

Ф И З И К А

УДК 51.37

doi: 10.31429/vestnik-15-2-63-69

**АНАЛИЗ ФУНКЦИЙ ВЛИЯНИЯ НАЧАЛЬНОГО ПОЛЯ
КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСИ НА УРОВЕНЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ
В ТАГАНРОГСКОМ ЗАЛИВЕ****Кочергин В. С., Кочергин С. В.****ANALYSIS OF THE INFLUENCE FUNCTIONS OF THE INITIAL CONCENTRATION
FIELD IMPURITIES AT THE LEVEL OF POLLUTION IN THE TAGANROG BAY**

V. S. Kochergin, S. V. Kochergin

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

Abstract. A numerical model of passive admixture transport in the Azov Sea is considered. The main task is to match the adjoint problem. Based on the method of adjoint equations, the functions of the initial data influence on the average admixture concentration in the Taganrog Bay are constructed. Calculations were made for three areas of intensive navigation in the Taganrog Bay. In the numerical construction of the influence function, velocity fields obtained from the hydrothermodynamic model with different wind stress were used. Flow fields and calculated coefficients of the model were input parameters for the adjoint problem. The spatial structure of solutions of adjoint equations under different wind effects is investigated. The adjoint equation was integrated for a period of 5 days. The corresponding functions of the initial data influence on the average concentration in the studied areas of the Taganrog Bay are constructed for this period of time. The influence of areas adjacent to the main ports and zones of intensive navigation on the formation of pollutant concentration fields in the considered areas of the Taganrog Bay is investigated.

Keywords: adjoint equations, transport model, admixture, influence functions, source of pollution, Azov Sea, Taganrog Bay.

Введение

Все возрастающая антропогенная нагрузка на Азовское море в целом и на Таганрогский залив в частности требует построения систем мониторинга и контроля качества морской среды. Любая такая система невозможна без создания и использования современных методов математического моделирования динамики водоемов и моделирования распространения тех или иных загрязняющих веществ. Кроме этого полезным оказывается применение современных подходов к оценке экологического состояния на основе применения метода сопряженных уравнений [1], который позволяет оценить среднюю или суммарную концентрацию в заданном районе по начальным данным и решению сопряженной задачи специального вида. Сопряженная задача

строится для каждого конкретного случая в зависимости от выбора функционала, подлежащего контролю [2–6]. Решение сопряженной задачи фактически является функцией влияния начальных данных на значение выбранных функционалов. Используя решения сопряженных задач, можно построить различные функции влияния. Это могут быть функции влияния начальных данных или других параметров модели на контролируемые интегральные величины в исследуемом районе. Слежение за уровнем концентрации загрязняющих веществ в Азовском море в целом и в Таганрогском заливе в частности, моделирование их распространения и трансформации является актуальной задачей в связи с возрастающей антропогенной нагрузкой на экологию региона. Настоящая работа посвящена разработке и применению методик, ос-

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: vskocher@gmail.com.

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»).

нованных на решении сопряженных задач, для акватории Таганрогского залива, позволяющих определять возможные источники загрязнений и оценивать некоторые функционалы, характеризующие уровень загрязнения в выбранном районе.

1. Модель переноса

В качестве модели переноса пассивной примеси рассмотрим следующее уравнение в σ -координатах

$$\begin{aligned} & \frac{\partial DC}{\partial t} + \frac{\partial DUC}{\partial x} + \frac{\partial DVC}{\partial y} + \frac{\partial WC}{\partial \sigma} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} A_H \frac{\partial DC}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} A_H \frac{\partial DC}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial \sigma} \frac{K_H}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \end{aligned} \quad (1.1)$$

с краевыми условиями

$$\begin{aligned} \Gamma : \frac{\partial C}{\partial n} &= 0, \\ \sigma = 0 : \frac{\partial C}{\partial \sigma} &= 0, \sigma = -1 : \frac{\partial C}{\partial \sigma} = 0 \end{aligned} \quad (1.2)$$

