

В.С.Кочергин, С.В.Кочергин

*Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь***ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ВОЗМОЖНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ОТ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА
В КЕРЧЕНСКОМ ПРОЛИВЕ**

Работа посвящена распространению пассивной примеси от точечного источника, расположенного у западного побережья Керченского пролива. На основе трехмерной динамической модели с постоянной плотностью проведены расчеты на установление модельного поля течений под воздействием интенсивного постоянно-го ветра различной направленности. При помощи численной модели переноса пассивной примеси, построены и проанализированы поля возможных загрязнений при различном ветровом воздействии. Получено, что основными зонами загрязнения при этом сроке интегрирования модели являются области Керченского порта и порта Крым. При южных и юго-западных ветрах возможен выход загрязняющих веществ в Азовское море, что увеличит нагрузку на экологическую обстановку в море. При юго-восточном и северо-западном ветровом воздействии загрязняющие вещества концентрируются в области самого Керченского пролива. Ветра северного, восточного и северо-восточного направления приводят к распространению загрязняющих веществ в акваторию Черного моря. При этом преобладающий характер северо-восточных ветров приводит к повышенной вентиляции Керченского пролива.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *численное моделирование, модель переноса, пассивная примесь, поле концентрации, источник загрязнения, Керченский пролив*

doi: 10.22449/2413-5577-2019-2-13-18

Введение. При решении задач, связанных с оценкой экологического состояния водных бассейнов, необходим анализ возможных последствий распространения примесей различной природы. Такой анализ может быть осуществлен на основе использования математического моделирования. При этом чаще всего решаются две взаимосвязанные проблемы. Первая решается на основе построения модели переноса примеси и ее численной реализации, учитывающей природу её поведения в водной среде. Вторая проблема связана с идентификацией входных параметров модели и усвоения данных измерений [1 – 4]. В последние годы интерес к численному моделированию динамических процессов в Азово-Черноморском бассейне вырос [4 – 8] в связи с необходимостью создания систем контроля состояния окружающей среды в условиях возрастающей антропогенной нагрузки. Данная работа посвящена моделированию распространения пассивной примеси от точечного источника, расположенного у западного побережья Керченского пролива в непосредственной близости от могильника железистых отходов. Химический состав захоронений на данном полигоне достаточно широк [9], поэтому изучение возможных последствий попадания загрязнений в акваторию Керченского пролива важно и актуально. Численные эксперименты проводились с помощью трехмерной гидродинамической модели [10, 11] с

© В.С.Кочергин, С.В.Кочергин, 2019

Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. вып.2. С.13-18.

постоянной плотностью (без учета термохалинной структуры) для акватории Керченского пролива. Идеология построения кода модели заложена в работе [12]. Подробное описание численной реализации используемой модели представлено в [11]. На ее основе проведены расчеты на установление модельного поля течений под воздействием интенсивного постоянного ветра различной направленности. Полученные пространственные распределения полей скоростей и коэффициентов турбулентной диффузии использовались в качестве входной информации при интегрировании модели переноса пассивной примеси. При помощи численной модели переноса пассивной примеси, построены и проанализированы поля возможных загрязнений при различном ветровом воздействии.

Модель переноса. В качестве модели переноса пассивной примеси в Керченском проливе рассмотрим следующее уравнение в σ -координатах

$$\frac{\partial DC}{\partial t} + \frac{\partial DUC}{\partial x} + \frac{\partial DVC}{\partial y} + \frac{\partial WC}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial x} A_H \frac{\partial DC}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} A_H \frac{\partial DC}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial \sigma} \frac{K_H}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \quad (1)$$

с краевыми условиями

$$\begin{aligned} \Gamma: \quad \frac{\partial C}{\partial n} &= 0, \\ \sigma = 0: \quad \frac{\partial C}{\partial \sigma} &= \bar{Q}_S \cdot \delta(x - x_0, y - y_0), \\ \sigma = -1: \quad \frac{\partial C}{\partial n} &= \bar{Q}_B \cdot \delta(x - x_0, y - y_0) \end{aligned} \quad (2)$$

и начальными данными

$$C(x, y, \sigma, 0) = C_0(x, y, \sigma), \quad (3)$$

где C – концентрация примеси; U, V, W – компоненты поля скорости; A_H и K_H – коэффициенты турбулентной диффузии в горизонтальном и вертикальном направлениях; $D(x, y) = h + \eta$; h – невозмущенная глубина моря; η – отклонение уровня от невозмущенной поверхности моря; x, y – декартовы координаты; n – нормаль к границе Γ области интегрирования M ; $M_t = M \times [0, T]$; T – конечный момент времени; σ – вертикальная координата ($\sigma = 0$ на поверхности, $\sigma = -1$ на дне); \bar{Q}_S, \bar{Q}_B – постоянные мощности точечных источников.

