

Ю.Н.Рябцев, Е.М.Лемешко

Морской гидрофизический институт, г.Севастополь

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЫ ДЛЯ ЗАДАЧ КОМПЛЕКСНОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Рассмотрена экологическая проблема мониторинга распространения загрязняющей примеси, источником которой являются работы по очистке корпуса судна, стоящего у берега в Севастопольской бухте в районе Килен бухты. Предлагается использовать подход на основе численного моделирования. Рассмотрены различные сценарии для моделирования распространения и переноса взвеси биологического характера, поступающей в бухту при производимых работах. Численные эксперименты проведены для ветров всех основных направлений. Также выполнены расчеты с примесью, обладающей собственной скоростью погружения, с целью определения ареала возможного отложения примеси на дне. В результате для различных направлений ветра получены карты распределения скоростей течений, концентрации примеси на поверхности и дне. Модель может быть использована для планирования натурных наблюдений в бухте и организации экологического мониторинга.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *взвесь, численное моделирование, экологический мониторинг, Севастопольская бухта.*

Целью работы является рассмотрение гидрологического режима в Севастопольской бухте в районе, прилегающем к Килен бухте, и рассмотрение различных сценариев распространения и переноса взвеси биологического характера, поступающей в бухту при производимых работах по очистке корпуса судна, стоящего у берега. Работы выполняются в течение одного рабочего дня (8 часов). Примесь обладает нейтральной плавучестью.

Будем учитывать трехмерный характер распространения взвеси, аналогично работам [1, 3]. Процесс распространения пассивной взвеси, обусловленный течениями и турбулентной диффузией, описывается уравнением, имеющим вид

$$\partial C / \partial t + \partial(uC) / \partial x + \partial(vC) / \partial y + \partial(WC) / \partial z - \partial(\kappa \partial C / \partial z) / \partial z - \mu \Delta C = F, \quad (1)$$

где C – объемная концентрация примеси (г/см^3), u, v – горизонтальные компоненты скорости течения вдоль осей x, y , $W = w + w^*$, w – вертикальная компонента скорости течения, w^* – собственная гравитационная скорость примеси (всплытия или осаждения, ось z направлена вниз), κ, μ – коэффициенты вертикальной и горизонтальной диффузии, $F(x, y, z, t)$ – источник примеси ($\text{г/см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$), t – время, ΔC – горизонтальный лапласиан.

Будем считать, что на поверхности моря $z = 0$ выполняется приближение «твердой крышки» и вертикальная скорость w равна нулю; на дне моря $z = H(x, y)$ нормальная скорость $w - uH_x - vH_y = 0$, на твердой боковой границе (берег) обращается в нуль нормальная компонента вектора горизонтальной скорости течения $\mathbf{u} = \{u, v\}$; выполняется приближение несжимаемости ($\text{div} \mathbf{v} = 0$), где $\mathbf{v} = \{u, v, w\}$ – вектор скорости течения. В случае, когда

скорость всплытия w^* не меняется с глубиной, имеет место уравнение $\text{div} \mathbf{U} = 0$, $\mathbf{U} = \{u, v, W\}$.

В начальный момент времени задается распределение примеси, т.е.

$$\text{при } t = 0 \quad C = C_0(x, y, z). \quad (2)$$

Граничные условия на поверхности моря, на дне и на боковой поверхности будем ставить непосредственно для суммарного (адвективного и диффузионного) потока примеси, причем в наиболее общем виде с учетом свойства транспортности.

$$\text{при } z = 0 \quad -\kappa \partial C / \partial z + WC = 0, \quad (3)$$

$$\text{при } z = H(x, y) \quad -\kappa \partial C / \partial n + \mathbf{U}_n C = 0, \quad (4)$$

где $\partial C / \partial n$ – производная по нормали к границе. В реальных условиях направление нормали незначительно отличается от вертикали и с достаточной точностью можно заменить $\partial C / \partial n$ на $\partial C / \partial z$, $\mathbf{U}_n$ – на w^* .