и начальными данными

$$C(x, y, \sigma, 0) = C_0(x, y, \sigma), \quad (1.3)$$

где C — концентрация примеси; U, V, W — компоненты поля скорости; A_H и K_H — коэффициенты турбулентной диффузии в горизонтальном и вертикальном направлениях; $D(x, y)$ — динамическая глубина; σ — вертикальная координата ($\sigma = 0$ на поверхности, $\sigma = -1$ на дне); M — область интегрирования модели; Γ — граница области M ; $M_t = M \times [0, T]$.

2. Сопряженная задача

Задаче (1.1)–(1.3) поставим в соответствие сопряженную задачу

$$\begin{aligned} & -\frac{\partial DC^*}{\partial t} - \frac{\partial DUC^*}{\partial x} - \frac{\partial DVC^*}{\partial y} - \frac{\partial WC^*}{\partial \sigma} = \\ & = D \frac{\partial}{\partial x} A_H \frac{\partial C^*}{\partial x} + D \frac{\partial}{\partial y} A_H \frac{\partial C^*}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial \sigma} \frac{K_H}{D} \frac{\partial C^*}{\partial \sigma}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Gamma : \frac{\partial C^*}{\partial n} &= 0; \\ \sigma = 0, \sigma = -1 : \frac{\partial C^*}{\partial \sigma} &= 0; \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$C^*(x, y, \sigma, T) = h(x, y, \sigma).$$

При выводе (2.1) учтено следующее соотношение

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial DU}{\partial x} + \frac{\partial DV}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial \sigma} = 0. \quad (2.2)$$

Умножая (1.1)–(1.3) на C^* и интегрируя по частям с учетом (2.1) и (2.2), получим

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

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.

3. Результаты численных экспериментов

Численные эксперименты проводились с использованием модели [7] для акватории Азовского моря [8, 9]. На основе баротропного варианта модели были получены поля течений и коэффициенты турбулентной диффузии при различном ветровом воздействии, которые использовались в качестве входной информации при интегрировании модели переноса пассивной примеси.

Расчеты проводились на срок 5 сут. при скоростях ветра 10 см/с. В результате интегрирования сопряженной задачи (2.1) были построены функции влияния начальных данных на суммарную концентрацию \bar{C} в областях $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ (рис. 1). Результаты расчетов показали, что при северном ветровом воздействии на область Ω_1 основное влияние оказывают области (рис. 2), примыкающие к портам Бердянск, Мариуполь и Ейск. Северо-восточный ветер формирует структуру течений, при которой основное влияние оказывают порты, расположенные на северном побережье Азовского моря. При восточном ветре существенное влияние на концентрацию примеси в Ω_1 на указанных сроках интегрирования модели оказывает северное побережье косы Долгой.

