

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА И ТРАНСФОРМАЦИИ ДЕТРИТА НА СЕВЕРО-ЗАПАДНОМ ШЕЛЬФЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

А.В. Багаев, С.Г. Демышев,
С.П. Любарцева

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: tolerans84@gmail.com

Численная гидродинамическая трехмерная модель Черного моря была дополнена блоком, отвечающим за решение транспортных адвективно-диффузионных уравнений, учитывающих поступление детрита с поверхности, его декомпозицию, а также эрозионно-седиментационные процессы на дне. Проведен анализ результатов расчетов эволюции поля детрита под влиянием трехмерных нестационарных полей течений.

Введение. Детрит – взвешенное мертвое органическое вещество, играет важную роль в экосистеме шельфа. По оценкам [1] 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. Современные задачи моделирования экологического состояния морского шельфа 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 на шельфе.

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

$$\frac{dC}{dt} + w_s C_z = \kappa_H \nabla^4 C + \kappa_V C_{zz} - \gamma C, \quad (1)$$

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:

$$\kappa_V \frac{\partial C}{\partial z} = w_s C - F_C \text{ при } z = 0, \quad (2)$$

где F_C – поток детрита.

На дне, в соответствии с моделью транспорта донных наносов [2] задается:

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

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

$$F_e = \begin{cases} M_0 \left(\frac{\tau_b}{\tau_{ce}} - 1 \right), & \tau_b \geq \tau_{ce}, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

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

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 [3], 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 [4], которые были получены по реальным измерениям, ассимилируются согласно алгоритму [5]. На дне и твердых боковых стенках используются условия непротекания и прилипания для компонент вектора скорости, а также отсутствия потоков тепла и соли. На жидкой границе ставится условие Дирихле на входе и потоки импульса, тепла и соли на вытоке.

Турбулентный обмен импульсом по горизонтали задается в виде бигармонического оператора с коэффициентом, равным $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^4/\text{с}$ до глубины 550 м, $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^4/\text{с}$ на 600 – 900 м, $4 \cdot 10^{16} \text{ см}^4/\text{с}$ на 700 – 1500 м, увеличиваясь до $10 \cdot 10^{16} \text{ см}^4/\text{с}$ в интервале глубин 1600 – 2100 м. Турбулентная диффузия также имеет бигармоническое представление с коэффициентом равным $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^4/\text{с}$. Подсеточная турбулентная вязкость и диффузия по вертикали параметризуются с использованием гипотезы Филандера-Пакановски [6].

По горизонтали реализуется дискретизация на равномерной сетке S (по терминологии Аракавы) с шагом $\Delta x = \Delta y = 5 \text{ км}$. По вертикали расчет проводится на 45 неравномерно распределенных горизонтах. Шаг по времени Δt составляет 5 мин.

Уравнения (1) – (6) решаются численно совместно с уравнениями гидродинамического блока с помощью TVD схем [7], которые используются при ап-

проксимации уравнений переноса тепла и соли. Такой подход позволяет удовлетворительно описать поля с большими градиентами концентрации, в частности – фронтальные зоны.

