

С.Г.Демышев, О.А.Дымова, В.С.Кочергин, С.В.Кочергин

Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВОЗМОЖНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ЧЕРНОМ МОРЕ
НА ОСНОВЕ МЕТОДА СОПРЯЖЕННЫХ УРАВНЕНИЙ
НА ПРИМЕРЕ 2016 ГОДА**

Для получения модельных оценок поля концентрации используется модель переноса пассивной примеси в Черном море с высокой степенью дискретизации. Входными параметрами данной модели являются результаты расчетов по модели Морского гидрофизического института с учетом реального атмосферного форсинга за 2016 г. по данным реанализа *SKIRON* и с горизонтальным разрешением менее 2 км. Для идентификации местоположения источника загрязнения использован метод сопряженных уравнений. В качестве примера рассматривается перенос взвешенного вещества из Керченского пролива в Черное море. Проведено сравнение модельных оценок со спутниковой информацией о концентрации взвешенного вещества. Показано, что возможный источник загрязнения располагался в области Керченского пролива и черноморского побережья Керченского п-ова, где и задавалось начальное распределение концентрации при интегрировании модели переноса пассивной примеси.

Ключевые слова: *идентификация источника, поле концентрации, перенос примеси, сопряженная задача, функции влияния, Черное море*

doi: 10.22449/2413-5577-2018-3-34-40

Интенсивное развитие инфраструктуры Азово-Черноморского региона естественным образом приводит к увеличению экологической нагрузки на акваторию Черного и Азовского морей. Поэтому построение систем, позволяющих осуществлять оперативную оценку экологической обстановки, является важной и актуальной задачей. Основными элементами таких систем являются численные модели циркуляции вод в изучаемом бассейне, а также модели переноса и трансформации загрязняющих веществ. Важной задачей также является идентификация возможных источников загрязнения, их местоположения и мощности. Для решения такой задачи используется метод сопряженных уравнений [1]. Решение сопряженной задачи позволяет построить функции влияния тех или иных параметров на концентрацию примеси и оценить местоположение возможных источников загрязнения акватории. Такие функции влияния определяют те области, которые оказывают наибольшее влияние на концентрацию примеси в исследуемом районе. В данной работе в качестве динамического блока была использована модель Морского гидрофизического института (МГИ) [2] с высоким пространственным разрешением.

Модель переноса пассивной примеси. Эксперимент по моделированию распространения примеси выполнен на основе модели турбулентного переноса примеси. Уравнение переноса в декартовых координатах имеет вид:

© С.Г.Демышев, О.А.Дымова, В.С.Кочергин, С.В.Кочергин, 2018

Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. вып.3. С.34-40.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(UC)}{\partial x} + \frac{\partial(VC)}{\partial y} + \frac{\partial(WC)}{\partial z} = A_H \nabla^2 C + \frac{\partial}{\partial z} A_V \frac{\partial C}{\partial z} + F^\pm(C), \quad (1)$$

где C – концентрация примеси; U, V, W – компоненты скорости течения; A_H – коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии; A_V – коэффициент вертикальной турбулентной диффузии; F^\pm – функция, описывающая источники/стоки примеси. Пусть M – область интегрирования модели на интервале времени $[0, T]$, Γ – граница области M ; $M_t = M \times [0, T]$, n – нормаль к границе.

В качестве граничного условия на свободной поверхности ($z = 0$) задается отсутствие потока из атмосферы:

$$A_V \frac{\partial C}{\partial z} = 0. \quad (2)$$

На дне и на твердых границах ставятся условия отсутствия потока вещества. На зональном участке границы в области Керченского пролива, где происходит обмен веществом между Черным и Азовским морями, ставятся следующие условия:

$$v = v^K, \quad C = C^K, \quad (3)$$

где v^K – скорость в проливе; C^K – концентрация в проливе. Скорость в проливе рассчитана по среднемесячным климатическим значениям расходов в Керченском проливе с учетом направления потока [3]. При этом скорость течений в проливе может иметь различное направление в зависимости от среднеклиматической гидрометеорологической ситуации. В начальный момент времени задано поле концентрации $C_0(x, y, z)$.

