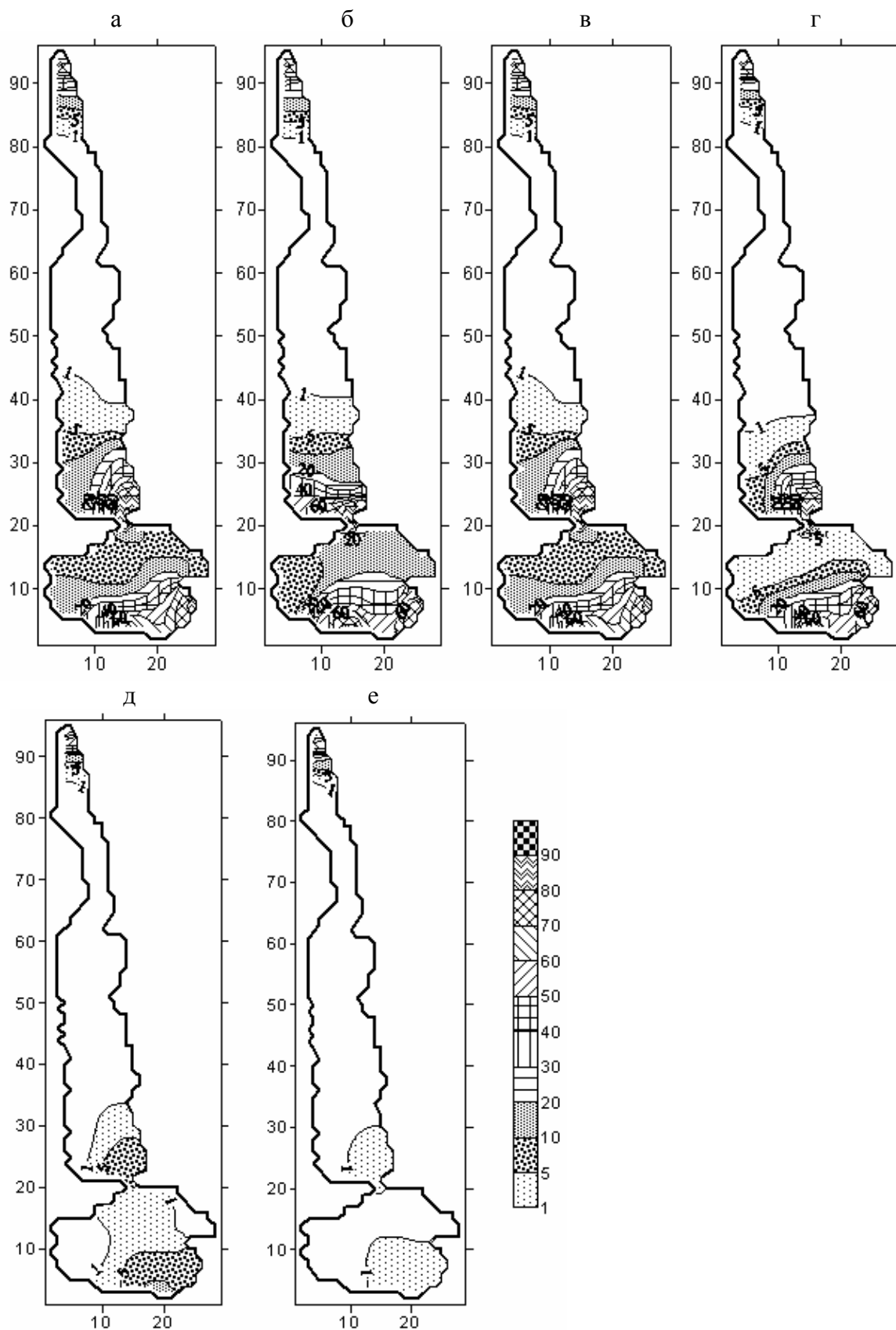


Рис. 3 – Уровень загрязнения вод оз.Ялпуг-Кугурлуй патогенными микроорганизмами (в % от концентрации в источнике), которые поступают с дунайскими водами и стоком р.Ялпуг: а) конец марта; б) апреля; в) мая; г) июня; д) 5 июля; е) 10 июля. Приток дунайских вод соответствует 1985 г.