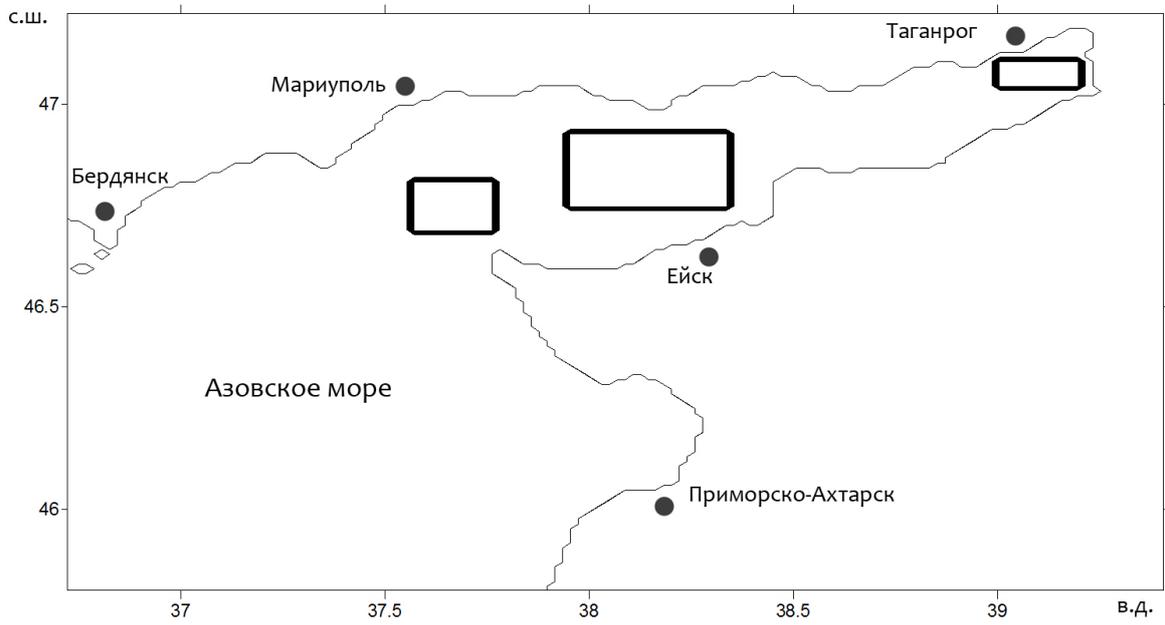


Рис. 1. Области Ω_1 — в западной части, Ω_2 — в центре и Ω_3 — в восточной части Таганрогского залива