Конечно-разностные аналоги дифференциальных уравнений построены на сетке C . Для расчета advективных слагаемых используется TVD -схема, горизонтальный диффузионный перенос аппроксимирован гармоническим оператором с коэффициентом $A_H = 10^5 \text{ см}^2/\text{с}$. Значения коэффициента турбулентной диффузии по вертикали заданы в диапазоне $2,5 - 0,03 \text{ см}^2/\text{с}$ от поверхности до дна [4].

Источники и стоки примеси отсутствуют. Расчет выполнен на сетке с пространственным разрешением 1,6 км, по вертикали задано 27 z -горизонтов, шаг по времени равен 1,5 мин. Скорости течений получены по результатам численного эксперимента по моделированию циркуляции Черного моря на основе модели МГИ с учетом реального атмосферного форсинга за 2016 г. по данным реанализа *SKIRON*. Подробное описание уравнений модели представлено в [2].

Сопряженная задача. Уравнению (1) с краевыми условиями (2) – (3) и начальными данными поставим в соответствие сопряженную [1] задачу:

$$-\frac{\partial \tilde{N}^*}{\partial t} - \frac{\partial(UC^*)}{\partial x} - \frac{\partial(VC^*)}{\partial y} - \frac{\partial(WC^*)}{\partial z} = A_H \nabla^2 \tilde{N}^* + \frac{\partial}{\partial z} A_V \frac{\partial C^*}{\partial z}, \quad (4)$$

$$z = 0 : A_V \frac{\partial C^*}{\partial z} = 0, \quad z = H : A_V \frac{\partial C^*}{\partial z} = 0,$$

$$\Gamma : A_H \frac{\partial C^*}{\partial n} = 0, \quad (5)$$

$$C^* = 0 - \text{в Керченском проливе}, \quad C_T^* = h.$$

Умножая (1) – (3) на C^* и интегрируя по частям, с учетом (4) – (5) получим

$$\int_M h C dM = \int_M C_0 C^* dM . \quad (6)$$

Выбираем h в виде

$$h = \begin{cases} \frac{1}{m(\Omega)} - & \text{в области } \Omega \\ 0 - & \text{вне области } \Omega \end{cases} \quad (7)$$

где m – мера выбранной области $\Omega \in M$. Тогда в левой части выражения (6) получаем среднюю концентрацию \bar{C}_T в Ω на конечный момент времени T . Задавая $h = 1$ в области Ω , в левой части соотношения (6) получаем суммарную концентрацию на конечный момент времени. Такой подход успешно применялся для решения аналогичных задач в Черном и Азовском морях [5 – 9]. В отличии от результатов, полученных на 5 км сетке для Черного моря [7], в данной работе используются поля течений, которые рассчитаны по модели МГИ с высокой степенью дискретизации и с использованием данных о реальном ветровом воздействии. Расчеты по модели переноса пассивной примеси выполнены на сетке с пространственным разрешением 1,6 км. Такая же дискретизация по пространству использована при интегрировании сопряженной задачи (4) – (5), решение которой фактически является функцией влияния начальных данных на концентрацию примеси в выбранном районе.

Результаты численных экспериментов. Для периода до 12 октября 2016 г. акватория Черного моря была закрыта облаками, поэтому на эту дату начальное поле было задано сформировавшимся плюмом, исходящим из Керченского пролива. Расчет по модели переноса пассивной примеси осуществлялся на срок 6 суток. Результат численного моделирования изображен на рис.1, *a*, который хорошо согласуется с информацией со спутника для этой же даты (рис.2). На рис.2 светлые области на поверхности моря соответствуют повышенным значениям концентрации взвеси. Максимальные концентрации примеси расположены в Керченском проливе, откуда продолжается поступление взвешенных частиц, вдоль Керченского п-ова, в области между вдольбереговым течением и берегом (рис.1, *б*), и в Феодосийском заливе.

Наличие модельных оценок и спутниковой информации (<https://earthdata.nasa.gov/labs/worldview/?p=geographic&l=MODIS>) позволяет осуществить тестирование метода сопряженных уравнений для данной акватории с используемым пространственным шагом дискретизации модели. Если поставить вопрос о происхождении загрязнения в Феодосийском заливе, то ответ (судя по спутниковой информации) в данном случае очевиден. Это взмучивание илистых отложений на дне Азовского моря и Керченского пролива и вынос загрязненных вод из Керченского пролива в Черное море. Такая картина наблюдается достаточно часто при аналогичном ветровом воздействии.