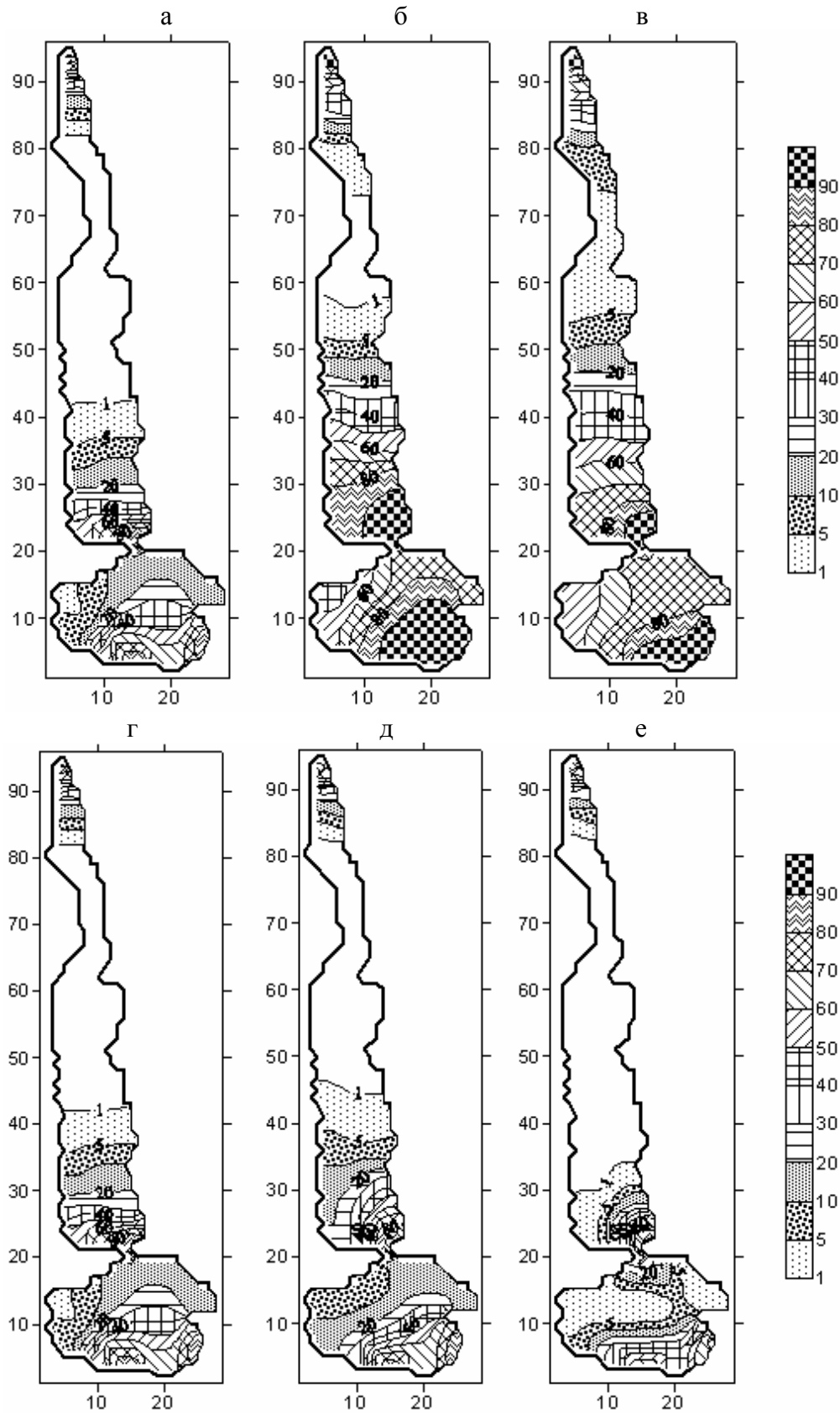


Рис. 4 – Уровень забруднення вод оз.Ялпуг-Кугурлуй нафтопродуктами (а-в) і патогенними мікроорганізмами (г-е) (в % від концентрації в джерелі), які поступають з дунайськими водами і стоком р.Ялпуг: а, г – кінець марта; б, д – квітня; в, е – травня. Приток дунайських вод відповідає 2001 р.

Как видно из рис. 2 – 4, область загрязнения водоема стоком р.Ялпуг ограничивается северной, относительно мелководной частью оз.Ялпуг.

Численные эксперименты с моделью при задании соотношения осадки-испарение, стока р.Ялпуг характерных для лет различной водности показали, что установленные особенности распространения загрязняющих веществ на акватории водоема практически не изменяются. Объясняется это относительно большим объемом вод и глубиной центральной части водоема.