При решении задачи переноса пассивной примеси используется модель, подробно описанная в [11], которая основана на применении TVD аппроксимаций [13, 14].

Результаты численных экспериментов. Численные эксперименты проводились с моделью [10, 11] для акватории Керченского пролива. Для реализации модели переноса для данной акватории были проведены расчеты на установление модельных полей течений с постоянным ветром 10 м/с различной направленности. На северной границе области интегрирования краевые условия задавались из расчетов по модели Азовского моря, а на южной границе по широтному разрезу м.Меганом – м.Утриш – условие свободного прохождения для меридиональной скорости течений [7]. Полученные поля скоростей и коэффициентов турбулентной диффузии использовались в качестве входных параметров при интегрировании модели пере-

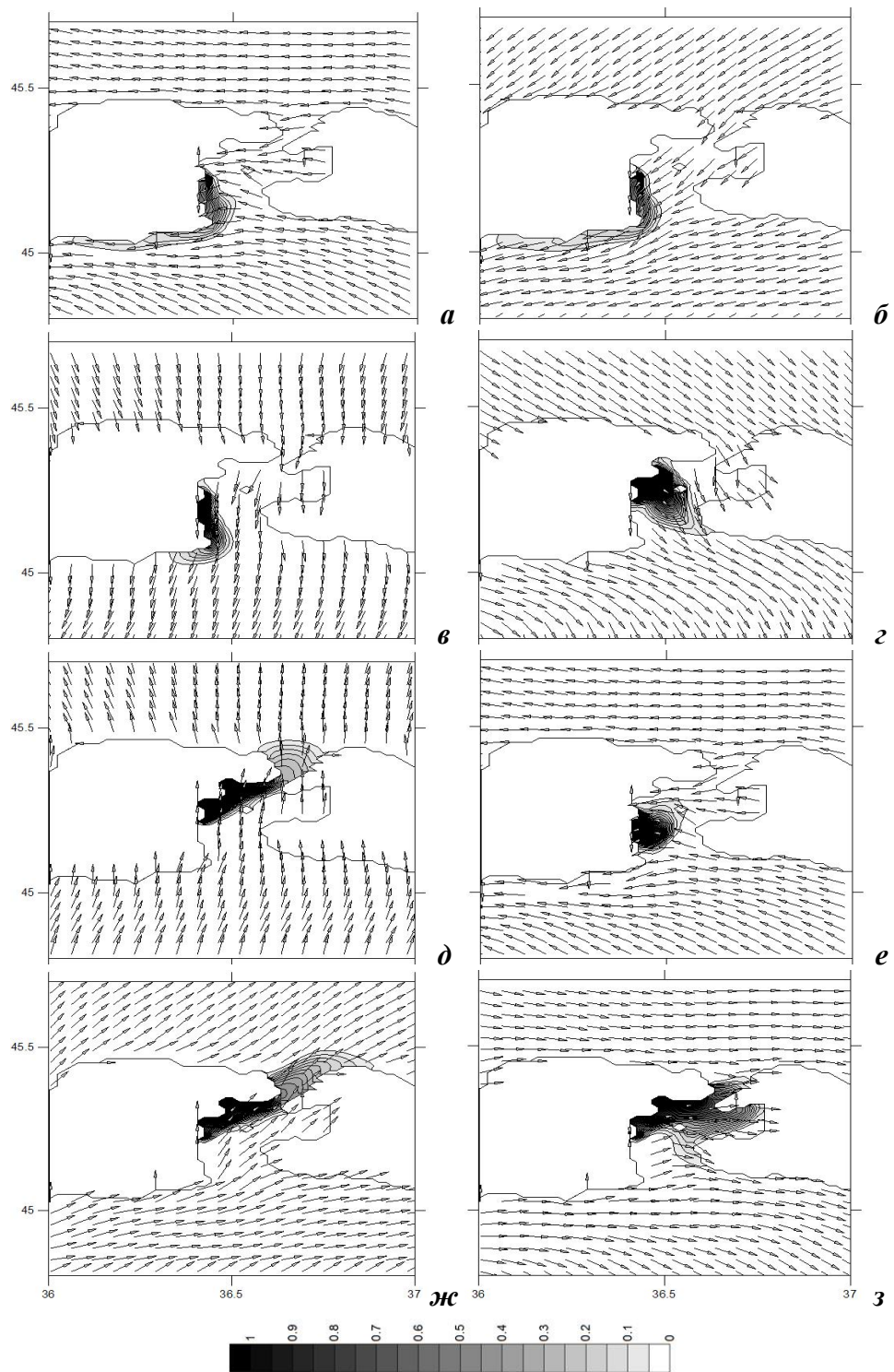
носа пассивной примеси на срок 5 суток. При этом шаг по времени $\Delta t = 240$ с, шаг по пространству $\Delta x = 0,78$ км, $\Delta y = 1,125$ км. По вертикали в модели используется расчетная сетка в σ -координатах с 15-ю равномерно распределенными горизонтами.