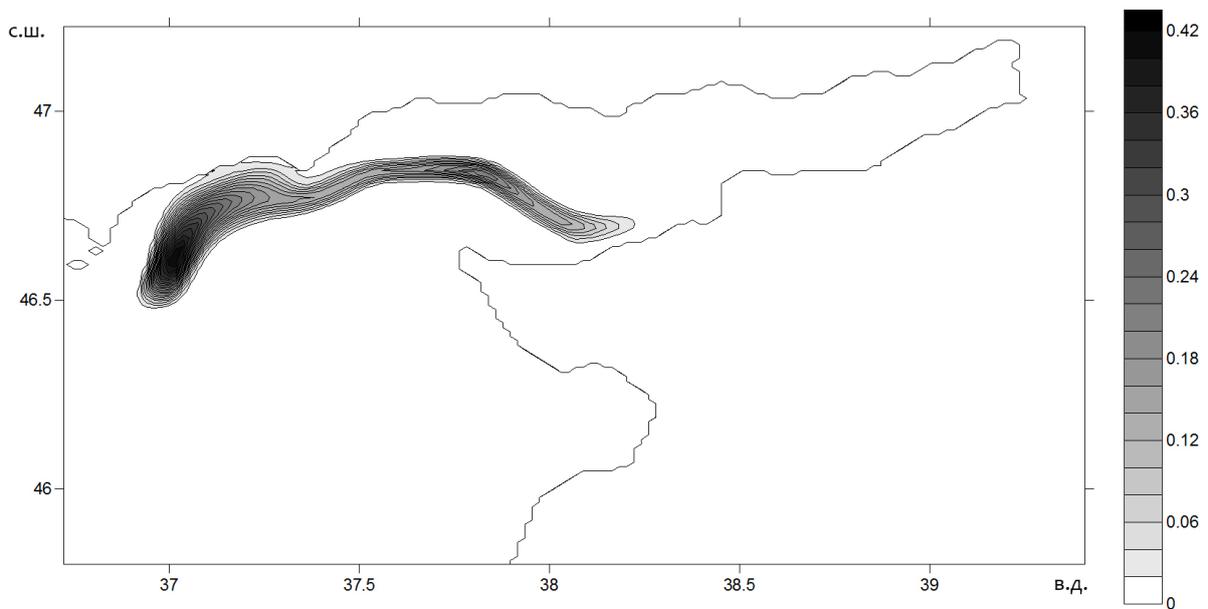
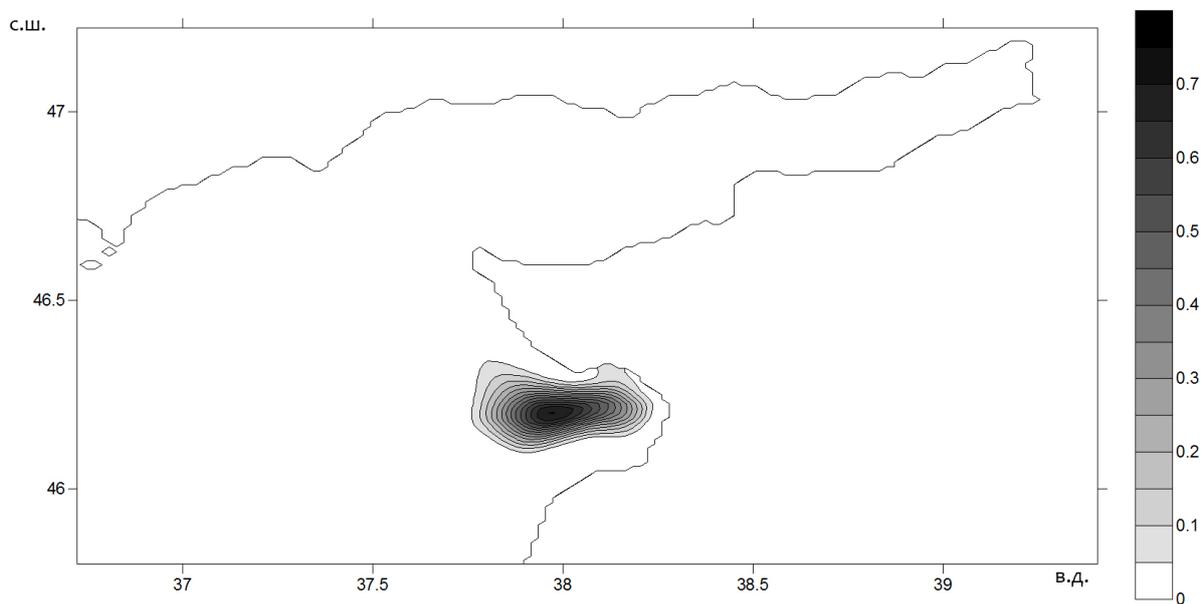
