УДК 519.634

О МОДЕЛИРОВАНИИ ПЕРЕНОСА И ОСАЖДЕНИЯ ВЗВЕСИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ

В.Н. Полупанов, С.С. Жугайло

Керченский филиал («ЮгНИРО») ФГБНУ «Азовский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства»
РФ, г. Керчь, ул. Свердлова, 2
E-mail: polupanov_v_n@azniirkh.ru, zhugaylo_s_s@azniirkh.ru

Рассматривается возможность моделирования переноса облака инертной осаждающейся взвеси на мелководье и в прибрежных районах с использованием двумерной модели на основе клеточных автоматов. Адекватность модели подтверждается сравнением с аналитическим решением классического уравнения адвективной диффузии. Продемонстрированы примеры моделирования в мелководных прибрежных районах. Реализация осуществлена в виде веб-программы, предназначенной для оперативных расчётов характеристик загрязнения водных объектов взвешенными веществами при осуществлении гидротехнических работ выбросами взвеси с целью оценки ущерба водным биоресурсам.

Ключевые слова: адвективная диффузия, облако взвеси, седиментация, мелководье, дрейфовые течения, клеточные автоматы, двумерная модель, веб-программа.

Введение. В последние годы всё более востребованным является инструментарий для оперативных расчётов характеристик загрязнения источниками осаждающихся взвешенных веществ с целью оценки воздействия на водную среду в прибрежных районах. К настоящему времени существует большое количество методов моделирования распространения загрязняющих веществ, но одни из них недостаточно точны, хотя и легко реализуемы, а другие, наоборот, претендуя на достоверность результатов, избыточно «тяжелы» для использования в оперативной практике. Первые основаны на аналитических решениях при упрощённых предположениях о происходящих процессах и служат для предварительных оценок [1]. В основе последних обычно лежат непрерывные полуэмпирические дифференциальные уравнения переноса и турбулентной диффузии [2], решаемые интегрированием по всей расчётной области посредством дискретных сеточных методов. При моделировании в мелководных прибрежных областях возрастает роль локальных морфологических возмущений и при построении систем уравнений возникает ряд математических проблем, а их сеточные решения зачастую слишком трудоёмки и обладают различного рода неустойчивостями [3].

На практике иногда целесообразнее использовать изначально дискретные решения на основе клеточных автоматов (КА) [4], более «лёгкие» и доступные, чем сеточные, но, в то же время, более адекватные, чем упрощённые аналитические. КА-модели позволяют облегчать расчеты без огрубления детальности за счёт естественной локальности, когда результаты в клетке зависят лишь от результатов ближайших клеток расчётной (клеточной) области.

Постановка задачи. В настоящей работе предлагается КА-модель для расчёта характеристик загрязнения в рамках классической модели горизонтальной турбулентной диффузии (КМГТД) [2], основанной на прослеживании траектории движения плоского растекающегося облака инертной взвеси в турбулентном потоке, поле скорости u которого представимо в виде

$$u = \bar{u} + u', \qquad (1)$$

где $\bar{u}$ – адвективная составляющая, вызывающая перемещение частиц облака в направлении основного потока; u' – случайная составляющая, вызывающая растекание облака.

Предполагается, что в поле скорости (1) действует точечный источник M_{subst}, порождающий облако, концентрация взвеси в котором представима в виде гауссовой функции. Положение центра x_0 этой функции прослеживается во време-

ни t с помощью уравнения $dx_0/dt = \bar{u}(x_0\ t)$. КМГТД позволяет воспроизвести усреднённую по ансамблю всех реализаций концентрацию C взвеси, в двумерном однородном и изотропном потоке жидкости с постоянной глубиной H, движущемся с постоянной средней скоростью $\bar{u}$ в горизонтальной декартовой системе координат (x, y). Для направления вдоль оси x в случае, когда источник взвеси находится в точке $(x = 0;\ y = 0)$, уравнение адвективной диффузии имеет вид

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{u \cdot \partial C}{\partial x} + \frac{V_{sedim}}{H} = \\ = K_\ell(t)\left(\frac{\partial^2 C}{\partial x} + \frac{\partial^2 C}{\partial y}\right) + M_{subst}, \quad (2)$$

где V_{sedim} – скорость седиментации; $K_\ell(t)$ – коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии

$$K_\ell = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma^2}{t}, \quad (3)$$

где σ^2 – дисперсия взвеси.

Решение для такой задачи при $t > 0$ можно получить в виде гауссовой плотности вероятности концентрации взвеси

$$C(x, y, t) = \frac{M_{subst}}{2\pi H \sigma^2} \times \\ \times \exp\left[-\frac{(x - \bar{u}t)^2 + y^2}{2\sigma^2} - \frac{V_{sedim}}{H} t\right]. \quad (4)$$

Но в районах обширного мелководья поле средней скорости $\bar{u}$ редко бывает однородным, что приводит к неприемлемости предположения об изотропии турбулентной диффузии. Приходится учитывать изменчивость скорости течения, существенно зависящей от глубины места и близости берегов [2], и наличие зависимости между горизонтальной и вертикальной диффузией, которая может иметь место в мелководных районах [5]. Кроме этого, в таких районах возрастает роль морфологических возмущений турбулентности [6]. Перечисленные факторы являются основными, которые необходимо учитывать при трансформации облака, рассчитываемого по (4).

