

А.В.Багаев

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь***СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ДЕТРИТА В ЗАДАЧАХ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИУСТЬЕВОЙ ЗОНЫ ДУНАЯ**

Перенос и трансформация детрита описывается с помощью трехмерного уравнения класса адвекция – диффузия – реакция. Учитывается продукция детрита в поверхностном слое, его гравитационное оседание, процессы седиментации и эрозии на дне. В качестве гидродинамического блока используется трехмерная z -координатная модель Черного моря [1] с современным физическим наполнением. Анализируются и интерпретируются результаты численного эксперимента по распространению пятна детрита на северо-западном шельфе Черного моря. Реализованный подход может применяться в задачах экологического моделирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *детрит, трехмерная модель, северо-западный шельф Черного моря.*

Детрит – взвешенное мертвое органическое вещество, играет важную роль в экосистеме шельфа. По оценкам [2] до 80 % органического углерода содержится в детрите. Его концентрация влияет на оптические свойства вод, которые определяют продукционный потенциал экосистемы. На поверхности детрита активизируются микробиологические процессы, происходит сорбция газов и загрязняющих веществ, в том числе нефти, радионуклидов, хлорорганических соединений и т.д. Как правило, детрит, в отличие от таких компонент экосистемы, как фитопланктон, зоопланктон и биогенные вещества, прописан в современных моделях морских экосистем весьма упрощенно [3]. Это вызвано не столько недостатком экспериментальных данных, сколько лидирующей позицией пелагиальных экологических моделей по отношению к шельфовым, которая сложилась исторически. В экологических моделях пелагиали упрощенная параметризация детрита оправдана. В то время как современные задачи моделирования экологического состояния морского шельфа, заливов, бухт и т.д. стимулируют поиск более точных методов параметризации детрита в моделях, которые позволили бы описать процессы сорбции и десорбции вещества на его поверхности, седиментацию и взмучивание, эволюцию мощности органической компоненты донных осадков. Целью данной работы является совершенствование существующего подхода к идентификации детрита в задачах переноса загрязняющих веществ в приустьевой зоне Дуная.

Ставится задача описания нестационарных полей концентрации детрита $C(x, y, z, t)$, которые определяются из системы параболических уравнений второго порядка, граничных и начальных условий:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} + w_s \frac{\partial C}{\partial z} = \kappa_H \nabla^2 C + \frac{\partial C}{\partial z} \left(\kappa_V \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \gamma C, \quad (1)$$

где u, v, w – компоненты скорости течения; w_s – скорость гравитационного

оседания детрита; κ_H, κ_V – коэффициенты турбулентной диффузии по горизонтали и вертикали; γ – удельная скорость элиминации детрита, которая учитывает суммарный эффект от микробиологической деструкции, перехода в другой размерный класс и гидролиза детрита.

На поверхности ($z = 0$) выполняется граничное условие:

$$\kappa_V \frac{\partial C}{\partial z} = w_s C - F_C, \quad (2)$$

где F_C – поток детрита.

На дне ($z = H(x, y)$), в соответствии с моделью транспорта донных наносов [4], задается:

$$\kappa_V \frac{\partial C}{\partial z} = w_s C + F_e - F_d, \quad (3)$$

где F_e и F_d – потоки эрозии и седиментации соответственно, являющиеся функциями придонных сдвиговых напряжений τ_b , вычисляемых по формуле:

$$\tau_b = \rho_w K^2 \left[\ln \left(\frac{z_b}{z_0} \right) \right]^{-2} (u^2 + v^2), \quad (4)$$

где ρ_w – плотность воды; K – постоянная Кармана; z_b – толщина слоя трения (расстояние до дна), z_0 – шероховатость дна.

Считается, что

$$F_e = \begin{cases} M_0 \left(\frac{\tau_b}{\tau_{ce}} - 1 \right), & \tau_b \geq \tau_{ce}; \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad F_d = \begin{cases} w_s C_b \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}} \right), & \tau_b \leq \tau_{cd}; \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}. \quad (5)$$

Здесь M_0 – коэффициент интенсивности взмучивания; C_b – концентрация детрита у дна; τ_{ce} и τ_{cd} – критические значения напряжений.