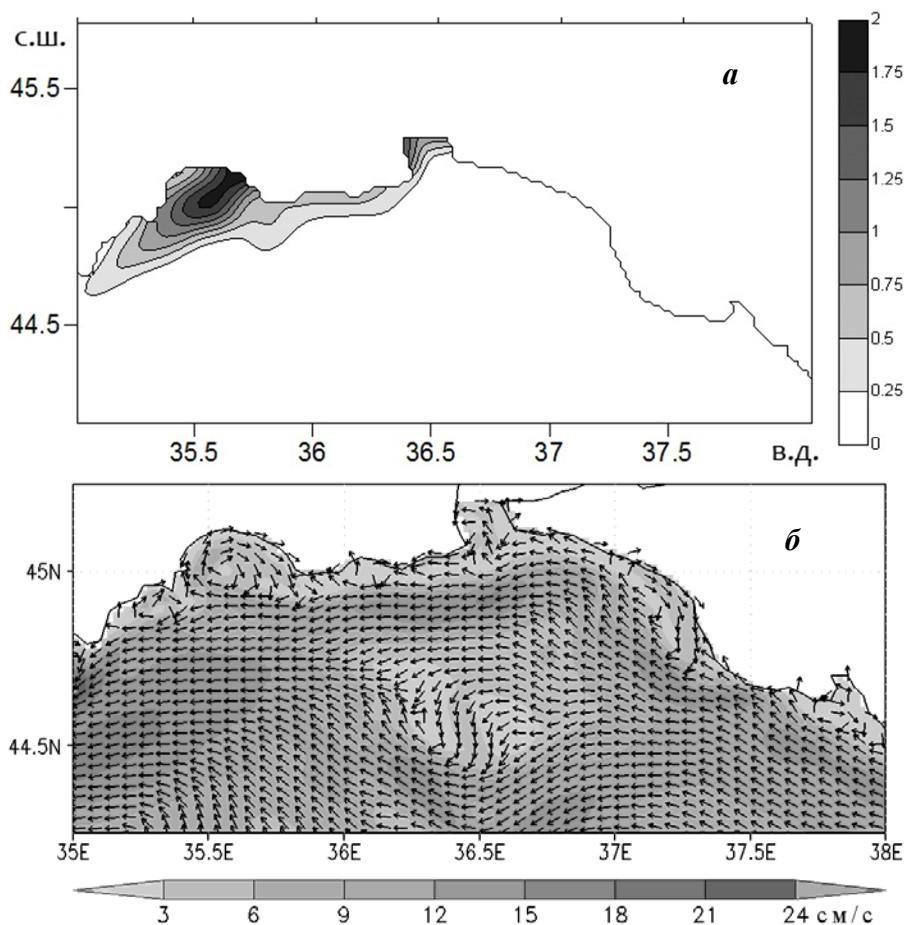


Рис. 1. Модельные поля концентрации (а) и скорости течений (б) на 18 октября 2016 г.