Авторы работы [7] разработали подход, названный ими бессеточным стохастическим методом дискретных облаков, на основе уравнения переноса и диффузии (2) с двумя параметрами $K_{lx}(t)$ и $K_{ly}(t)$ и стохастического метода дискретных частиц, порождающий ансамбль увеличивающихся со временем плоских эллипсовидных (анизотропных) облаков. Вычислительная эффективность такого метода по сравнению с сеточными оказалась существенно более высокой. Но со временем размеры облаков увеличиваются и «управление» облаком с помощью $K_l(t)$ становится проблематичным. Не подвергая сомнению перспективность такого подхода, можно лишь отметить проблемы: снижение вычислительной эффективности при попытке более полного учёта неоднородности на обширных мелководьях и в прибрежной зоне, и наоборот, недостаточную чувствительность неоднородности при приемлемой вычислительной эффективности. Решение этих проблем для акваторий небольшой протяжённости представляется возможным в КА-модели.

Описание КА-модели. Можно выделить основные аспекты КА-модели, а именно: клеточный автомат (основные принципы), ветровые течения, имитация турбулентной диффузии, учёт рельефа дна и берегов, перенос и осаждение взвеси.

Клеточный автомат (КА) представляет собой дискретную математическую модель процесса переноса взвеси, развивающегося в клеточной области на очередном временном шаге (итерации, цикле). В настоящей модели используется КА первого порядка, когда значения в клетках текущего цикла зависят от значений лишь одного предыдущего цикла. На каждом I-том цикле количество вещества $M_{i,j}$ в клетке с координатами (i, j) рассчитывается по одним и тем же КА-правилам, зависящим лишь от скорости течения U_k с направлением k, с использованием значений лишь ближайших (влияющих) клеток в некоторой окрестности. КА-модель построена на основе двумерного клеточного автомата с окрестностью Мура [7]. Такой автомат, с поправками в диагональных направлениях, поз-

воляет моделировать диффузионный процесс в областях, отличающихся изменчивостью характеристик переноса и диффузии.

Общее представление о КА-модели можно получить из схемы на рис. 1.

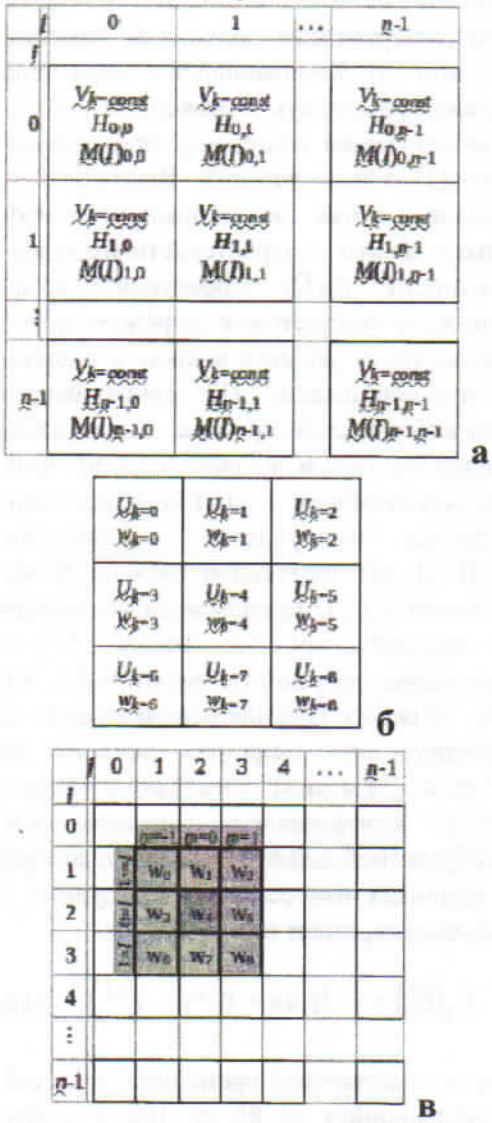

Рис. 1. Схема КА: а) исходные значения в поле КА; б) окрестность Мура; в) окрестность в поле КА

На рисунке обозначены величины: n – число клеток по длине и ширине области; V_k – скорость ветра (*м/с*) по одному из восьми румбов (СЗ÷ЮВ, k=0 – это *СЗ*, k=1 – *С* и т. д.); $H_{i,j}$ – глубина (*м*); $M_{i,j}$ – масса взвеси (*кг*); $U_0 \div U_8$ – скорости течений (*м/мин*), $k = 4$ соответствует вертикальной скорости; $w_0 \div w_8$ – весовые коэффициенты.

Обозначим клеточную область квадратом с линейным размером L (*м*), числом клеток ($n \times n$) и линейным размером клетки $\Delta x = L/n$. Положение любой клетки в пределах области можно определить с помощью индексов i и j. Скорости течений U_k представим в виде

$$U_k = \overline{U}_k + U'_k, \qquad (5)$$

где $\bar{U}$ – адвективная составляющая; U'_k – диффузионная составляющая.

Пусть схема на рис. 1 соответствует ситуации на цикле I. Правило КА для расчета массы взвеси в центральной клетке на цикле $(I+1)$ имеет вид

$$M(I+1)_{i,j} = \\ = \sum_{l=-1}^{l=1} \sum_{m=-1}^{m=1} w_k \cdot M(I)_{i+l,j+m}, \qquad (6)$$

$$k = 3l + m + 4; i = \overline{0, n-1}; j = \overline{0, n-1};$$

$$w_k = (U_k) / \sum_{k=0}^{8} (U_k), \qquad (7)$$

где вещество пополняется из источника (M_{subst}) и седиментируется (M_{sedim})

$$M(I)_{i,j} = \\ = M(I-1)_{i,j} + M_{subst}(I)_{i,j} - M_{sedim}(I)_{i,j}. \qquad (8)$$

Вброс определяется скоростью поступления вещества V_{subst} и интервалом выноса вещества из клетки с источником по направлению основного потока k

$$M_{subst}(I)_{i,j} = V_{subst} \cdot \Delta x / (U_k)_{i,j}. \qquad (9)$$

Седимент рассчитывается как часть взвеси на предыдущем цикле

$$M_{sedim}(I)_{i,j} = \\ = \sum_{l=-1}^{l=1} \sum_{m=-1}^{m=1} \frac{V_{sedim}}{H_{i+l,j+m}} \cdot \frac{\Delta x}{U_k} \cdot M(I-1)_{i+l,j+m}, \qquad (10)$$

где V_{sedim} задаётся согласно методике [1].