Запас детрита в донных осадках $B(x, y, t)$ описывается уравнением:

$$\frac{\partial B}{\partial t} = F_d - F_e. \quad (6)$$

В качестве гидродинамического блока используется численная трехмерная z -координатная модель [5], которая основана на полной системе нелинейных уравнений движения и переноса тепла и соли в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости морской воды.

В качестве граничных условий на поверхности задаются суточные поля тангенциального напряжения трения ветра. Соответствующий массив был получен в результате осреднения данных 1988 – 1998 гг. с дискретностью 6 ч, которые были восстановлены по распределениям приземного давления. Ежедневные значения потоков тепла, осадков, испарения [6], которые были получены по реальным измерениям, ассимилируются согласно алгоритму [7]. На дне и твердых боковых стенках используются условия непротекания для нормальной составляющей вектора скорости и прилипания для тангенциальной составляющей, а также отсутствия потоков тепла и соли. На жидкой границе ставится условие Дирихле на входе и потоки импульса, тепла и соли на выходе.

Турбулентный обмен импульсом по горизонтали задается в виде бигармонического оператора с коэффициентом, равным $2 \cdot 10^{16}$ см⁴/с до глубины 550 м; $3 \cdot 10^{16}$ см⁴/с на 600 – 900 м; $4 \cdot 10^{16}$ см⁴/с на 700 – 1500 м; линейно увеличиваясь до $10 \cdot 10^{16}$ см⁴/с в интервале глубин 1600 – 2100 м. Турбулентная диффузия также имеет бигармоническое представление с коэффициентом равным $5 \cdot 10^{16}$ см⁴/с. Подсеточная турбулентная вязкость и диффузия по вертикали параметризуются с использованием гипотезы Филандера-Пакановски [8].

По горизонтали реализуется пространственная дискретизация на равномерной сетке C (по терминологии Аракавы) с шагом $\Delta x = \Delta y = 5$ км. По вертикали расчет скорости течений, температуры, солёности, уровня моря проводится на 45 неравномерно распределённых горизонтах. Вертикальная компонента скорости вычисляется между основными горизонтами. Шаг по времени Δt составляет 5 мин.

Уравнение (1) с граничными условиями в виде (2) – (6) решаются численно совместно с уравнениями гидродинамического блока с помощью TVD схем [9], которые используются для аппроксимации уравнений переноса тепла и соли. Такой подход позволяет удовлетворительно описать поля с большими градиентами концентрации, в частности, фронтальные зоны.

В рамках вышеописанного модельного подхода выполняется численный эксперимент, целью которого является расчет переноса и трансформации конечного поверхностного пятна детрита в области G , в которой задается однородный по пространству и постоянный по времени поток детрита

$$F_C = \begin{cases} 320 \text{ мг C / (м}^2 \cdot \text{сут)} & \text{при } (x, y) \in G \\ 0 & \text{при } (x, y) \notin G \end{cases}.$$

