

Ф И З И К А

УДК 51.37

doi: 10.31429/vestnik-15-3-72-77

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ВОЗМОЖНОГО ИСТОЧНИКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ В АКВАТОРИИ ГЕРАКЛЕЙСКОГО ПОЛУОСТРОВА НА ОСНОВЕ МЕТОДА СОПРЯЖЕННЫХ УРАВНЕНИЙ

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

IDENTIFYING THE LOCATION OF A POSSIBLE SOURCE POLLUTION
IN THE WATERS OF THE HERACLEA PENINSULA BASED ON THE METHOD
OF ADJOINT EQUATIONS

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

Marine Hydrophysical Institute, Sevastopol, 299011, Russia
e-mail: vskocher@gmail.com

Abstract. Model estimates of the concentration field are obtained on the basis of a model of passive impurity transport in the Black sea with a high degree of discretization. The results of calculations based on the MGI model taking into account the real atmospheric forcing for 2016 according to the SKIRON reanalysis are the input parameters of the passive admixture transfer model. The method of conjugate equations is used to identify the location of the source of pollution. As an example, the transport of suspended matter in the area of Cape Chersonesos is considered. As a result of the integration of the conjugate problem, it is shown that a possible source of pollution was located in the area adjacent to the Blue Bay area, where the initial concentration distribution was set when integrating the basic model of passive impurity transport. As a result of numerical experiments, it is shown that the concentration in the study area to some extent may have other sources of pollution.

Keywords: source identification, field of concentration, transport model, adjoint task, functions of influence, Black Sea.

Введение

Развитие инфраструктуры Азово-Черноморского региона приводит к увеличению экологической нагрузки на Акваторию Черного и Азовского морей. Поэтому построение вычислительных систем, позволяющих производить оценку экологической обстановки является важной и актуальной задачей. Важными элементами такой системы являются численные модели динамики вод в исследуемом бассейне, и модели переноса загрязняющих веществ. Актуальной проблемой также является идентификация местоположения источников загрязнения, их мощности. Для решения таких задач используется метод сопряжен-

ных уравнений [1]. Решение сопряженной задачи позволяет построить функции влияния входных параметров на концентрацию примеси и оценить местоположение возможных источников загрязнения в исследуемом районе. Функции влияния указывают на те области, которые оказывают наибольшее влияние на концентрацию примеси в заданном районе. В данной работе в качестве динамической модели была использована модель МГИ [2] с разрешением по пространству 1,6 км.

1. Модель переноса пассивной примеси

Уравнение модели переноса пассивной примеси в декартовых координатах имеет

Дымова Ольга Алексеевна, старший научный сотрудник отдела теории волн Морского гидрофизического института РАН; e-mail: olgdymova@rambler.ru.

Кочергин Владимир Сергеевич, младший научный сотрудник отдела теории волн Морского гидрофизического института РАН; e-mail: vskocher@gmail.com.

Кочергин Сергей Владимирович, старший научный сотрудник отдела морских информационных систем и технологий Морского гидрофизического института РАН; e-mail: ko4er@mail.ru.

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 р_а.

вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(UC)}{\partial x} + \frac{\partial(VC)}{\partial y} + \frac{\partial(WC)}{\partial z} = \\ = A_H \nabla^2 C + \frac{\partial}{\partial z} A_V \frac{\partial C}{\partial z}, \end{aligned} \quad (1.1)$$

где C — концентрация примеси; U, V, W — компоненты скорости течения; A_H, A_V — коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии, соответственно. Пусть M — область интегрирования модели на интервале времени $[0, T]$, Γ — граница области M ; $M_t = M \times [0, T]$, \mathbf{n} — нормаль к границе.

Граничное условие на свободной поверхности ($z = 0$) задается отсутствие потока

$$A_V \frac{\partial C}{\partial z} = 0. \quad (1.2)$$

На твердых границах и дне также ставятся условия отсутствия потока вещества. В начальный момент времени задано поле концентрации $C^0(x, y, z)$.

Конечно-разностные дискретизации дифференциальных уравнений построены на сетке C . Для аппроксимации адвективных слагаемых используется TVD-схема, горизонтальный диффузионный перенос параметризован 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 $\text{см}^2/\text{с}$ [3].