Для контроля в КА-модели закон сохранения вещества используется в виде

$$SM_{subst}(I) = \\ = SM(I) + SM_{sedim}(I) + SM_{out}(I), \qquad (11)$$

где обозначено вещество: вброшенное; находящееся в облаке; седиментированное; вынесенное за пределы области

$$SM_{sedim}(I)_{i,j} = \sum_{1}^{I} M_{sedim}(I)_{i,j}, \quad (12)$$

$$SM(I) = \sum_{i=1}^{n-2}\sum_{j=1}^{n-2} M(I)_{i,j}, \quad (13)$$

$$SM_{subst}(I) = \sum_{1}^{I}\sum_{i=1}^{n-2}\sum_{j=1}^{n-2} M_{subst}(I)_{i,j}, \quad (14)$$

$$SM_{sedim}(I) = \sum_{i=1}^{n-2}\sum_{j=1}^{n-2} SM_{sedim}(I)_{i,j}, \quad (15)$$

$$SM_{out}(I) = \sum_{i=0}^{n-1} M(I)_{i,j=0,n-1} + \sum_{j=1}^{n-2} M(I)_{i=0,n-1,j}. \quad (16)$$

Выражения (6)–(16) составляют основу КА-модели.

Моделирование ветровых течений осуществляется при предположении, что при скоростях ветра до 8–10 м/сек, наиболее часто используемых в инженерных расчётах, дрейфовые течения существенно преобладают над остальными (плотностными, стоковыми и др.). Это соответствует выводам работ [8–11]. Также предполагается, что в случае обширных прибрежных мелководий применим вывод о преобладании дрейфовых течений над волновыми [12]. Дрейфовое течение отождествляется с адвективной составляющей $\bar{U}_k$, расчёт которой ведётся в квадрате (клеточной области), покрывающем участок моря небольших размеров (~ 6 × 6 км и менее). Для расчёта усреднённой по глубине скорости течения ($\bar{U}_k$, *м/мин*) используется эмпирическая формула ГГИ [11]

$$\overline{U}_k = 0.01(b_0 - b_1 \cdot lgh) \cdot W_k^{b_2} \cdot 60, \quad k = 0 \vee 1...8, k \neq 4, \quad (17)$$

где W – скорость ветра (*м/с*) на высоте 10 м; h – глубина (*м*) в центральной клетке; $b_0 = 0{,}70$, $b_1 = 0{,}33$, $b_2 = 1{,}5$.

Имитация турбулентной диффузии в КА-модели происходит поэтапно. Далее описывается первый этап, на котором имитируется турбулентность в инерционном интервале в рамках КМГТД с учётом прибрежной мелководности путём введения скоростей сопутствующих течений по направлениям k, возникающих в предположении о возможности генерации турбулентных движений главным потоком [8]. КА-правило в общем виде можно представить выражением (5), соответствующем исходному предположению (1) о поле течений. Величины U'_k рассчитываются на основании имеющихся данных о характеристиках турбулентности: $K_\ell(\bar{U})$ – эффективном коэффициенте турбулентной диффузии и Λ – характерном размере вихревых инерционных образований. Последние, например в Керченском проливе, могут изменяться от 1000 м до 6000 м [8, 9]. Конкретная величина Λ для КА-модели подбирается из условия соответствия КМГТД при постоянной глубине. Коэффициент $K_\ell(\bar{U})$ принимается связанным со средней скоростью течения (17) на основании результатов работ [9–11, 13, 14]. В работе [10] для использования на практике при скоростях течений до 30 см/с (18 м/мин) предложена зависимость коэффициента горизонтальной турбулентной диффузии K_ℓ от $\bar{U}$, которая в единицах измерения, используемых в КА-модели, имеет вид

$$K_\ell(\overline{U}) = \tau \cdot \left(1.44 + 0.273 \cdot \overline{U}^2\right), \quad (18)$$

где τ – лагранжев временной масштаб, изменяющийся от 80 до 100 с в прибрежных районах Чёрного и Азовского морей (здесь τ = 1,7 мин по данным для района Арабатской стрелки [10]); K_ℓ измеряется в м^2/мин, $\bar{U}$ – в м/мин.

Зависимость (4) применительно к КА-модели может иметь вид

$$K_\ell(\overline{U}) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta\sigma^2}{\Delta t}. \quad (19)$$

Тогда из (19) при K_l, определяемом по (18) и при $\Lambda / L = \Lambda / (\Delta x \cdot n) = \Delta\sigma/\Delta x$, можно получить горизонтальные составляющие скорости $\bar{U}'$

$$\widetilde{U}' = 2 \cdot K_\ell \cdot \frac{L^2}{\Lambda^2} \cdot \frac{1}{\Delta x}. \qquad (20)$$

Перераспределение между вертикальными и горизонтальными составляющими U' и U'_4 происходит по формулам

$$U'_k = \frac{1}{8} \cdot \left(8 \cdot \widetilde{U}' + \alpha \cdot \widetilde{U}' \cdot w_h\right), \qquad (21)$$

$$U'_4 = \widetilde{U}' \alpha (1 - w_h), \qquad (22)$$

$$w_h = \frac{1}{h+1}, \qquad (23)$$

где $\alpha \sim 1$.