Источник загрязнения единичной мощности задавался на поверхности вблизи западного побережья Керченского пролива. При восточном ветровом воздействии загрязняющие вещества от источника распространяются вдоль берега в направлении выхода в Черное море и далее в направлении Феодосийского залива (рис.1, а).

Здесь изображены нормированные значения концентрации в приповерхностном слое и поверхностные поля течений. При таком ветровом воздействии максимальная скорость имеет значение порядка 48 см/с в районе юго-западной оконечности Керченского пролива, 27,3 см/с – в районе паромной переправы. Получаемая картина течений обусловлена небольшими глубинами в проливе (максимум глубин в фарватере 15 – 18 м). Отметим, что при рассчитанных значениях коэффициентов турбулентной вязкости глубина Керченского пролива оказывается меньше одной десятой глубины слоя Экмана, поэтому [15] поверхностные течения имеют вид, представленный на рисунке. Существенное влияние на структуру течений оказывает учет сгонно-нагонных явлений, реализованный в динамической модели [11]. Скорость течения в самом узком месте Керченского пролива возрастает до 61,6 см/с при северо-восточном ветровом воздействии. Соответствующее поле течений и поле концентрации примеси изображены на рис.1, б. Следует заметить, что такие ветра для данного района Азово-Черноморского бассейна являются преобладающими.

При северном ветровом воздействии ареал распространения примеси вдоль южного берега Керченского п-ова уменьшается, но увеличивается концентрация у западного берега пролива. Это происходит за счет влияния получаемой структуры течений. Модельное поле концентрации при северном ветре для поверхностного слоя представлено на рис.1, в. Максимальная скорость течения в районе переправы возрастает до 67,6 см/с. Северо-западные ветра приводят к повышенной концентрации в обширной области Керченского пролива, вдоль западного берега Керченского пролива, в акватории Керченского порта. Модельное поле концентрации при таком ветре представлено на рис.1, г. При этом существенная концентрация наблюдается вплоть до Таманского п-ова. Максимальная скорость течения в узком месте пролива уменьшается при этом до 46,9 см/с.

Южное ветровое воздействие приводит к существенному повышению концентрации загрязняющих веществ в акватории порта Керчь, портов Крым и Кавказ. Далее при указанном ветре возможен выход примеси в Азовское море. Максимальные скорости в области выхода из Керченского пролива в Азовское море порядка 70 см/с. Результат моделирования для южного ветра изображен на рис.1, д. Юго-восточные ветра приводят к существенному повышению концентрации загрязняющих веществ в районе источника загрязнения (рис.1, е). При таком ветровом воздействии происходит плохое проветривание акватории Керченского пролива. Максимальные скорости течений уменьшаются до 27,3 см/с.



Р и с . 1 . Нормированное поле концентрации в приповерхностном слое и поверхностные течения при восточном (*a*), северо-восточном (*б*), северном (*в*), северо-западном (*з*), южном (*д*), юго-восточном (*е*), юго-западном (*ж*), западном (*з*) ветрах.

Результат юго-западного ветрового воздействия изображен на рис.1, ж. Видно, что юго-западные ветра приводят к формированию такой циркуляции, при которой загрязняющие вещества концентрируются у западного берега пролива в районе Керченского порта и порта Крым. В дальнейшем загрязняющие вещества могут распространяться в Азовское море. Максимальные скорости при этом имеют значения 59 см/с.

Западные ветра приводят к загрязнению практически всей акватории Керченского пролива, включая акватории портов Керчь, Крым и Кавказ. Результат моделирования при западном ветровом воздействии представлен на рис.1, з. При западном ветре осредненные по глубине скорости в Керченском проливе имеют максимальные значения 25 см/с. Отметим, что результат моделирования существенным образом зависит от интервала времени, на котором интегрируется модель переноса пассивной примеси.

Заключение. На основе численного моделирования полей течений при помощи гидродинамической модели циркуляции вод в акватории Керченского пролива и модели переноса пассивной примеси проведены расчеты по распространению возможных загрязнений от указанного источника при различном ветровом воздействии. Получено, что основными зонами загрязнения при этом сроке интегрирования модели являются области Керченского порта и порта Крым, т.е. западное побережье пролива, включая береговую линию г.Керчь. При южных и юго-западных ветрах возможен выход загрязняющих веществ в Азовское море, что увеличит нагрузку на экологическую обстановку в море. При юго-восточном и северо-западном ветровом воздействии загрязняющие вещества концентрируются в области самого Керченского пролива. Ветра северного, восточного и северо-восточного направления приводят к распространению загрязняющих веществ в акваторию Черного моря. При этом преобладающий характер северо-восточных ветров приводит к повышенной вентиляции Керченского пролива. Результаты могут быть использованы при анализе экологической обстановки в исследуемом районе и принятии решений.