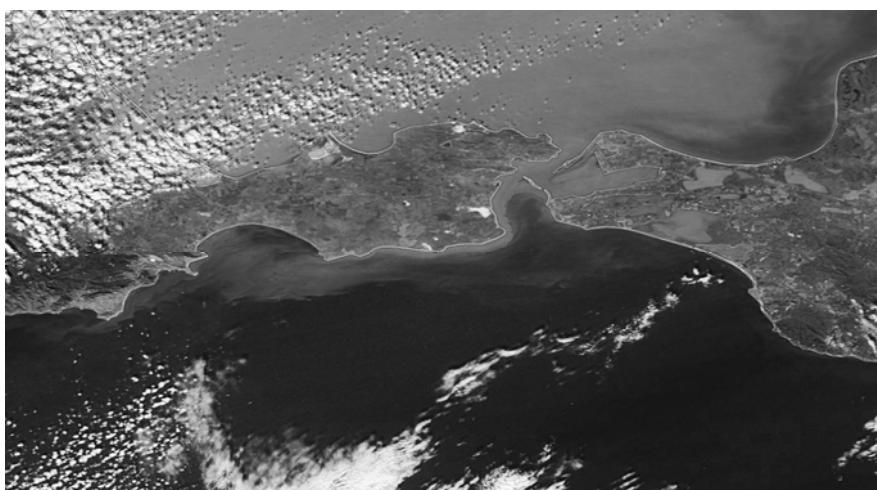
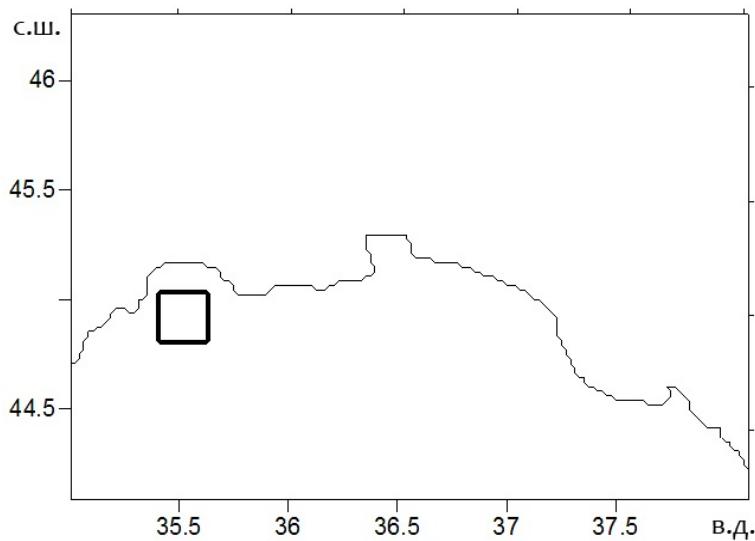


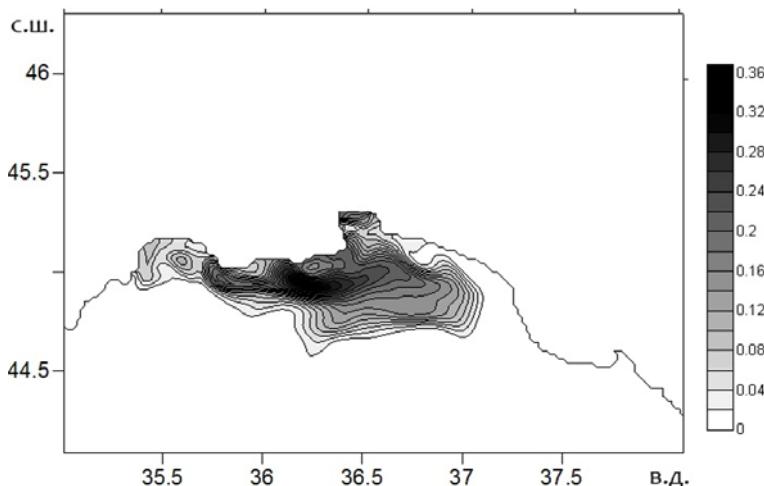
Рис. 2. Взвешенное вещество в поверхностном слое моря на 18 октября 2016 г. (по спутниковым данным сканера MODIS).



Р и с . 3 . Область Ω в Феодосийском заливе.

С другой стороны загрязнения могут быть различного характера и ответ на вопрос об источнике их происхождения не столь очевиден. В данном случае наличие модельных оценок и спутниковой информации позволяет сравнить ее с решением сопряженной задачи. Для построения функции влияния начального поля на концентрацию в Феодосийском заливе необходимо решить задачу (4) – (5) с начальным полем C_T^* , заданным в области Ω , изображенной на рис.3.

Решение сопряженной задачи на срок 6 суток представлено на рис.4, из которого видно, что основное влияние на концентрацию примеси в Феодосийском заливе, в данном случае, оказывает прибрежная зона Керченского п-ова и сам Керченский пролив, где собственно и формировалось начальное



Р и с . 4 . Функция влияния начального поля концентрации.

распределение концентрации. Таким образом, решая сопряженную задачу, мы можем указать область, где первоначально произошло загрязнение. Для решения такой задачи используются поля течений, рассчитанные по гидротермодинамической модели МГИ с горизонтальным разрешением 1,6 км по обеим координатам.

