

# ПОСТРОЕНИЕ ФУНКЦИИ ВЛИЯНИЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ РАЙОНОВ ЧЕРНОГО МОРЯ

**В.С. Кочергин**

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
E-mail: ko4ep@mail.ru

*Предлагается использование решения сопряженных задач для построения функций чувствительности и оценки возможных источников загрязнения в Черном море. На основе проведения численных экспериментов с моделью переноса пассивной примеси построены функции чувствительности для северо-западной части Черного моря. Показано, что существенное влияние на формирование полей в исследуемой области оказывают прибрежные районы полуострова Крым и Кавказского побережья.*

При решении практических задач экологической направленности могут возникать вопросы на которые трудно ответить даже имея полную картину о динамике течений в исследуемом водоеме. Например, особый интерес представляет вопрос о том, откуда может прийти загрязнение в тот или иной район за определенный промежуток времени? Задачи подобного рода могут быть решены на основе интегрирования сопряженной задачи специального вида [1,2].

Рассмотрим в качестве основной задачи модель переноса пассивной примеси в Черном море в основе которой лежит уравнение переноса

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + AC &= f \\ \Gamma: \frac{\partial C}{\partial n} &= 0 \\ t = 0: C &= C_0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$A = \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} - k \frac{\partial^2}{\partial z^2} - A_H \Delta;$$

где  $C$  – концентрация примеси;  $f$  – функция источников;  $C_0$  – начальное поле концентрации;  $k$  – вертикальный коэффициент турбулентной диффузии;  $A_H$  – горизонтальный коэффициент турбулентной

диффузии;  $n$  – нормаль к границе  $\Gamma$  (области интегрирования  $D$ );  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$  – оператор Лапласа.

Задача (1) решается на временном интервале  $[0, \bar{t}]$ .

Рассмотрим следующую сопряженную задачу

$$\begin{aligned} -\frac{\partial C^*}{\partial t} + A^* C^* &= \frac{\delta(\Omega)}{\bar{t}} \\ \Gamma: \frac{\partial C^*}{\partial n} &= 0 \\ t = 0: C^* &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$A^* = -\frac{\partial U}{\partial x} - \frac{\partial V}{\partial y} - \frac{\partial W}{\partial z} - k \frac{\partial^2}{\partial z^2} - A_H \Delta$$

$A^*$  – формально сопряженный оператор в смысле выполнения тождества Лагранжа

$$(AC, C^*)_{D_t} = (C, A^* C^*)_{D_t}, \quad (3)$$

где  $D_t = D \times [0, \bar{t}]$ , а скалярное произведение определено следующим образом

$$(C, C^*)_{D_t} = \int_{D_t} C \cdot C^* dDdt. \quad (4)$$

Сопряженная модель (2) интегрируется в обратном направлении по времени. Получаемое при этом решение  $C^*$  является функцией влияния, которая указывает на то, какие области исследуемого водоема могут оказывать существенное влияние на формирование полей в интересующем нас районе  $Q$  [2]. В качестве модели переноса пассивной примеси была взята модель [3]. Она была адаптирована на сетку 5 километров. С таким же пространственным разрешением имелись расчетные величины компонент поля скорости и коэффициента вертикальной турбулентной диффузии, полученные по гидротермодинамической модели МГИ [4]. Не вдаваясь в тонкости проведения численных экспериментов перейдем к рассмотрению полученных результатов расчета.

Северо-западный шельф имеет важное значение для экологии Черного моря. В этом районе осуществляется нерест и нагул особо ценных пород рыб черноморского бассейна [5], поэтому в качестве области  $Q$

нами был выбран квадрат на северо-западном шельфе.

Расчет функций влияния производился на срок 2 месяца. Из рисунка 1 видно, что на выбранную нами область северо-западного шельфа на таком интервале времени существенное влияние оказывают восточное и южное побережья полуострова Крым вплоть и Кавказского побережья. Кроме этого из рисунка видно, что влияние может оказывать акватория порта Новороссийск и прикерченские нефтедобывающие делянки.