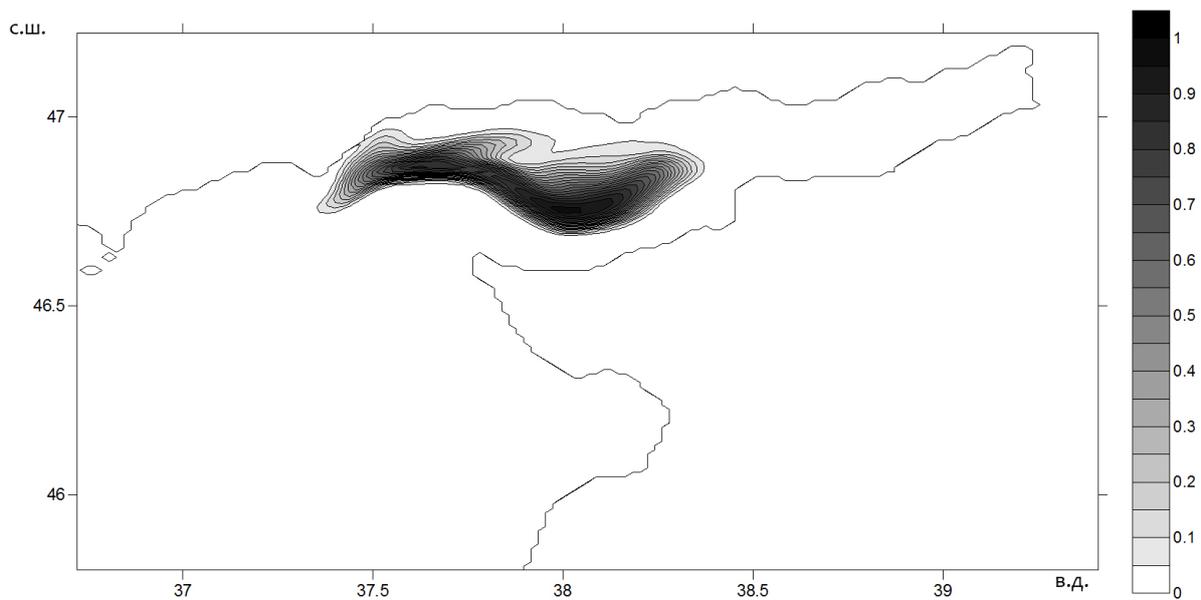
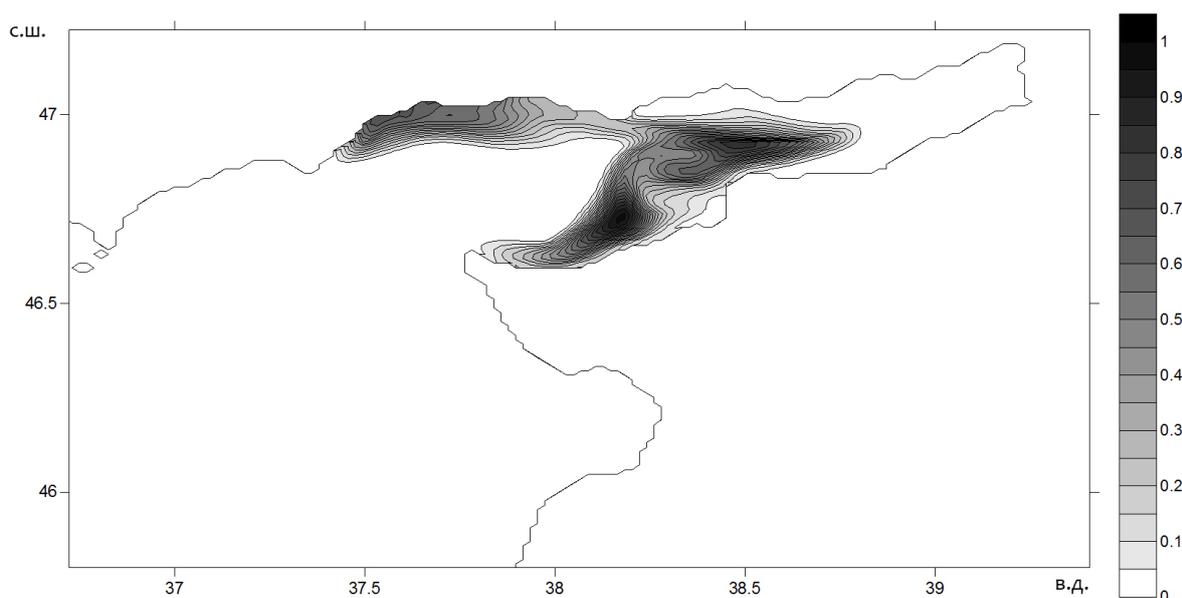