Для определения интервала времени, на котором решается задача, нужно учитывать дополнительные данные о типе загрязнений, о возможных источниках и/или стоках вещества (например, осаждение, окисление, распад и др.), коэффициенты вертикальной и горизонтальной диффузии исследуемой примеси.

При наличии необходимой информации для проведения расчетов по гидротермодинамической модели, модели переноса и сопряженной задачи есть возможность идентифицировать местоположение источников загрязнений, анализировать их влияние на концентрацию примеси в выбранном районе. Результаты численного эксперимента показали надежную работу метода сопряженных уравнений при решении поставленной задачи. Построенные функции влияния указывают на то, какие районы Черного моря на выбранном интервале времени при заданных скоростях течений и коэффициентах турбулентной диффузии ответственны за формирование суммарной концентрации в Феодосийском заливе. Таким образом, на основе решения сопряженных задач возможна оперативная оценка контролируемых величин концентрации примеси в интересующем районе. Такая информация может быть полезной при принятии решений с целью оптимизации антропогенной нагрузки на экосистему Азово-Черноморского бассейна.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме 0827-2018-0004 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей» (шифр «Прибрежные исследования») и частично поддержана грантом РФФИ 18-45-920035.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Марчук Г.И.* Математическое моделирование в проблеме окружающей среды.– М.: Наука, 1982.– 320 с.
2. *Демышев С.Г., Дымова О.А.* Численный анализ мезомасштабных особенностей циркуляции в прибрежной зоне Черного моря // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.– 2013.– т.49, № 6.– С.655-663.
3. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.IV. Черное море. Вып.1. Гидрометеорологические условия.*– СПб.: Гидрометеоиздат, 1991.– 428 с.
4. *Демышев С.Г., Запевалов А.С., Кубряков А.И., Чудиновских Т.В.* Эволюция поля концентрации ^{137}Cs в Черном море после прохождения чернобыльского облака // Метеорология и гидрология.– 2001.– № 10.– С.49- 61.
5. *Рябцев Ю.Н., Шапиро Н.Б.* Определение начального положения обнаруженных в открытой части моря поверхностных линз пониженной солености примеси // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009.– вып.18.– С.141-157.

6. Кочергин В.С. Построение функций влияния для различных районов Черного моря // Системы контроля окружающей среды.– Севастополь, 2008.– С.275-277.
7. Демышев С.Г., Кочергин С.В., Кочергин В.С. Построение функций влияния в модели переноса пассивной примеси // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009.– вып.19.– С.228-233.
8. Кочергин В.С. Определение поля концентрации пассивной примеси по начальным данным на основе решения сопряженных задач // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011.– вып.25, т.2.– С.270-276.
9. Кочергин В.С., Кочергин С.В Анализ функций влияния начального поля концентрации примеси на уровень загрязнения в Таганрогском заливе // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества.– 2018.– № 2, т.15.– С.63-69.

Материал поступил в редакцию 06.08 2018 г.
После доработки 31.08 2018 г.

S.G.Demyshev, O.A.Dymova, V.S.Kochergin, S.V.Kochergin

IDENTIFICATION OF POSSIBLE CONTAMINATION IN THE BLACK SEA ON THE BASIS OF ADJOINT EQUATIONS, FOR EXAMPLE, 2016

To obtain model estimates of the concentration field, a model of passive admixture transport in the Black Sea with a high degree of discretization is used. Input parameters of the model transfer of passive admixture are results of model calculations of MHI considering the real atmospheric forcing for the year 2016 according to the SKIRON, and reanalysis with a horizontal resolution of less than 2 km. To identify the location of the source of contamination, we used the method of adjoint equations. As an example, the transport of suspended matter from the Kerch Strait to the Black Sea is considered. The model estimates are compared with the satellite information on the concentration of the suspended substance. It is shown that a possible source of pollution was located in the region of the Kerch Strait and the Black Sea coast of the Kerch Peninsula, where the initial distribution of concentration was determined by integrating the passive impurity transport model.

KEYWORDS: source identification, field of concentration, admixture, adjoint model, influence function, the Black Sea