Физический смысл условий (3), (4) достаточно прозрачен. Осаждающаяся примесь ($w^* > 0$) не накапливается у поверхности моря, но может накапливаться у дна, где $\kappa \partial C / \partial z = w^* C > 0$. В то же время всплывающая примесь ($w^* < 0$) может накапливаться у поверхности моря, где $\kappa \partial C / \partial z = w^* C < 0$, но не будет накапливаться у дна.

Условия на боковой поверхности, т.е. на твердых и жидких границах, запишем в виде

$$-\mu \partial C / \partial n + \mathbf{u}_n C = \mathbf{u}_n^+ C + \mathbf{u}_n^- C_L, \quad (5)$$

где $\partial C / \partial n$ – производная по внешней нормали к границе, $\mathbf{u}_n^+$ – скорость вытекания, $\mathbf{u}_n^-$ – скорость втекания в область, C_L – концентрация примеси во внешней области.

В силу сравнительной мелководности рассматриваемой области течения здесь в основном определяются ветром. Будем рассматривать синоптические ситуации, когда ветер не меняется в течение суток и течения можно считать стационарными. Тогда перенос примеси осуществляется установившимися течениями и для их расчета используется обобщенная на случай учета рэлеевского трения (пропорционального скорости течения) трехмерная баротропная линейная модель Фельзенбаума [1 – 4].

В этой модели решение трехмерной задачи о течениях сводится к решению двумерной задачи для интегральной функции тока и к последующему вычислению компонент скорости течения по аналитическим формулам. Это позволяет проводить расчеты на сравнительно мелкой сетке и описывать особенности прибрежных течений и динамику вод в бухтах.

Отметим, что при расчете примеси косвенно учитывался прибрежный пограничный слой, которого нет в модели из-за отсутствия горизонтальной вязкости. Для этого на расстоянии шага сетки от границы, на которой равняется нулю нормальная компонента полного потока, дополнительно вводится граница, на которой равняется нулю нормальная компонента горизонтальной скорости течения. Это позволяет учесть особенности вертикальных движений непосредственно у берега, и обеспечить выполнение условия равенства нулю нормального к береговой линии потока примеси (при отсутствии там источников и стоков).

Численная схема. Задача переноса примеси решается численно с помощью конечно-разностной схемы, описанной в [4]. Используется консервативная схема (бокс-метод) с монотонизатором – «дозированным» использованием «направленных» разностей при аппроксимации адвективных членов уравнения (схемная диффузия исключалась с помощью варианта метода коррекции потоков). Это обеспечивает неотрицательность значений концентрации примеси во всей области расчета. По времени интегрирование осуществляется с помощью двухслойной полунеявной схемы.

Пространственная дискретизация производится на сетке В (по терминологии Аракава). По вертикали сетка неравномерная с шагами Δz_k , по горизонтали равномерная с шагами Δx и Δy . На горизонтах Z_k определяются горизонтальные компоненты скорости течения (в узлах боксов) и концентрация примеси (в центрах боксов). При расчете примеси в качестве скоростей течений на горизонтах Z_k используются средние в слоях горизонтальные течения.

На рис.1 приведена расчетная область Севастопольской бухты. Максимальная глубина в этой части Севастопольской бухты 22 м. Звездочкой обозначено место проведения работ.

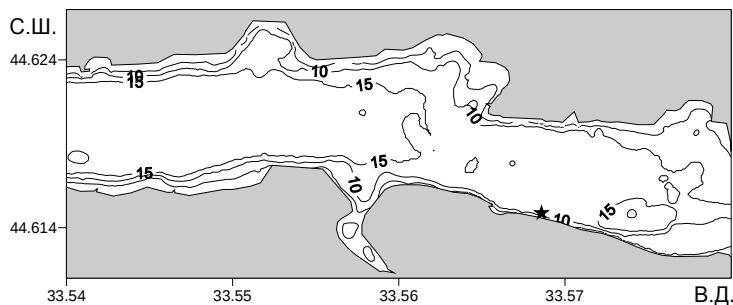
Для расчетов использовалась 7-уровневая численная модель с горизонтами $Z_k = 0,1; 0,9; 3,1; 6,9; 13,1; 26,9; 43,1$ м, шагами по горизонтали $\Delta x = 7,9$ м, $\Delta y = 11,1$ м. Коэффициенты вертикальной вязкости и рэлеевского трения полагались постоянными $A = 20 \text{ см}^2/\text{с}$, $r = 5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. Коэффициенты горизонтальной и вертикальной диффузии примеси принимались также постоянными $\mu = 10^2 \text{ см}^2/\text{с}$, $\kappa = 0,1 \text{ см}^2/\text{с}$. Параметр Кориолиса $f = 10^{-4} \text{ с}^{-1}$.