Рис. 2. Функция влияния при северном ветре для Ω_1

Рис. 3. Функция влияния при южном ветре для Ω_1 Рис. 4. Функция влияния при северо-восточном ветре для Ω_2

Рис. 5. Функция влияния при западном ветре для Ω_2

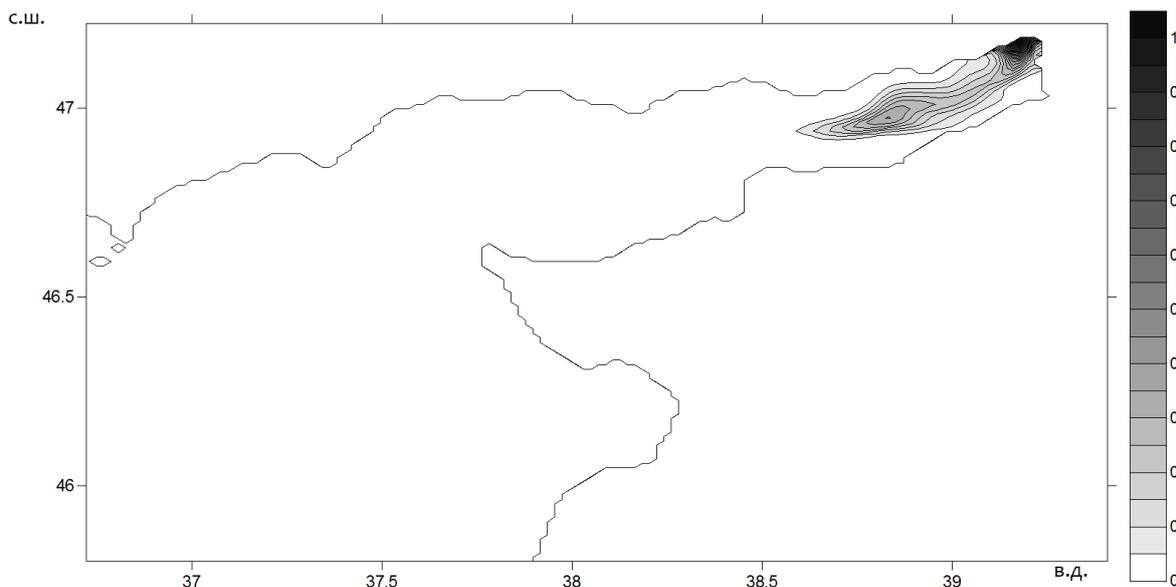
При южном и юго-восточном ветре основное влияние оказывает акватория Приморско-Ахтарска (рис. 3), а при юго-западном ветре — область мористее косы Долгой. Западное ветровое воздействие приводит к тому, что на Ω_1 влияет в основном область, расположенная в центральной части Таганрогского залива, а при северо-западном ветровом воздействии на концентрацию в Ω_1 влияют акватории, прилегающая к порту Бердянск, и центральная часть Таганрогского залива.

На концентрацию примеси в центральной части Таганрогского залива Ω_2 при северном, северо-восточном (рис. 4) и восточном ветре основное влияние оказывают акватории портов Мариуполь, Ейск и обладающая интенсивным судоходством сама центральная часть Таганрогского залива. При южных ветрах на концентрацию Ω_2 влияет главным образом центральная часть Таганрогского залива и акватория порта Ейск. При юго-западных, западных (рис. 5) и северо-западных ветрах на концентрацию примеси в Ω_2 существенное влияние оказывают порты Мариуполь, Ейск и восточные области Таганрогского залива.

Для состояния области Ω_3 при северном ветровом воздействии наиболее существенным является загрязнение акватории порта Таганрог. Северо-восточное ветровое воздействие приводит к тому, что на концентрацию загрязнителей Ω_3 интенсивное влияние оказывает акватория порта Таганрог и фарватер в восточной части Таганрогского залива. Ана-

логичный результат получается и при восточном ветровом воздействии (рис. 6). Отметим, что ветра восточного и северо-восточного направления являются преобладающими для Азовского моря. При юго-восточном ветровом воздействии получается схожая картина. При западном, юго-западном и северо-западном ветре основное влияние на концентрацию примеси в Ω_3 оказывает северное побережье Таганрогского залива, то есть порты Мариуполь и Таганрог.