Выводы. Моделирование распространения загрязняющих веществ на акватории озер Ялпуг-Кугурлуй показало, что при типичных для водоема объемах поступления дунайских вод, загрязняющие вещества с характерным значением коэффициента неконсервативности порядка 10^{-3} час⁻¹ будут накапливаться в водоеме, ухудшая качество его вод. Для загрязняющих веществ с характерным значением коэффициента неконсервативности порядка 10^{-2} час⁻¹ свойственна локализация областей загрязнения вблизи источников и относительно быстрое очищение водоема (в течение декады) при прекращении поступления дунайских вод. Наиболее чистой оказывается переходная область между центральной и северной частями оз.Ялпуг. Влияние стока р.Ялпуг на качество вод озера Ялпуг сказывается лишь в его северной части.

Список литературы

1. Гопченко Е. Д., Тучковенко Ю. С. Математическая модель эвтрофикации Придунайских озер // Гидробиологический журнал. – Киев: НАН Украины, Ин-т гидробиологии.– 2005.– Т. 41, № 1. – С. 92 - 105.
2. Иванов В.А., Тучковенко Ю.С. Прикладное математическое моделирование качества вод шельфовых морских экосистем. – Севастополь: МГИ НАН Украины. – 2006.- 368 с.
3. Кузниченко С.Д. Водный и солевой режим системы озер Кугурлуй-Ялпуг в условиях их зарегулирования: Дис... канд. геогр. наук: 11.00.007/ Одес.гос.экол.ун-т.- Одесса, 2005. – 294 с.
4. Процессы самоочищения морских вод от химических загрязнений / под ред. А.И. Симонова. – М.: Гидрометеоздат, труды ГОИН.– 1983.– Вып.167. – 152 с.
5. Тучковенко Ю.С. Гидродинамическая модель для расчета трехмерной циркуляции и термохалинной структуры вод северо-западной части Черного моря // Метеорологія, кліматологія та гідрологія.– 2002.– № 45. – С. 129 - 139.
6. Тучковенко Ю.С., Аль-Субари Али Ахмед Салех. Особенности циркуляции вод в озерах Ялпуг-Кугурлуй Придунайской системы // Метеорологія, кліматологія та гідрологія.– Одеса: Екологія, ОДЕКУ. -2008.– № 50, ч.2. – С. 152-157.
7. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2 т.- М.:Мир, 1991.
8. Boris J.P., Book D.L. // Methods Comput. Phys.– 1976. –№ 16.– P. 85-129.
9. Harten A.J. // J.Comput.Phys.–1983.– Vol.49.– P. 357-393.
10. Hess K.W. MECCA Programs documentation: Technical Report / NOAA.– NESDIS 46.– Washington, D.C., 1989.– 97 p.
11. Mancini J.J. Numerical Estimation of Coliform Mortality Rates under Various Conditions // Journal of Water Pollution Control Federation.-1978.- Vol.50 - P. 2477.
12. Munk W.H., Anderson E.R. Notes on the theory of the thermocline // J.Mar.Res.–1948.–№ 7.– P.276-295.
13. Sobey R.J. Finite-difference schemes compared for wave-deformation characteristics in mathematical modeling of two-dimensional long-wave propagation: Technical Memorandum, 32 / U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center.–USA, 1970.– 29 pp.
14. Tag P.M., Murray F.W., Koenig L.R. A comparison of several forms of eddy viscosity parametrization in a two-dimensional long-wave propagation: Technical Memorandum 32 / U.S.Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center.– USA, 1979.– 29 p.

Моделирование розповсюдження забруднюючих речовин на акваторії озер Ялпуг-Кугурлуй.

Ю.С. Тучковенко, Аль-Субари Али Ахмед Салех

Наведені результати числового математичного моделювання розповсюдження забруднюючих речовин на акваторії придунайських озер Ялпуг-Кугурлуй. У якості джерел забруднення розглядаються дунайські води, що поступають у водоймище через сполучні канали, та стік р. Ялпуг.

Ключові слова: забруднення, Придунайські озера, моделювання.

Modelling of distribution of polluting substances on water area of Yalpug-Kugurluy lakes. Y.S. Tuchkovenko, Al-Subary Ali Ahmed Saleh

The results of numerical mathematical modelling of distribution of polluting substances on water area of the Yalpug-Kugurluy lakes are presented. Waters of the river Danube which act in a reservoir through connecting channels, and flow of r.Yalpug are considered as sources of pollution.

Keywords: pollution, lakes of near-Dunay system, modelling