Таким образом, КА-правило (5) позволяет имитировать растекание облака взвеси с использованием экспериментальных данных об эффективном коэффициенте турбулентной диффузии и характерном размере инерционных колебаний, а за счёт (21)–(23) имитируется взаимозависимость горизонтальной и вертикальной диффузии [5].

Учёт рельефа дна и берегов в КА-модели возможен после загрузки массива глубин в GeoJSON-формате. Глубины интерполируется по клеточной области с использованием метода обратных взвешенных расстояний [15].

Перепад глубин в прибрежной мелководной полосе вызывает изменение поведения турбулизованных течений по сравнению с открытым морем из-за источников морфологических возмущений, что отражается на характере переноса и рассеяния взвеси [4, 8, 9, 15, 16]. В КА-модели соответствующее поведение составляющих U_k имитируется с использованием следующего алгоритма. Вначале вычисляются значения скоростей $\hat{U}_k$

$$\hat{U}_k = U_k \cdot q_k, \qquad (24)$$

$$q_k = \frac{\lambda_1}{1 + e^{-\lambda_2} \cdot \hbar_k}, \qquad (25)$$

$$\hbar_k = \frac{h_4 - h_k}{(h_4 + h_k)/2}, \qquad (26)$$

где $\lambda_1 = 2$; $\lambda_2 = 3$; $\hbar_k$ – перепад глубин.

КА-правило (24) может приводить к нарушению закона сохранения баланса скоростей, которое можно обнаружить при $\Delta\hat{U} \neq 0$

$$\Delta\hat{U} = \sum \hat{U}_k - \sum U_k, \qquad (27)$$

и пытаться восстановить

$$\widetilde{U}_k = \begin{cases} \hat{U}_k + \Delta\hat{U}\,\omega_k, & \Delta\hat{U} < 0; \\ \hat{U}_k - \Delta\hat{U}\,\omega_k, & \Delta\hat{U} > 0,\ (\hat{U}_k - \Delta\hat{U}\,\omega_k) > 0; \\ 0, & \Delta\hat{U} > 0,\ (\hat{U}_k - \Delta\hat{U}\,\omega_k) \le 0, \end{cases} \qquad (28)$$

$$\omega_k = \begin{cases} \dfrac{k_k}{\sum k_k}, & при\ \Delta\hat{U} < 0; \\ \dfrac{2 - k_k}{\sum (2 - k_k)}, & при\ \Delta\hat{U} > 0. \end{cases} \qquad (29)$$

КА-правило (28) не гарантирует восстановление баланса при $\Delta\hat{U} > 0$, когда при больших перепадах глубин усиливается скорость основного потока. Нарушение баланса определяется повторной проверкой

$$\Delta\widetilde{U} = \sum \widetilde{U}_k - \sum U_k \qquad (30)$$

и восстанавливается за счёт скорости основного потока

$$\widetilde{U}_k = \widetilde{U}_k - \Delta\widetilde{U}, \quad при\ \Delta\widetilde{U} > 0\ и\ \widetilde{U}_k = max. \qquad (31)$$

Восстановление баланса скоростей даёт возможность соблюдать условие сохранения вещества (16).

Перенос и осаждение взвеси имитируется с использованием упрощённого подхода [1, 7, 16], когда моделирование для каждой фракции можно выполнять поочерёдно, суммируя результаты. На каждом цикле рассчитываются концентрация взвеси C (мг/л) и толщина ила Z (мм)

$$C_{i,j}(I) = \frac{M_{i,j}(I)}{V_{i,j}}, \qquad (32)$$

$$Z_{i,j}(I) = \frac{SM_{i,j}(I)_{sedim}}{(1 - \varepsilon) \cdot \rho \cdot S_{i,j}}, \qquad (33)$$

где $V_{i,j}$ – объём яклетки (м^3); ρ – природная плотность взвеси (г/см^3); ε – пористость ила; $S_{i,j}$ – площадь клетки (м^2).

Реализация и апробация. *Про-*

граммная реализация представляет собой программу с кодовым наименованием CA2DSIST (Cellular Automata 2D Simulation Suspension Transfer). Программа написана на языке Javascript в среде HTML 4–5 [17], и библиотеки Highcharts [18] и jQuery [19].

Исходные данные вводятся с помощью формы, с возможностью выбора карты-схемы требуемого района. Местоположение клеточной области уточняется перемещением указателя мыши. Предусмотрен выбор разрешения клеточной области и местоположения клетки с выбросами. После ввода данных о выбросах кнопкой «Выброс» инициируют циклы основных расчётов. Результаты отображаются в виде карт, фрагменты которых показаны на рис. 2 на примере моделирования загрязнения от разведочного бурения в Тузлинской промоине Керченского пролива.

Отображаются также интерактивные графики, с помощью которых можно получить дополнительную информацию (рис. 3).