Построенные функции влияния указывают, какие районы Азовского моря и Таганрогского залива на выбранном интервале времени при заданных скоростях течений и коэффициентах турбулентной диффузии ответственны за формирование суммарной концентрации загрязнений в исследуемых областях. Результат зависит от входных параметров модели переноса, которые определяются из баротропной гидродинамической модели Азовского моря. Задавая различные начальные данные, можно оценивать интересующие функционалы, характеризующие экологическую обстановку, без интегрирования основной модели. 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.

Рис. 6. Функция влияния при восточном ветре для Ω_3

Литература

1. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М. Наука, 1982. 320 с.
2. Кочергин В.С. Построение функций влияния для различных районов Черного моря. В сб.: Системы контроля окружающей среды. МГИ НАНУ. Севастополь. 2008. С. 275–277.
3. Кочергин В.С. Использование функций влияния при решении экологических задач. В сб.: Системы контроля окружающей среды. МГИ НАНУ. Севастополь. 2009. С. 205–208.
4. 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. 2009, Вып. 19. С. 228–233.
5. 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. 2011. Вып. 25. Т. 2. С. 270–376.
6. Кочергин С.В., Кочергин В.С., Фомин В.В. Определение концентрации пассивной примеси в Азовском море на основе решения серии сопряженных задач // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2012. Вып. 26. Т. 2. С. 112–118.
7. Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of the three-dimensional coastal ocean circulation model. In: Three-dimensional coastal ocean models. Heaps N. (ed.). Am. Geoph. Union, 1987. Vol. 4. P. 1–16.

8. Фомин В.В. Численная модель циркуляции вод Азовского моря // Научные труды УкрНИГМИ. 2002. Вып. 249. С. 246–255.
9. Иванов В.А., Фомин В.В. Математическое моделирование динамических процессов в зоне моря-суша. Севастополь: ЭКОСИ-гидрофизика, 2008. 363 с.

References

1. Marchuk, G.I. *Mathematical modeling in the environmental problem*, Nauka, Moscow, 1982. (In Russian)
2. Kochergin, V.S. The construction of influence functions for different regions of the Black Sea. In: *Environmental monitoring systems*, MGI NANU, Sevastopol, 2008, pp. 275–277. (In Russian)
3. Kochergin, V.S. Use of influence functions in solving environmental problems. In: *Environmental monitoring systems*, MGI NANU. Sevastopol, 2009, pp. 205–208. (In Russian)
4. Demyshev, S.G., Kochergin, S.V., Kochergin, V.S. Construction of the influence functions in the passive impurity transport model. *Ecological safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources*, MGI NANU, Sevastopol, 2009, vol. 19, pp. 228–233. (In Russian)
5. Kochergin, V.S. Determination of the passive admixture concentration field from the initial data on the basis of the solution of the conjugate problems. *Ecological safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources*, MGI NANU, Sevastopol, 2011, vol. 25, iss. 2, pp. 270–376. (In Russian)
6. Kochergin, S.V., Kochergin, V.S., Fomin, V.V. Determination of the concentration of a passive

- admixture in the Azov Sea on the basis of solving a series of conjugate problems. *Ecological safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources*, MGI NANU, Sevastopol, 2012, vol. 26, iss. 2, pp. 112–118. (In Russian)
7. Blumberg, A.F., Mellor, G.L. A description of the three-dimensional coastal ocean circulation model. In: Heaps N. (ed.) *Three-dimensional coastal ocean models*, Am. Geoph. Union, 1987, vol. 4, pp. 1–16.
8. Fomin, V.V. Numerical model of water circulation in the Azov Sea. *Nauchnye trudy UkrNIGMI* [Scientific works of UkrNIGMI], 2002, vol. 249, pp. 246–255. (In Russian)
9. Ivanov, V.A., Fomin, V.V. *Mathematical modeling of dynamic processes in the sea-land zone*. ЕНКОСИ-гидрофизика, Sevastopol, 2008. (In Russian)

© Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества, 2018

© Кочергин В. С., Кочергин С. В., 2018

Статья поступила 15 мая 2018 г.