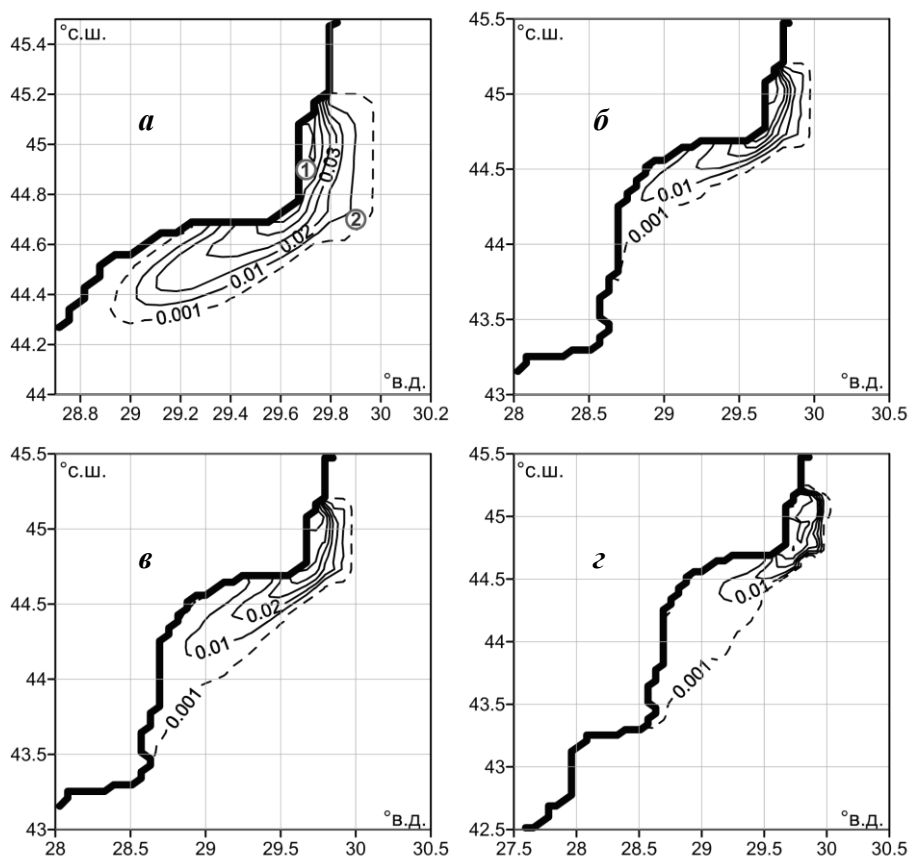
В начальный момент времени пятно имеет размер 30×55 км, и располагается в приустьевой зоне Дуная. Будем считать, что после весеннего цветения фитопланктона образовалось поверхностное пятно детрита. Перманентные цветения фитопланктона в виде пятен на поверхности являются типичными для северо-западного шельфа Черного моря, так как на прилегающих к устьям крупных рек акваториях первичная продукция не лимитируется поставкой биогенных элементов. Фоновая концентрация детрита в водном столбе, лежащем под областью G считается равной $C(x, y, z, 0)|_G = 3 \cdot 10^{-2}$ мг C/л, концентрация детрита в донных отложениях $B(x, y, 0)|_G = 300$ г C/м². Параметры численных экспериментов выбираются следующими: $w_s = 10^{-3}$ см/с, что соответствует частицам с размером порядка 20 мкм и плотностью 1,1 г/см³ [2]. В результате предварительных тестовых расчетов были выбраны постоянные по вертикали коэффициенты для турбулентной вязкости и диффузии: $\kappa_H = 10^5$ см⁴/с; $\kappa_V = 1$ см²/с. Удельная скорость элиминации детрита описывает лабильную фракцию органического вещества и считается равной $\gamma = 1,16 \cdot 10^{-6}$ с⁻¹ [2, 9]; $K = 0,4$; $z_0 = 0,05$ см; $M_0 = 10^{-4}$ г C/(см²·с); $\tau_{ce} = 0,26$ г/(см·с²); $\tau_{cd} = 0,25$ г/(см·с²).

Инициализация интегрирования задачи (1) – (6) осуществляется на 9600 модельный день расчета гидродинамического блока (что соответствует дате 4 марта климатического массива данных), когда по всему бассейну устанавливается квазипериодический режим циркуляции. Отслеживание переноса и трансформации детрита производится в течение одного модельного месяца, с дискретностью в одни сутки. Анализируются первые две недели.

На рис.1 показаны распределения концентрации детрита на горизонте 3 м на 3-ий, 7-ой, 14-ый и 21-ый модельный день соответственно. В весенний период преобладающим направлением ветра является северо – северо-восточное, со скоростями, достигающими 10 – 15 м/с.

Соответственно, доминирующим в исследуемой области является вдоль-береговое течение, проходящее в юго-западном направлении близ берегов Украины и Румынии. Скорости в стержне течения достигают 70 см/с, уменьшаясь с глубиной и в непосредственность близости от береговой черты. Лишь на горизонте 50 м существенно более слабые потоки направлены в сторону открытого моря. Учитывая слабый уклон дна на исследуемом участке шельфа, область распространения поля детрита в сторону открытого моря фактически оказывается ограниченной изобатой 75 м. Таким образом, в нашем эксперименте ОЧТ не оказывает определяющего влияния на перенос детрита.