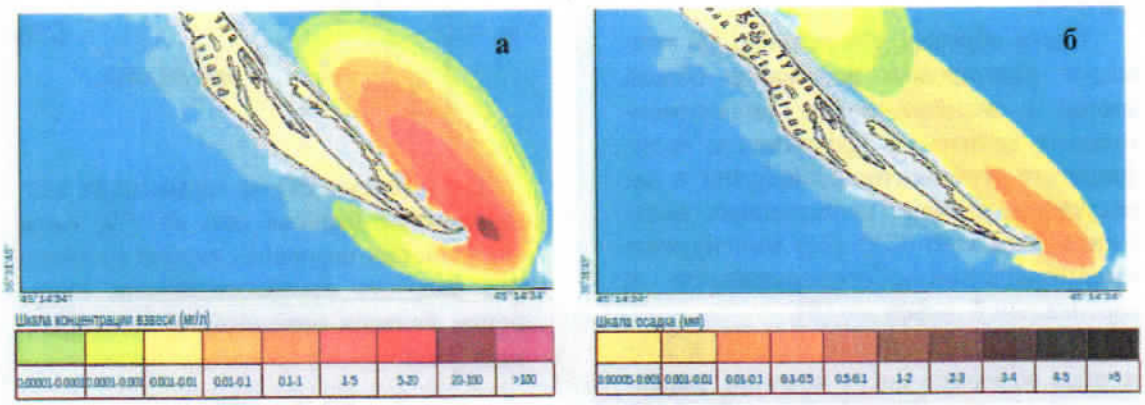

Рис. 2. Карта распределения: а) концентрации взвеси через 220 мин с начала выбросов (через 20 мин после окончания выбросов); б) толщины слоя осадка (ила) через 12 ч с начала выброса (показана также часть взвеси, не успевшей осесть

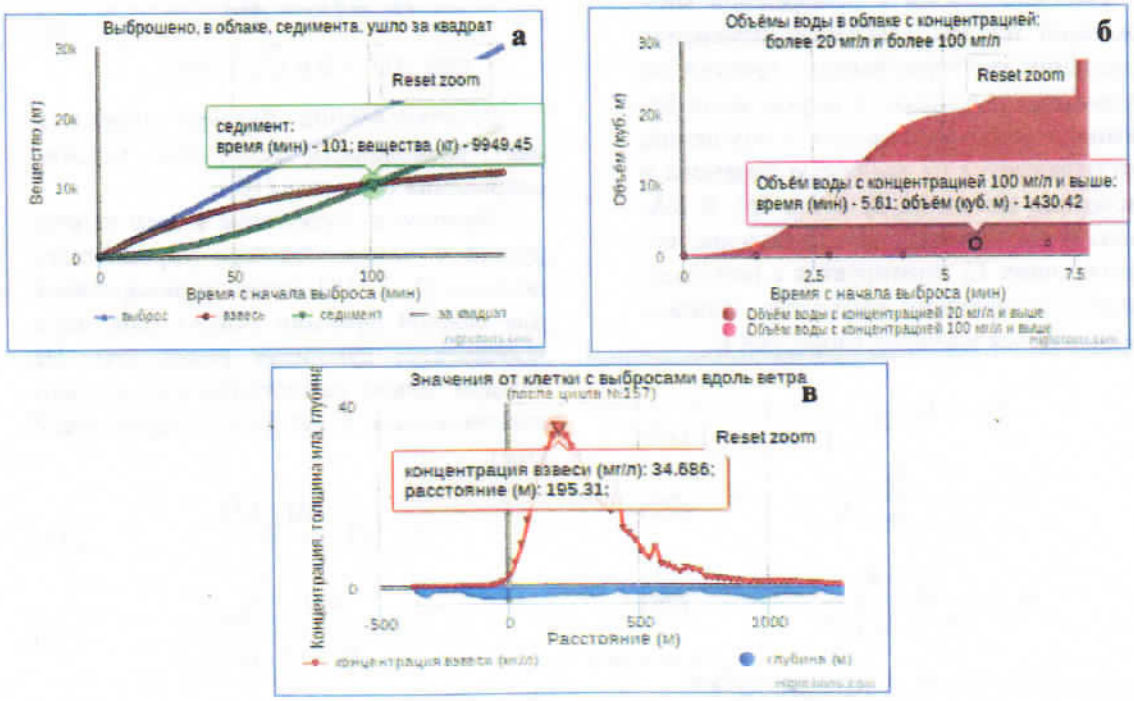

Рис. 3. Графики: а) позволяющие следить за соблюдением условия сохранения вещества; б) изменения объёмов воды с концентрациями выше заданных; в) характеристик по продольному разрезу через клетку с выбросами

Подобные графики для концентрации взвеси и толщины слоя осадка отображаются также по поперечным разрезам на заданном расстоянии от точки выброса.

После каждого цикла выводятся необходимые числовые характеристики:

– характеристики состояния вещества (в облаке, седиментированного, вынесенного за квадрат);

– характеристики в клетке при наведении указателя мыши;

– объёмы вод с концентрациями взвеси выше заданных и площади дна под ними;

– моменты, когда такие объёмы и площади были максимальными;

– площади с толщиной образовавшегося слоя осадка выше заданной и другие характеристики.

По ходу моделирования можно изменять входные данные и таким образом проводить разнообразные имитационные эксперименты.

Сравнение с аналитическими решениями проводилось при использовании КМГТД-решения (4): 1) при отсутствии и 2) наличии дрейфового течения.

Первый случай соответствуют $K_t(\bar{U}) = 2{,}4$ м^2/мин, определяемому по (18). Распределение концентрации взвеси имеет вид радиально-симметричного гауссова облака и практически не отличается от получаемого по КМГТД при глубинах более 10 м. С уменьшением глубины облако становится более плоским из-за усиления горизонтальных составляющих за счёт вертикальной. Распределение толщины слоя осадка также соответствует получаемому по КМГТД. Ниже показаны фрагменты одного из экспериментов (рис. 4–7).