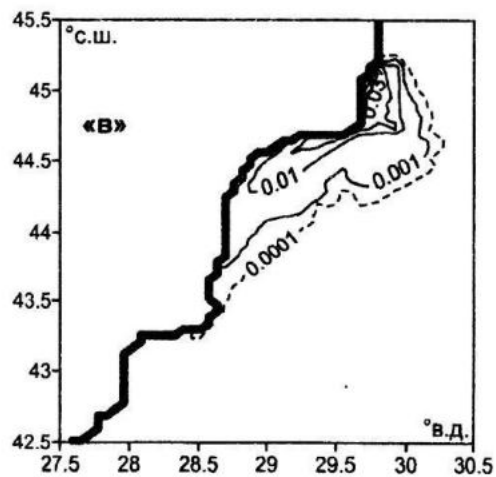
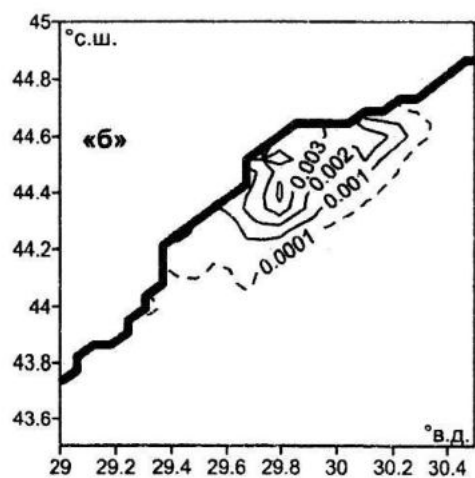
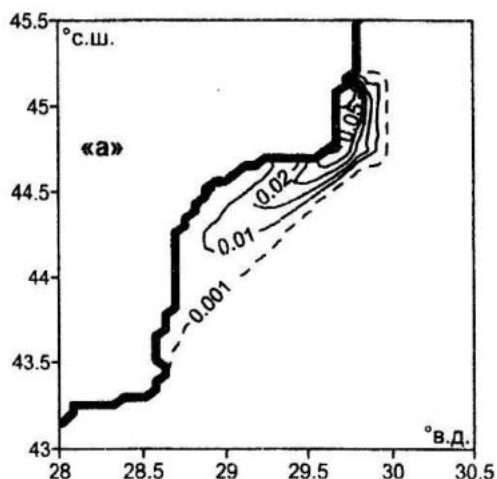
В рамках вышеописанного модельного подхода выполняется численный эксперимент, целью которого является расчет переноса и трансформации конечного поверхностного пятна детрита в области G , в которой задается однородный по пространству и постоянный по времени поток детрита

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

В начальный момент времени пятно имеет размер $30 \times 55 \text{ км}$, и располагается в приустьевой зоне Дуная. Будем считать, что оно образовалось в результате весеннего цветения фитопланктона. Фоновая концентрация детрита в водном столбе, лежащем под областью G , считается равной $C(x, y, z, 0)|_G = 3 \cdot 10^{-2} \text{ мгС}/\text{л}$, запас детрита в донных отложениях $B(x, y, 0)|_G = 300 \text{ гС}/\text{м}^2$. Параметры расчета выбираются следующими: $w_s = 10^{-3} \text{ см}/\text{с}$, что соответствует частицам с размером порядка 20 мкм и плотностью $1,1 \text{ г}/\text{см}^3$ [1]. В результате предварительных тестовых расчетов были выбраны постоянные по вертикали коэффициенты для турбулентной вязкости и диффузии: $\kappa_H = 10^5 \text{ см}^4/\text{с}$; $\kappa_V = 1 \text{ см}^2/\text{с}$. Удельная скорость элиминации детрита описывает лабильную фракцию органического вещества, и считается равной $\gamma = 1,16 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ [1, 8]; $K = 0,4$; $z_0 = 0,05 \text{ см}$; $M_0 = 10^{-4} \text{ гС}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$; $\tau_{ce} = 0,26 \text{ г}/(\text{см} \cdot \text{с}^2)$; $\tau_{cd} = 0,25 \text{ г}/(\text{см} \cdot \text{с}^2)$.

Чтобы повысить контраст на вертикальных профилях, который связан с эффектом взмучивания детрита донных отложений, тангенциальные напряжения климатического поля ветра усиливаются в области ($43 - 46^\circ \text{ с. ш.}$) – ($28 - 31^\circ \text{ в.д.}$) путем умножения на коэффициент 4,0.

Инициализация интегрирования задачи (1) – (6) осуществляется на 9600 модельный день расчета гидродинамического блока, (что соответствует дате 4 марта климатического массива данных)



Р и с. 1. Концентрация детрита в мгС/л на 14-ый день эксперимента:
 «а» - глубина 3 м, «б» - глубина 50 м;
 «в» - запасы на дне в мгС/м²

когда по всему бассейну устанавливается квазипериодический режим циркуляции. Отслеживание переноса и трансформации детрита производится в течение одного модельного месяца, с дис-

кретностью в одни сутки. Анализируются первые две недели.