Модель проинтегрирована на сетке с пространственным разрешением 1,6 км, по вертикали задано 27 z -горизонтов, шаг по времени равен 1,5 мин. Скорости течений найдены по модели циркуляции Черного МГИ с учетом реального ветрового воздействия за 2016 г. по данным реанализа SKIRON. Подробное описание модели представлено в [2].

2. Сопряженная задача

Уравнению (1.1) с краевыми условиями (1.2) и начальными данными, поставим в соответствие сопряженную [1] задачу

$$\begin{aligned} -\frac{\partial C^*}{\partial t} - \frac{\partial(UC^*)}{\partial x} - \frac{\partial(VC^*)}{\partial y} - \frac{\partial(WC^*)}{\partial z} = \\ = A_H \nabla^2 C^* + \frac{\partial}{\partial z} A_V \frac{\partial C^*}{\partial z}, \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} z = 0 : A_V \frac{\partial C^*}{\partial z} = 0, \\ z = H : A_V \frac{\partial C^*}{\partial z} = 0, \\ \Gamma : A_H \frac{\partial C^*}{\partial n} = 0, \\ C_T^* = h. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Умножая (1.1)–(1.2) на C^* и интегрируя по частям с учетом (2.1)–(2.2), получим

$$\int_M h C \, dM = \int_M C_0 C^* \, dM. \quad (2.3)$$

Выбираем h в виде

$$h = \begin{cases} \frac{1}{m(\Omega)} & \text{в области } \Omega; \\ 0 & \text{вне области } \Omega, \end{cases} \quad (2.4)$$

где m — мера выбранной области $\Omega \in M$. Тогда в левой части выражения (2.3) получаем среднюю концентрацию \bar{C}_T в Ω на конечный момент времени T . Задавая $h = 1$ в области Ω , в левой части соотношения (2.3) получаем суммарную концентрацию на конечный момент времени. Аналогичный подход успешно применялся для решения различных задач в Черном и Азовском морях [4–8]. Расчеты по модели переноса пассивной примеси выполнены на сетке с пространственным разрешением 1,6 км. Такая же дискретизация по пространству использована при решении сопряженной задачи (2.1)–(2.2), решение которой является функцией влияния начальных данных на концентрацию примеси в исследуемом районе.

3. Результаты численных экспериментов

Для периода с 12.10.2016 до 18.10.2018 был произведен расчет полей скоростей по динамической модели МГИ с учетом реального ветрового воздействия для данного периода времени. Начальное поле концентрации задано в районе Голубой бухты сформировавшимся пятном загрязнения. В указанной области (рис. 1) задавалась единичная условная концентрация от поверхности до дна. Результат численного моделирования распространения примеси на указанный срок представлен на рис. 2. Из рис. 2 видно, что при сложившейся циркуляции загрязнения от источника за данный период времени могут распространяться на обширную территорию. Используемые