В рамках данной модели интегральная циркуляция определяется рельефом дна и особенностями в напряжении ветра (неравномерностью и направлением). Напряжение ветра считаем равномерным, так как характерный масштаб изменения ветра значительно больше масштаба рассматриваемой области.

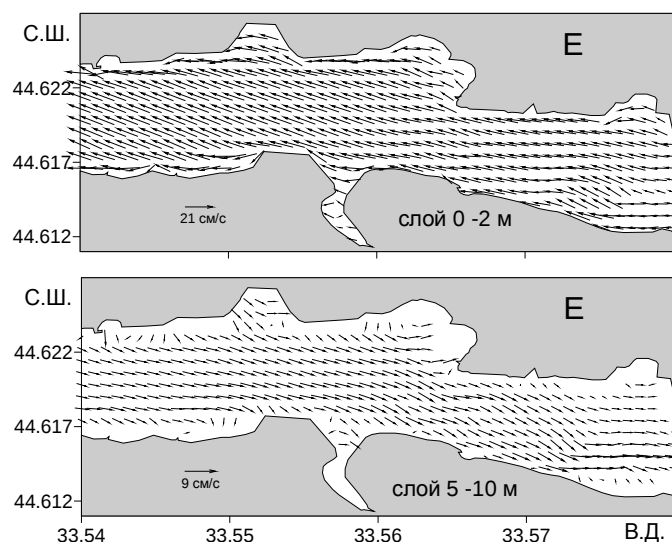
Численные эксперименты проведены для ветров всех основных направлений (северо-восточного, северного, северо-западного, западного, юго-западного, южного, юго-восточного и восточного).

Пусть $\tau^x = |\tau| \cos \varphi \pi$, $\tau^y = |\tau| \sin \varphi \pi$, $|\tau| = 1 \text{ дин}/\text{см}^2$ (что соответствует скорости ветра, примерно, 6 – 9 м/с). В силу линейности задачи, при изменении направления ветра, знак скорости течения меняется на противоположный, а при изменении амплитуды τ – пропорционально меняются значения скорости течения.

Расчет проводился на 24 часа с шагом $\Delta t = 10 \text{ с}$.



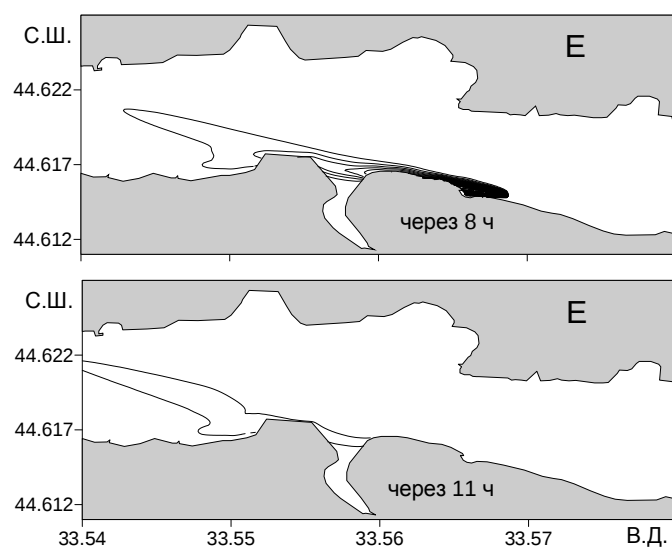
Р и с . 1 . Расчетная область (район Килен бухты), размер 3168 × 1754 м.