Результаты. В весенний период преобладающим направлением ветра является северо/северо-восточное, со скоростями, достигающими 10 – 15 м/с. Соответственно, доминирующим в исследуемой области является вдольбереговое течение, проходящее в юго-западном направлении близ берегов Украины и Румынии. Скорости в стержне течения достигают 70 см/с, уменьшаясь с глубиной (и в непосредственной близости от береговой черты). Лишь на горизонте 50 м существенно более слабые потоки направлены в сторону открытого моря. Учитывая слабый уклон дна в исследуемом районе, область распространения поля детрита в сторону открытого моря фактически оказывается ограниченной изобатой 75 м. Таким образом, ОЧТ не оказывает существенного влияния на перенос детрита в нашем эксперименте.

На рис. 1а показана концентрация поля детрита в приповерхностном слое на 14-ый день эксперимента. Видно, что под действием течения происходит деформация границ начального пятна, его смещение в западном направлении. Также отчетливо прослеживается общее направление распространения взвеси - в сторону румынского побережья, в прибрежную акваторию, ограниченную устьем Дуная и мысом Калиакра. За пределами этого региона в течение эксперимента концентрация детрита была меньше на несколько порядков. Расположение и форма фронтальной зоны, которая характеризуется высоким значением градиента концентрации (3 мкгС/(л·км)), является косвенным подтверждением доминирования адвективного горизонтального потока над диффузионным.

На рис. 1б изображена карта концентрации поля детрита на глубине 50 м на 14-ый день. Видно, что фронтальная зона «размыта», что проявляется в уменьшении горизонтальных градиентов концентрации. Пятно взвешенного в морской воде детрита приобрело более симметричную форму, характерную для диффузионной задачи на фоне слабых придонных течений, «смывающих»

мертвую органику в открытое море. Также 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. 1в) также характеризуется циркум-континентальным типом распределения, асимметричные особенности которого определяются взаимодействием диффузионного транспортного механизма с вертикальными потоками, связанными с осаждением и взмучиванием детрита.

Анализ пространственно-временной изменчивости концентрации детрита показал, что на горизонте 3 м фронтальная зона наблюдается особенно отчетливо с 7-ых по 14-ые сутки эксперимента. К 21-ым суткам становится заметным падение концентрации детрита в ходе его элиминации из водного столба.

Анализ вертикальных профилей концентрации детрита показал следующее. Наименьшие значения концентрации наблюдаются на горизонте 5 – 10 м, наиболее активный горизонтальный перенос – в слое 15 – 25 м. Ближе к поверхности заметно действие источника детрита, а в придонном слое на концентрацию взвешенного вещества оказывают воздействие эрозионные процессы. Активность этих процессов зависит в большей степени от скорости течений, нежели от запасов вещества на дне. С течением времени максимальные значения концентрации взвеси снижаются в ходе седиментации и элиминации детрита.

Заключение. Предложена формализация комбинированного эффекта от гидродинамического транспорта, гравитационного осаждения, элиминации, взмучивания и седиментации детрита на шельфе.

На основе существующей гидродинамической модели реализован численный модуль для проведения эксперимента по исследованию пространственно-временной эволюции трехмерного поля взвешенного вещества в приустьевой зоне Дуная под влиянием модельных гидродинамических полей.

Получены результаты, которые не противоречат имеющимся теоретиче-

ским представлениям и экспериментальным данным.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Витюк Д.М.* Взвешенное вещество и его биогенные компоненты. – Киев: Наук. думка, – 1983. – 210 с.
2. *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 // МГЖ. – 2007. – № 1. – С. 3 – 19.
3. *Демьшев 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.
4. *Белокопытов В.Н.* Термохалинная и гидролого-акустическая структура вод Черного моря. // Дисс. канд. геогр. наук. – Севастополь: МГИ НАН Украины, – 2004. – 160 с.
5. *Кныш В.В., Демьшев С.Г., Коротаев Г.К.* Методика реконструкции климатической сезонной циркуляции Черного моря на основе ассимиляции гидрологических данных в модели // МГЖ. – 2002. – № 2. – С. 36–52.
6. *Pacanovsky R.C., Philander G.* Parameterization of vertical mixing in numerical models of the tropical ocean // J. Phys. Oceanogr. – 1981. – 11. – P. 442–1451.
7. *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.
8. *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, suppl. 2. – P. 5655–5661.