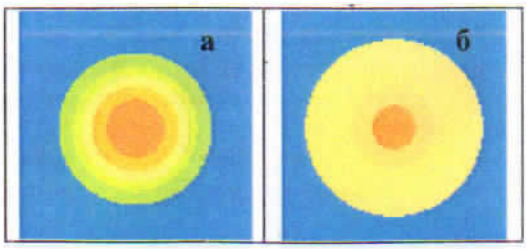

Рис. 4. Результаты вброса 10000 кг взвеси при отсутствии адвекции при $H = 15$ м, $L = 5000$ м, $n = 200$, $\Delta x = 25$ м, $\Delta t = 78$ мин, $Vsedim = 0{,}00164$ см/с: а) концентрация взвеси через 100 ч; б) толщина слоя осадка (ила) после осаждения взвеси

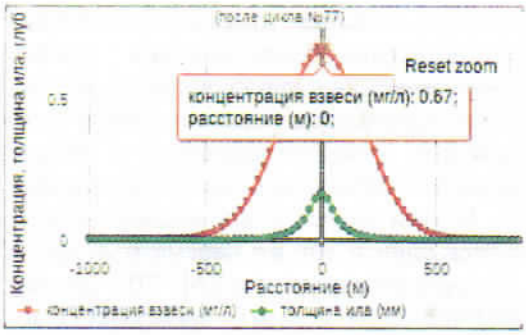

Рис. 5. Концентрация взвеси и толщина ила через 100 ч на разрезе, проходящем через центр облака (исходные данные рис. 4)

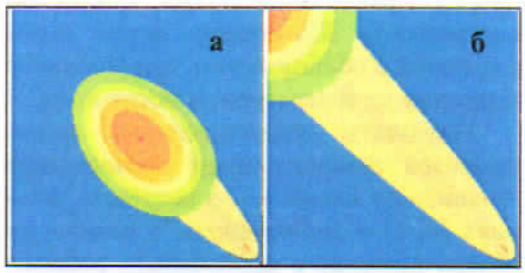

Рис. 6. Результаты вброса 10000 *кг* взвеси при юго-восточном ветре со скоростью 8 м/с при $H = 15$ м, $L = 5000$ м, $n = 200$, $\Delta x = 25$ м, $\Delta t = 5{,}4$ мин, $Vsedim = 0{,}00164$ см/с:
а) концентрация взвеси и толщина слоя осадка (ила) через 15 ч;
б) то же – через 38,7 ч

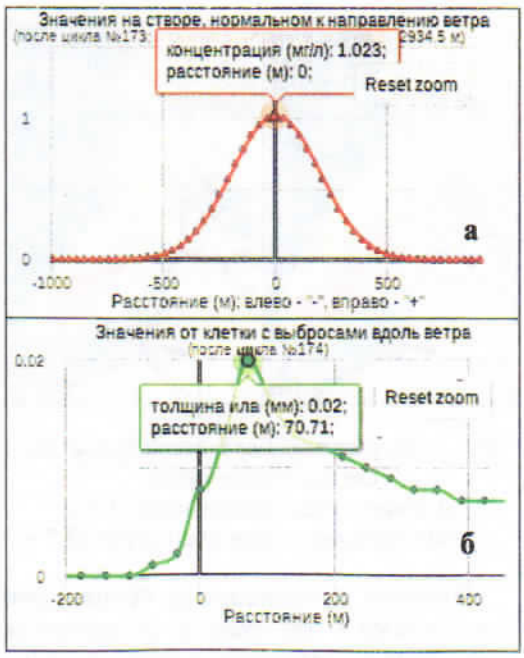

Рис. 7. Концентрация взвеси на поперечном разрезе через 15 ч после вброса (а) и толщина слоя осадка (ила) на продольном разрезе после полного осаждения взвеси (б) (исходные данные рис. 6)

При наличии дрейфового течения распределение концентрации взвеси приобретает вид эллипсовидного облака, соотношение продольного и поперечного размеров которого меняется в пользу первого с увеличением скорости течения.

В этом случае в КА-модели используется один и тот же параметр Λ, что и для первого случая, а в КМГТД – два параметра $K_{t1}(t)$ и $K_{t2}(t)$, зависимость которых от времени изменяется в достаточно широких пределах [2, 14, 20].

Моделирование в Керченском проливе, в том числе в прибрежных мелководных его районах позволяет судить об адекватности КА-модели путём сопоставления с обобщениями качественного характера из литературных источников.

Результаты многочисленных экспериментов демонстрируют соответствие имеющимся сведениям о ветровых течениях [8, 9] и наблюдениям о поведении облака примеси в прибрежных районах [14, 20].

На рис. 8 и 9 приведены фрагменты одного из таких экспериментов по моделированию загрязнения при отсыпке дроблёного бетона во время сооружения очередного участка насыпи в южной части Керченской бухты в октябре прошлого года.

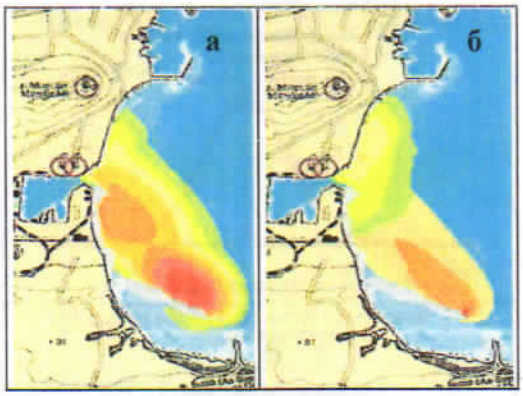

Рис. 8. Загрязнение Керченской бухты после окончания работ:
а) концентрация взвеси через 3,3 ч;
б) толщина слоя осадка (ила) через 35,7 ч

Отсыпка производилась 40-тонными самосвалами в три этапа по 20 машин за этап. Доля пылевидных частиц в отсыпаемом грунте – 2%. Каждая машина разгружалась 10 минут, так что производительность по взвеси равна 80 кг/мин при продолжительности этапа 200 мин.