Видно, что на третьи сутки (рис.1, *a*) под действием интенсивного вдоль-берегового течения, средняя скорость которого равна примерно 60 см/с, пятно сносится в юго-западном направлении. Фронтальная зона, которая характеризуется на горизонте 3 м высоким значением градиента концентрации (3 мкгС/(л·км)), вытягивается в юго-западном направлении, что является косвенным подтверждением доминирования адвективного горизонтального



Р и с . 1 . Результат моделирования концентрации детрита в мгС/л на горизонте 3 м: на 3-ий (*a*); 7-ой (*б*); 14-ый (*в*); 21-ый (*з*) день эксперимента.

потока над диффузионным (рис.1, б). С 7-ых по 14-ые сутки фронтальная зона проявляется особенно отчетливо. К 14-ым суткам пятно достигает м. Шабла (рис.1, в). На 21-ые сутки концентрация детрита падает из-за его элиминации в водной толще (рис.1, г).

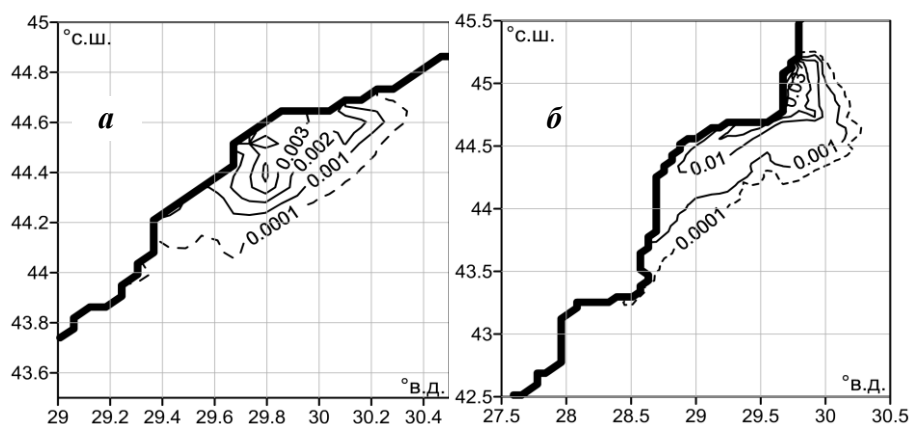
На рис.2 приведены распределения концентрации детрита на 14-ые сутки численного эксперимента на горизонте 50 м (соответствующая изобата выделена на рис.2, а).

Сравнительный анализ распределений концентрации детрита на горизонтах 3 и 50 м, а также запаса детрита в донных осадках показал, что с ростом глубины пятно приобретает более симметричную форму, характерную для чисто диффузионной задачи. Вблизи дна вертикальный поток концентрации детрита может изменять знак, что выражается в формировании компактных скоплений детрита в виде линз. Запас детрита в донных осадках (рис.2, б) характеризуется циркумконтинентальным типом распределения, ассиметричные особенности которого определяются взаимодействием диффузионного потока с вертикальными адвективными потоками, связанными с осаждением и взмучиванием детрита.

На рис.3 приведена временная эволюция вертикальных профилей концентрации детрита на условных ст.1 (44.9° с.ш.; 29.7° в.д.) и ст.2 (44.7° с.ш.; 29.9° в.д.). Положение станций показано на рис.1, а.

Анализ вертикальных профилей концентрации детрита показал следующее. На ст.1 наблюдается экспоненциальный тип распределения с минимальным значением концентрации у дна. Вертикальный поток вещества на дне либо равен нулю (на 3-ий день), что свидетельствует о компенсации седиментарного потока эрозионным, либо направлен из водной толщи в донные осадки, что говорит о доминировании седиментации. С течением времени максимальные значения концентрации детрита снижаются в результате седиментации и элиминации.

На ст.2 наблюдается иная картина. В целом, фиксируются более низкие по сравнению со ст.1 концентрации детрита, распределения Гауссова типа. Минимум концентрации располагается в слое 5 – 10 м. Наиболее интенсивный горизонтальный перенос характерен для слоя 15 – 25 м. Ближе к поверхности



Р и с . 2 . Результат моделирования концентрации детрита в мгС/л на 14-ый день эксперимента: на горизонте 50 м (а); запасы детрита на дне в мгС/м² (б).