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. *Пененко В.В.* Оценка параметров дискретных моделей динамики атмосферы и океана // Метеорология и гидрология.– 1979.– № 7.– С.77-90.
2. *Марчук Г.И.* Математическое моделирование в проблеме окружающей среды.– М.: Наука, 1982.– 320 с.
3. *Кочергин В.С., Кочергин С.В.* Идентификация мощности источника загрязнения в Казантипском заливе на основе применения вариационного алгоритма. // Морской гидрофизический журнал.– 2015.– № 2.– С.79-88.
4. *Залесный В.Б., Гусев А.В., Мошонкин С.Н.* Численная модель гидродинамики Черного и Азовского морей с вариационной инициализацией температуры и солености // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.– 2013.– т.49, № 6.– С.699-716.

5. *Дианский Н.А., Фомин В.В.* Моделирование циркуляции Азовского моря и особенности воспроизведения экстремальных нагонов в Таганрогском заливе // Труды ГОИН.– 2017.– т.218.– С.74-104.
6. *Zalesny V.B., Diansky N.A., Fomin V.V., Demyshev S.G.* Numerical model of the circulation of the Black Sea and Sea Azov // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling.– 2012.– v.27, iss.1.– P.95-112.
7. *Фомин В.В., Полозок А.А., Фомина И.Н.* Моделирование циркуляции Азовского моря с учетом речного стока // Морской гидрофизический журнал.– 2015.– № 1.– С.16-28.
8. *Фомин В.В., Дианский Н.А.* Расчет экстремальных нагонов в Таганрогском заливе с использованием моделей циркуляции атмосферы и океана // Метеорология и гидрология.– 2018.– № 12.– С.69-80.
9. *Макаров С.Н., Ланин В.И.* Экологическая опасность железистых продуктов в Нижне- и Верхне-Чурбашском хвостохранилище ЖПК // SCI-ARTICE. Экология.– 2017.– № 43. [Электронный ресурс].– URL: <http://sci-article.ru/stat.php?i=1488021864> (дата обращения 15.01.2019)
10. *Фомин В.В.* Численная модель циркуляции вод Азовского моря // Научные труды УкрНИГМИ.– 2002.– вып.249.– С.246-255.
11. *Иванов В.А., Фомин В.В.* Математическое моделирование динамических процессов в зоне моря-суша.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008.– 363 с.
12. *Blumberg A.F., Mellor G.L.* A description of the three-dimensional coastal ocean circulation model / Three-dimensional coastal ocean models / Ed. by Heaps N. // Amer. Geoph. Union.– 1987.– v.4.– P.1-16.
13. *Harten A.* High resolution schemes for hyperbolic conservation laws // I. Comput. Phys.– 1983.– v.49.– P.357-393.
14. *Pietrzak J.* The use of TVD limiters for forward-time upstream-biased advection schemes in ocean modeling // Mon. Wea. Rev.– 1998.– v.126.– P.812-830.
15. *Кочергин В.П.* Теория и методы расчета океанических течений.– М.: Наука, 1978.– 127 с.

Материал поступил в редакцию 14.01.2019 г.
После доработки 23.05.2019 г.

V.S.Kochergin, S.V.Kochergin

NUMERICAL SIMULATION OF PROPAGATION OF POSSIBLE CONTAMINATION FROM A POINT SOURCE IN THE KERCH STRAIT

The study is devoted to the spread of passive impurities from a point source located off the west coast of the Kerch Strait. On the basis of three-dimensional dynamic model with constant density, calculations are carried out to establish a model field of currents under the influence of intense constant wind of different directions. The obtained spatial distributions of velocity fields and turbulent diffusion coefficients were used as input information for the integration of the passive impurity transport model. It was found that the main pollution zones in this period of integration of the model are the areas of the Kerch port and the port of Crimea. In the southern and south-western winds possible release of pollutants into the Sea of Azov, which will increase the load on the environmental situation in the sea. In the south-east and north-west wind exposure pollutants are concentrated in the region of the Kerch Strait. Wind of north, east and north-east directions lead to the spread of pollutants in the Black Sea. At the same time, the predominant nature of the north-eastern winds leads to increased ventilation of the Kerch Strait.

KEYWORDS: numerical simulation, transport model, passive impurity, field of concentration, source of pollution, the Kerch Strait