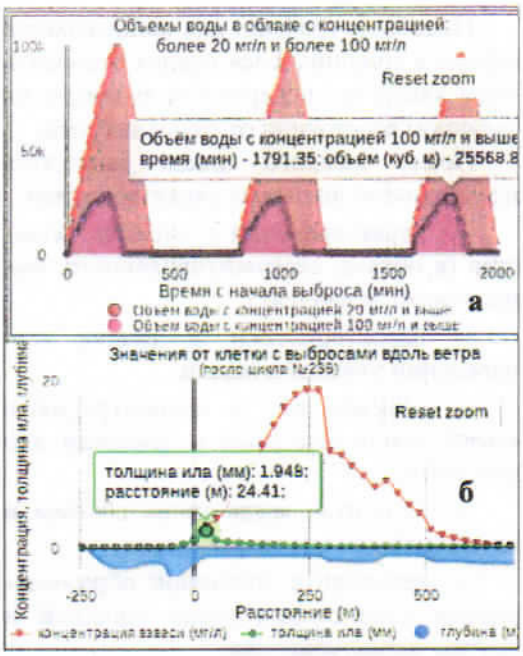

Рис. 9. Загрязнение Керченской бухты:
а) изменение объёмов воды с опасными концентрациями; б) концентрация взвеси и толщина ила на продольном разрезе через 3,3 ч

Перерыв между этапами – 600 мин. Размер частиц пыли – 0,01 мм, скорость седиментации – 0,00689 см/с. Плотность осадка с учётом пористости равна 1,35 г/см^3. Ветер юго-западный со скоростью 6 м/с. Размер клеточной области равен 4883 м, $\Delta x = 24{,}41$ м, $\Delta t \approx 8{,}4$ мин.

Далее демонстрируются возможности мелкомасштабного моделирования на примере выброса в ковше Камыш-Бурунской ТЭЦ за 30 минут работы экскаватора с производительностью по взвеси 100 кг/мин (рис. 10, 11). Скорость седиментации – 0,068 см/с, плотность осадка (ила) – 1,325 г/см^3, ветер – северный, 4 м/с, размер клеточной области – 747 м, $\Delta x = 3{,}73$ м, $\Delta t \approx 0{,}5$ мин.

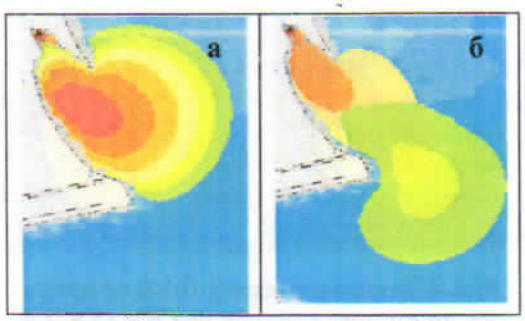

Рис. 10. Загрязнение в ковше ТЭЦ:
а) концентрация взвеси через 2 ч; б) толщина слоя осадка (ила) и остаточная концентрация взвеси через 6 ч после начала работ

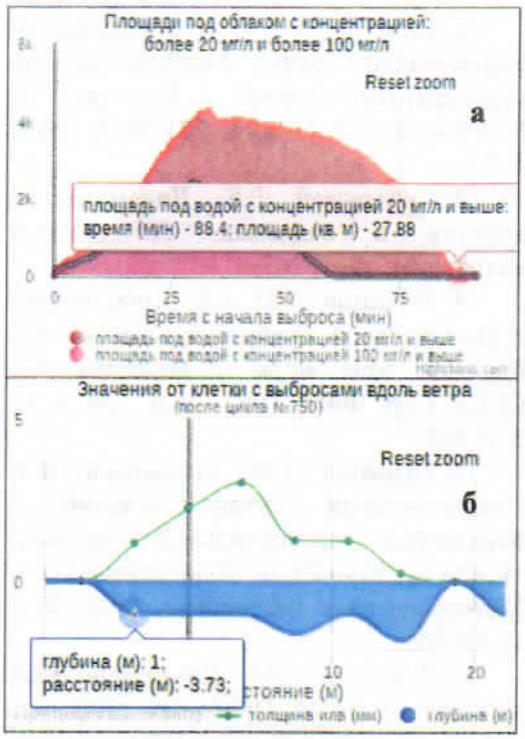

Рис. 11. Загрязнение Керченской бухты: а) изменение объёмов воды с опасными концентрациями; б) концентрация взвеси и толщина ила на продольном разрезе через 3,3 ч после окончания работ

Обсуждение. Прежде всего следует отметить факт соответствия радиально-симметричному нормальному распределению концентрации взвеси, получаемому по КА-модели при постоянной глубине при отсутствии адвекции. За счёт такого соответствия обеспечивается быстрая сходимость к однопараметрическому КМГТД-решению (4), осуществляемая в КА-модели подбором всего лишь одного параметра Λ, который, следует заметить, соответствует интервалу оценок этого параметра по натурным данным в Керченском проливе и других мелководных районах.

С использованием параметра Λ, подобранного для однопараметрического КМГТД-решения, результаты, получаемые по КА-модели при наличии дрейфового течения, не противоречат двухпараметрическим КМГТД-решениям, с помощью которых моделируются эллипсовидные облака концентрации взвеси, вытянутые вдоль основного потока.