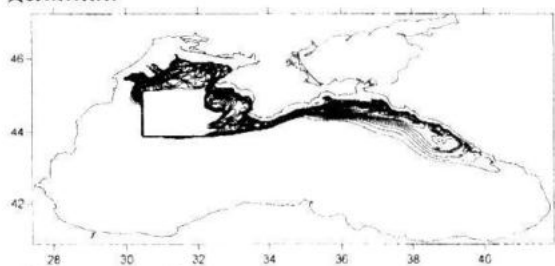


Рисунок 1 – Функция влияния на поверхности (срок интегрирования два месяца)

Расчет функции влияния для области находящейся в северо-западной части шельфовой зоны Черного моря (рисунок 2) показывает, что на формирование полей в данном районе могут оказывать существенное влияние паводковые воды Днепра и Дуная. Возможность такого распространения дунайских вод подтверждается изображениями, получаемыми со спутника [6]. На рисунке 3 показана функция влияния для указанной области Черного моря, вблизи Севастополя. Расчет произведен на 150 суток модельного времени (рисунки 3-5). При этом если в летний период на формирование полей в этом районе оказывает в основном Основное черноморское течение, то в весенний период основное влияние на формирование полей в указанном районе оказывает восточная часть северо-западного шельфа. Это скорее всего можно объяснить перемещением со временем в пространстве стрежня Основного черноморского течения. Видимо, в весенний период года его стержень находится существенно южнее, чем в летний период. Поэтому загрязнение, попадающее в Черное море в мае месяце в районе Керченского пролива может оказать существенное влияние на экологию Южного берега Крыма и Севастополя в летний период. Более того в весенний период во время прогрева вод та-

кими загрязнениями могут оказаться затонувшие нефтепродукты в холодный период года.

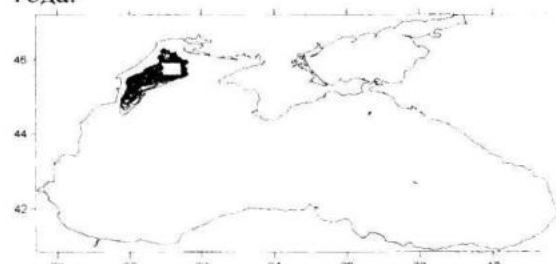


Рисунок 2 – Функция влияния на поверхности (срок интегрирования три месяца)

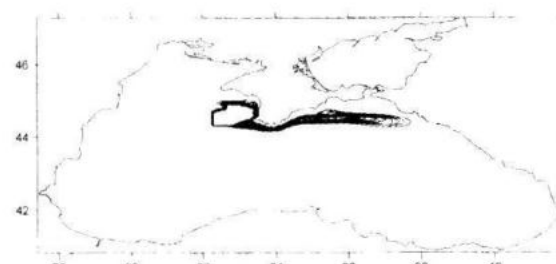


Рисунок 3 – Функция влияния на поверхности (срок интегрирования один месяц)



Рисунок 4 – Функция влияния на поверхности (срок интегрирования два месяца)

Из рисунка 5 видно, что в зимний период года информационная связь исследуемого района с Кавказским побережьем вновь возобновляется. Это указывает на возможность влияния загрязнений у кавказского побережья в зимний период года на экологическую обстановку Крымского побережья в летний период.

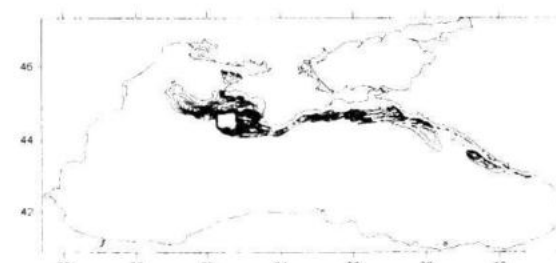


Рисунок 5 – Функция влияния на поверхности (срок интегрирования пять месяцев)