заметно действие источника детрита на поверхности моря, а в придонном слое на концентрацию взвешенного вещества оказывают воздействие эрозионные процессы. Здесь, в отличие от ст.1 имеет место увеличение концентрации у дна. Поток вещества направлен из донных осадков в воду. Интенсивность эрозии зависит в большей степени от скорости течений, нежели от запасов вещества на дне. Влияние придонных эффектов прослеживается вплоть до горизонта 5 м.

Таким образом, вводится формализация трехмерного транспорта детрита с учетом процессов гравитационного осаждения, элиминации, взмучивания и седиментации детрита на шельфе. Данный подход сформирован на основе синтеза экологического моделирования с моделированием транспорта донных наносов.

В качестве гидродинамического блока используется высокоразвитая трехмерная модель с современным физическим наполнением.

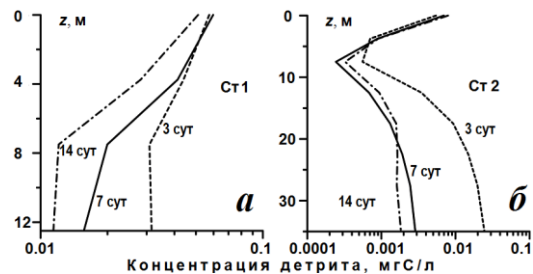
Модель переноса и трансформации детрита реализуется численно для проведения экспериментов по исследованию пространственно-временной эволюции трехмерного поля взвешенного вещества в приустьевой зоне Дуная под влиянием модельных гидродинамических полей.

Результаты численных экспериментов демонстрируют комбинированный эффект, который характеризуется формированием фронтальной зоны, переносом вещества струйным прибрежным течением, образованием компактных скоплений детрита в виде линз и т.д. Результаты расчетов не противоречат имеющимся теоретическим представлениям и экспериментальным данным.

Реализованный программный модуль готов для дальнейшего использования в расчетах транспорта загрязняющего вещества с учетом процессов депонирования-эмиссии на взвеси и в донных отложениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демьяшев С.Г., Коротаев Г.К. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана с неравным дном на сетке C // Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. – М.: ИВМ РАН, 1992. – С.163-231.
2. Витюк Д.М. Взвешенное вещество и его биогенные компоненты. – Киев: Наукова думка, 1983. – 210 с.
3. Иванов В.А., Любарцева С.П., Михайлова Э.Н., Шапиро Н.Б. Моделирование экосистемы черноморского шельфа приустьевой зоны Дуная // Морской гидрофизический журнал. – 1999. – № 6. – С.15-29.
4. Алексеев Д.В., Иванов В.А., Иванча Е.В., Фомин В.В., Черкесов Л.В. Исследование полей концентрации взвеси на северо-западном шельфе Черного моря при взмучивании донных осадков движущимся циклоном // Морской гидрофизический журнал. – 2007. – № 1. – С.3-19.



Р и с . 3 . Модельные вертикальные профили концентрации детрита на ст.1 (а), ст.2 (б).

5. *Белокопытов В.Н.* Термохалинная и гидролого-акустическая структура вод Черного моря: Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук.— Севастополь: МГИ НАН Украины, 2004.— 20 с.
6. *Кныш В.В., Демьшев С.Г., Кортаев Г.К.* Методика реконструкции климатической сезонной циркуляции Черного моря на основе ассимиляции гидрологических данных в модели // Морской гидрофизический журнал.— 2002.— № 2. - С.36-52.
7. *Pacanovsky R.C., Philander G.* Parametrization of vertical mixing in numerical models of the tropical ocean // J. Phys. Oceanogr.— 1981.— 11.— P.442-1451.
8. *Pietrzak J.* The use of TVD limiters for forward-time upstream-biased advection schemes in ocean modeling // Mon. Wea. Rev.— 1998.— 126.— P.812-830.
9. *Karl D.M., Knauer G.A.* Microbial production and particle flux in the upper 350 m of the Black Sea // Deep-Sea Res.— 1991.— 38, 2.— P.5655-5661.

Материал поступил в редакцию 15.11.2010 г.