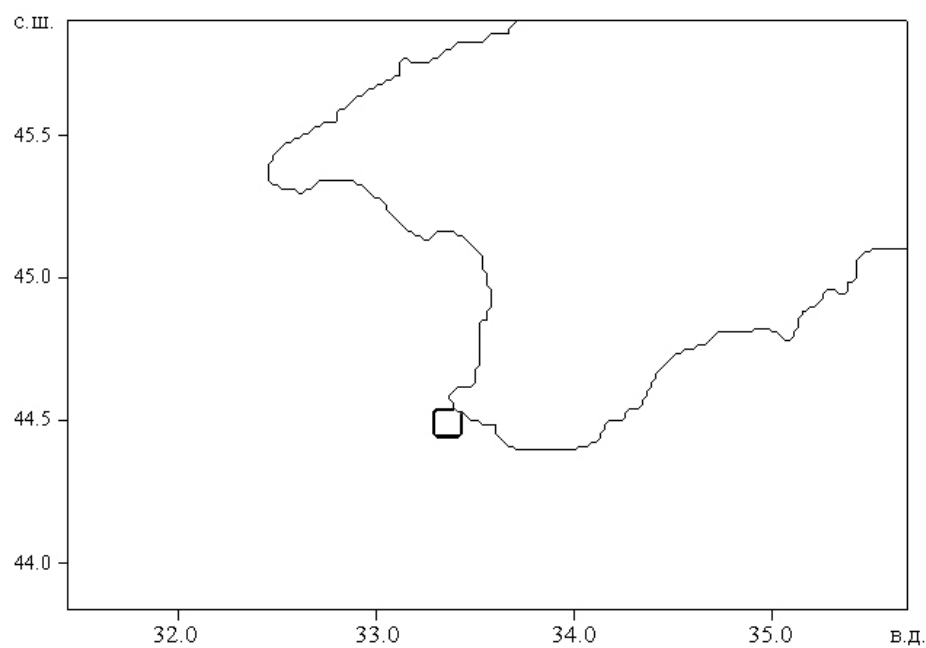


Рис. 1. Область задания начального поля концентрации

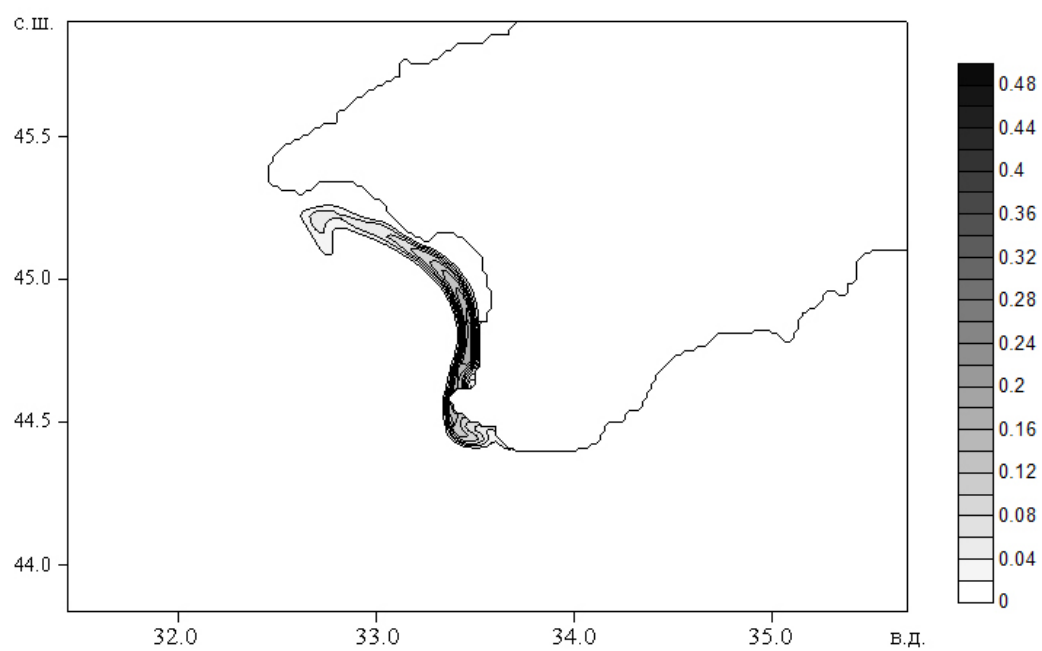


Рис. 2. Модельное поле концентрации

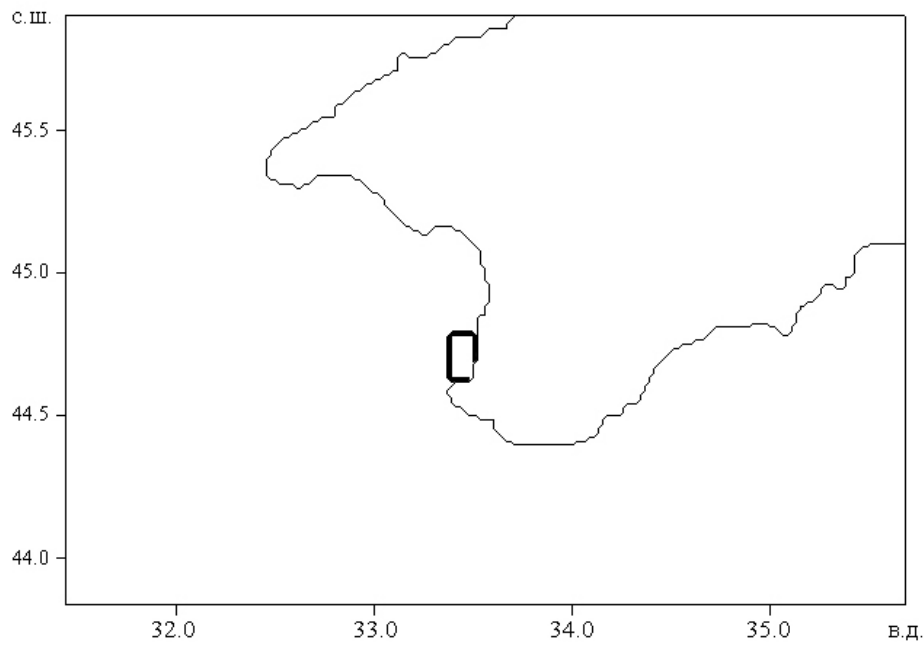


Рис. 3. Область Ω — в акватории Севастополя

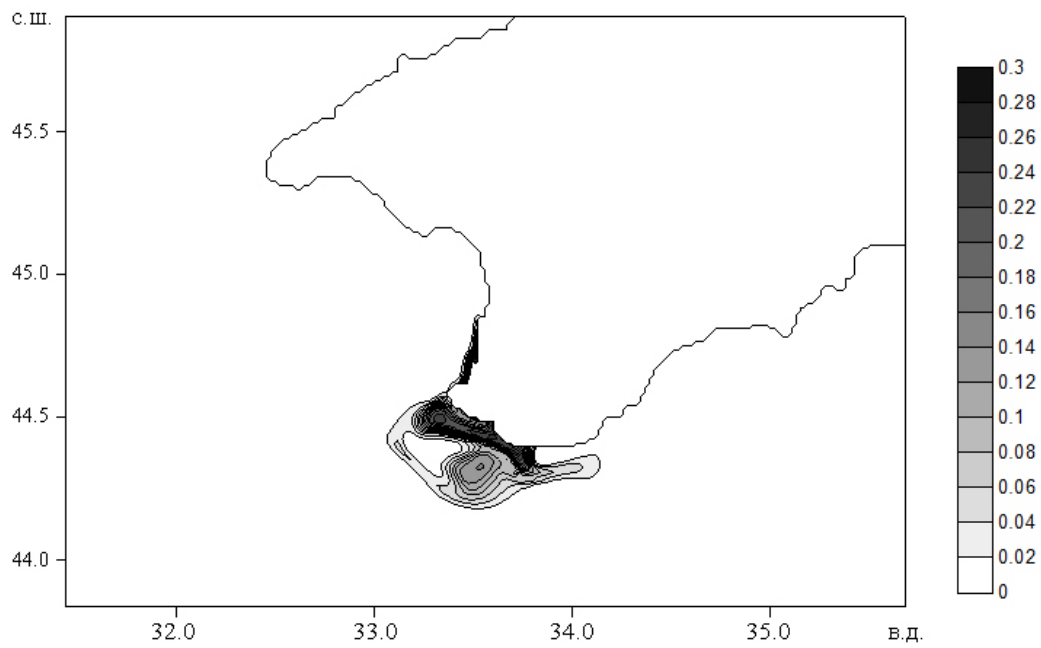


Рис. 4. Функция влияния начальных данных

поля течений сформировались в том числе под действием достаточно сильного ветра 10–15 м/с южного и юго-западного направления (<http://dvs.net.ru/mp/data/201610vw.shtml>). В последующий период времени ветровое воздействие характеризуется более умеренными значениями северного и северо-восточного направления. Рассматривая область, указанную на рис. 3, в качестве области Ω , решая сопряженную задачу на указанный срок, получаем решение, изображенное на рис. 4. Из рис. 4 видно, что на концентрацию примеси в интересующей области Ω , на используемом интервале времени могут влиять как сама прибрежная зона Севастополя, так и области, примыкающие к южному берегу Гераклейского полуострова, в том числе и акватория Балаклавы. В эту зону естественно попадает область, где был задан первоначальный источник загрязнения в виде сформировавшегося пятна в районе Голубой бухты. Таким образом, при определенных метеорологических и гидрологических условиях, складывающихся в районе г. Севастополя, возможны ситуации, когда загрязнения от очистных сооружений и сопутствующих источников могут за достаточно короткое время достигать основной городской береговой инфраструктуры. Для определения интервала времени, на котором решается задача, нужно учитывать дополнительные данные о характере загрязнений и другую априорную информацию.