Для исследования вопроса формирования холодного промежуточного слоя (ХПС), рассмотрим сопряженную задачу:

$$\begin{aligned}
 & -\frac{\partial C^*}{\partial t} + \frac{\partial UC^*}{\partial x} + \frac{\partial VC^*}{\partial y} + \frac{\partial WC^*}{\partial z} = \\
 & = \frac{\partial}{\partial z} k(z) \frac{\partial C^*}{\partial z} + A_n \Delta C^* + \frac{\delta(\Omega)}{\bar{t}}, \quad (5) \\
 & \Gamma : \frac{\partial C^*}{\partial n} = 0, \\
 & t = \bar{t} : C^* = 0,
 \end{aligned}$$

где  $\Omega$  – слой ХПС в некотором квадрате в восточной части моря. Причем толщина ХПС и глубина его залегания относятся к летнему периоду года. При интегрировании модели на 150 суток мы получаем следующие функции влияния на поверхности моря (рисунок 6) и на глубине 62,5 метров (рисунок 7). Из рисунков видно, что ХПС в действительности в основном имеет адвективное происхождение и в зимний период года может увеличивать свой холодозапас за счет конвективных процессов в западной и северной частях моря а так же в причерноморском районе. Охлажденные воды, попадают в зону ОЧТ и переносятся им в исследуемую нами зону.

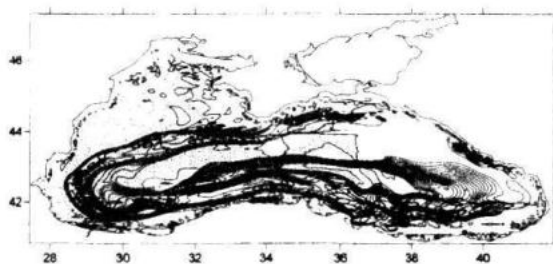


Рисунок 6 – Изолинии функции влияния на поверхности моря и области подъема и опускания вод в поверхностном слое

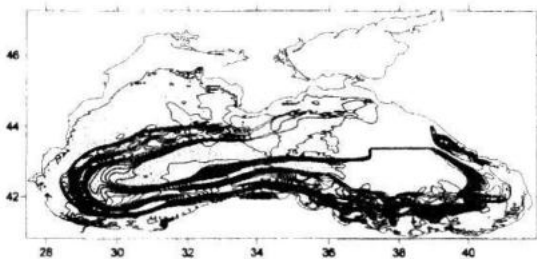


Рисунок 7 – Изолинии функции влияния на глубине 62,5 метров и области подъема и опускания вод на данном горизонте

В результате интегрирования сопряженной задачи появляется возможность не только оценивать влияние источников загрязнения на интересующие нас области Черного моря но и исследовать процессы формирования гидротермодинамических характеристик. Следует отметить что построенные функции влияния получены при заданных полях скорости, которые интегрировались по гидротермодинамической модели Черного моря. При наличии более достоверной оперативной информации о полях течений результаты расчетов могут быть уточнены, но и такой результат дает представление о пространственно-временной структуре функций влияния. Проведенные численные эксперименты показывают, что такой подход позволяет оценивать на различных временных интервалах влияние тех или иных областей Черного моря на интересующий нас район, который выбирается исходя из поставленной задачи.

## Л и т е р а т у р а

1. В.В. Пененко. Методы численного моделирования атмосферных процессов. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 352 с.
2. Г.И. Марчук. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М. Наука, 1982. – 320 с.
3. В.В. Фомин. Применение схем TVD для численного моделирования фронтальных зон солёности в мелком море. – Метеорология и гидрология, 2006, № 2, С. 59 – 68.
4. V.V. Knysh, S.G. Demyshev, G.K. Korotaev, A.S. Sarkisyan Four-dimensional climate of season Black Sea circulation // Russ. J. Numerical Analysis and Mathematical Modelling. - 2001. – 16, N .5. – P. 409 – 426.
5. Атлас охраны природы Черного и Азовского морей. – Санкт-Петербург, 2006, – 434 с.
6. Г.В. Смирнов, В.Н. Еремеев, М.Д. Агеев и др. Океанология / Средства и методы океанологических исследований. – М.: Наука, 2005. – 795 с.