Результаты моделирования в мелководных частях Керченского пролива представляются вполне реалистичными и соответствующими качественной картине адвективной диффузии в мелководных прибрежных зонах [6, 8, 9, 10–14, 20]. Качественной оценкой адекватности приходится ограничиться, поскольку не удалось найти пригодных для сравнения результатов моделирования другими методами.

Заключение. В предложенной КА-модели учитываются основные факторы, определяющие перенос и осаждение взвеси в рамках классической модели адвективной диффузии. Правильность расчётов подтверждается сравнением с результатами, получаемыми с помощью аналитического решения.

КА-модель позволяет воспроизводить отклонения горизонтальной турбулентной диффузии от изотропии и эллипсовидной анизотропии в мелководных прибрежных областях. Из-за отсутствия результатов, полученных альтернативными методами, в дальнейшем подтверждение адекватности КА-модели возможно сравнением с данными натурных наблюдений. В то же время КА-модель можно использовать при составлении плана таких наблюдений.

Реализация КА-модели в виде программы CA2DSIST отличается вычислительной эффективностью и позволяет оперативно выполнять имитационные эксперименты для определения особенностей загрязнения для различных вариантов исходных данных. Программа CA2DSIST удовлетворяет требованиям действующих документов к программным средствам по расчёту характеристик загрязнения водной среды при различных видах гидротехнического строительства, необходимых для определения размера вреда водным биоресурсам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Альтман Э.Н.* Структура течений Керченского пролива // Труды ГОИН. 1975. Вып. 125. С. 3–16.

2. *Альтман Э.Н., Лагутин Б.А., Толмазин Д.М.* Особенности горизонтальной турбулентности в мелководном проливе. Сб. работ ЕГМО ЧАМ, 1966. Вып. 4. С. 75–87.

3. *Интерполяция* по ОВР // ALGLIB [Электронный ресурс] – URL: http://alglib.sources.ru/interpolation/inversedistanceweighting.php (дата обращения 25.12.2016).

4. *Котеров В.Н., Юрезанская Ю.С.* Моделирование переноса взвешенных веществ на океаническом шельфе // Журнал ВМ и МФ. 2010. Т. 50. № 2. С. 375–387.

5. *Лабберс П., Олберс Б., Салим Ф.* HTML5 для профессионалов М.: Вильямс. 2011. 272 с.

6. *Методические* указания ВРДС 12-05-03. М.: МО РФ. 2003. 87 с.

7. *Монин А.С.* О взаимодействии между горизонтальной и вертикальной диффузией примесей в море // Океанология, 1969. № 1. С. 76–81.

8. *Озмидов Р.В.* Диффузия примесей в океане. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 279 с.

9. *Проблемы* химического загрязнения вод Мирового океана. Т. 2. Процессы турбулентной диффузии примесей в море / под ред. В.И. Заца. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 208 с.

10. *Прозоров А.А.* Методика расчета зоны короткопериодного воздействия дампинга грунтов дноуглубления: автореф. дисс. … канд. физ.-мат. наук. СПб, 2000. 19 с.

11. *Пухтяр Л.Д., Осипов Ю.С.* Турбулентные характеристики прибрежной зоны моря // Труды ГОИН, Вып. 1981. Вып. 158. С. 36–41.

12. *Роди В.* Модели турбулентности окружающей среды. Методы расчета турбулентных течений / Под ред. В. Колльмана; пер. с англ. М.: Мир, 1984. 464 с.

13. *Судольский Р.В.* Динамические явления в водоёмах. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 263 с.

14. *Толмазин Д.М.* Об особенностях горизонтальной турбулентности в прибрежной зоне моря // Известия АН СССР. Сер. ФАО, 1972. Т. 8. № 3. С. 339–343.

15. *Толмазин Д.М., Шнайдман В.А.* Статистический анализ течений и параметров горизонтальной турбулентности в Каховском водохранилище // Метеорология и гидрология, 1972. № 4. С. 55–60.

16. *Толмазин Д.М., Шнайдман Д.М., Ацуховская Ж.М.* Проблемы динамики вод северо-западной части Чёрного моря. Киев: Наукова думка, 1969. 130 с.

17. *Тоффоли Т., Марголус Н.* Машины клеточных автоматов / пер. с англ. М.: Мир, 1991. 280 с.

18. *Шадрин И.Ф.* Прибрежные ветровые и градиентные течения. Береговая зона моря. М.: Наука, 1981. 184 с.

19. *HIGHCHARTS* [Электронный. ресурс]. – URL: http://highcharts.com (дата обращения 25.12.2016).

20. *The jQuery* [Электронный ресурс]. – URL: https://jquery.org (дата обращения 25.12.2016).

MODELING OF SUSPENDED MATTER TRANSPORT AND DEPOSITION USING CELLULAR AUTOMATA

V.N. Polupanov, S.S. Zhugaylo

Kerch Branch ("YugNIRO") of Azov Sea Research Fisheries Institute
Russian Federation, Kerch, Sverdlov St., 2

Possibility for modeling of transport and deposition of the inert suspended matter cloud in the shallow waters and coastal areas using two-dimensional model based on cellular automata is investigated. Comparison of the model with an analytical solution of the advective diffusion classical equation showed its adequacy. An example of simulation in the shallow water area is provided. Implementation is carried out in the form of a web-based program designed for rapid calculation of pollution parameters with suspended matter emissions while conducting hydrotechnical operations in order to assess negative effects on water organisms.

Keywords: advective diffusion, cloud suspension, sedimentation, shallow waters, drift currents, cellular automata, two-dimensional model , Web programming.