При наличии необходимой информации для наполнения динамической модели, модели переноса и сопряженной задачи возможно определение местоположения источников загрязнения, и проведение анализа их влияние на концентрацию примеси в выбранном районе. Результаты численного моделирования показали надежную работу метода сопряженных уравнений при решении поставленной задачи. Построенная функция влияния указывает на то, какие районы на выбранном интервале времени при заданных скоростях течений и коэффициентах турбулентной диффузии оказывают существенное влияние на значения суммарной концентрации в выбранном районе. Задавая различные начальные данные можно оценивать некоторые интегральные величины, характеризующие экологическую обстановку в исследуемом районе, без решения уравнений основной модели. Таким образом, на основе интегрирования сопряженных задач возможна оперативная оценка контролируемых величин концентра-

ции примеси в интересующей области моря. Такая информация может быть полезной при принятии решений с целью оптимизации антропогенной нагрузки на экосистему Азово-Черноморского бассейна.

Литература

1. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М. Наука. 1982. 320 с.
2. Демьшев 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. Демьшев С.Г., Запелов 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.
4. 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.
5. Кочергин В.С. Построение функций влияния для различных районов Черного моря // В Сб.: “Системы контроля окружающей среды”. МГИ НАНУ. Севастополь. 2008. С. 275–277.
6. Демьшев 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”, МГИ НАНУ, Севастополь 2009. Вып. 19. С. 228–233.
7. 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”, МГИ НАНУ, Севастополь 2011., Вып. 25. Том 2. С. 270–376.
8. 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.

References

1. Marchuk, G.I. *Mathematical modeling in the environmental problem*. Moscow, Nauka, 1982.
2. Demyshev, S.G., Dymova, O.A. Numerical analysis of the mesoscale features of the circulation in the coastal zone of the Black sea. *Izvestiya*,

- Atmospheric and Oceanic Physics*, 2013, vol. 49, no. 6, pp. 655–663.
3. Demyshev, S.G., Zapevalov, A.S., Kubryakov, A.I., Chudinovskih, T.V. Evolution field the concentrations of ^{137}Cs in the Black sea after the passage of the Chernobyl cloud. *Meteorologiya i Gidrologiya*, 2001, no. 10, pp. 49–61.
 4. Ryabcev, Yu.N., Shapiro, N.B. Determination of the initial position of the surface lenses of low salinity of the impurity detected in the open part of the sea. In: *Environmental safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources*. Sevastopol', EHKOSI-gidrofizika, 2009, iss. 18, pp. 141–157.
 5. Kochergin, V.S. Construction of influence functions for different areas of the Black sea. In: *Environmental monitoring systems'*. MGI NANU, Sevastopol', 2008, pp. 275–277.
 6. Demyshev, S.G., Kochergin, S.V., Kochergin, V.S. Construction of influence functions in the passive impurity transfer model. In: *Environmental safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources*, MGI NANU, Sevastopol' 2009, iss. 19, pp. 228–233.
 7. Kochergin, V.S. Determination of the passive impurity concentration field from initial data based on the solution of coupled problems. In: *Environmental safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources*, MGI NANU, Sevastopol' 2011, iss. 25, vol. 2, pp. 270–376.
 8. Kochergin, V.S., Kochergin, S.V. Analysis of the influence of the initial field of impurity concentration on the level of pollution in the Taganrog Bay. *Ecological Bulletin of the scientific centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2018, vol. 15, no. 2, pp. 63–69.

© Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества, 2018

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

Статья поступила 16 августа 2018 г.