Р и с . 2 . Структура течений в слое 0 – 2 м и 5 – 10 м при восточном ветре.

Структура течений в бухте при различных ветрах такова, что течения в нижележащих слоях совершают поворот относительно поверхностного течения и в нижнем слое направлены в противоположную сторону (например, для восточного ветра, рис.2). Величины скорости в поверхностном слое достигает 18 – 21 см/с, в придонном слое 5 – 6 см/с. Напомним, что нами выбран достаточно сильный ветер. Скорости берутся средние по глубине в слое.

На рис.3 представлены распределения примеси через 8 и 11 часов после начала работы (на момент окончания поступления примеси и через три часа после окончания) на поверхности. На всех рисунках величины концентрации примеси нормированы на величину максимальной концентрации примеси в источнике и приведены в процентах, а изолинии показаны с шагом в 1 %.



Р и с . 3 . Через 11 часов концентрация на поверхности чуть более 1 %.

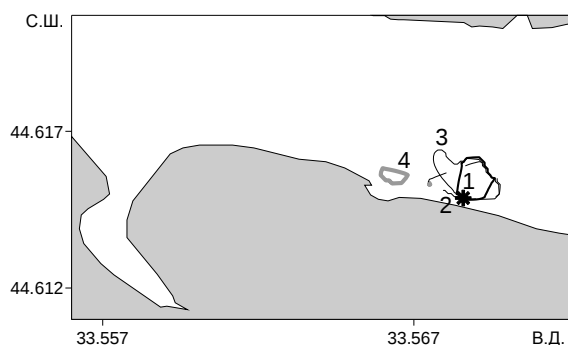


Рис. 4. Положение возможных следов донных отложений примеси при северном (1), северо-восточном (2), северо-западном (3), восточном (4) ветрах. Звездочка – положение источника.

Распространение примеси происходит главным образом в приповерхностном слое. Уже через два часа концен-

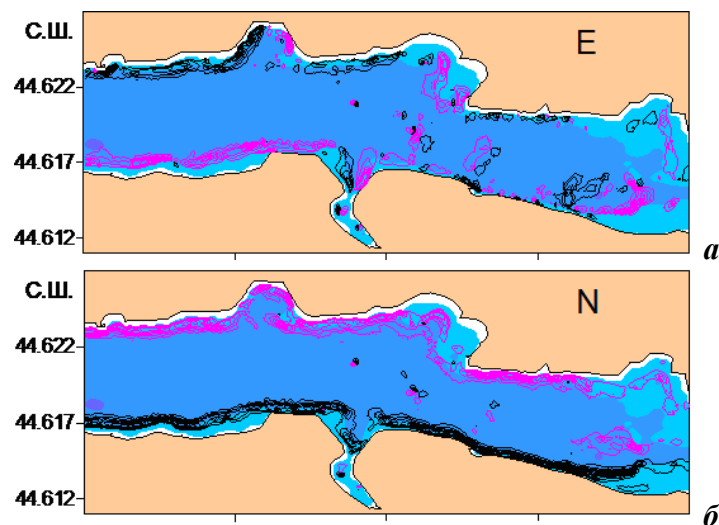
трация падает до 5 – 6 % от максимальной, а через три часа – до одного.

Также проведены расчеты для определения положения возможного следа донных отложений примеси. В этом расчете задавалась собственная скорость опускания примеси равная 0,1 см/с. Очертания зон для различных ветров приведены на рис.4. Граница соответствует 1 % от максимального содержания на поверхности в момент окончания работ. Наибольшей концентрации осадков на дне следует ожидать при ветрах северного (6,5 %), северо-восточного (7,9 %), восточного (3,7 %) и северо-западного (3,4 %). Для ветров южного, юго-западного, юго-восточного и западного максимальная концентрация на дне не превышает 1 %.

В данных расчетах предполагалось, что достаточно сильный ветер дует постоянно в течение всего расчета. В реальности ветер может менять направление и быть значительно слабее. В результате картина распределения примеси может быть более сложной. Значения концентрации примеси (более высокие) будут сосредоточены вблизи объекта и по прекращении работ спадать достаточно медленно. Кроме того, при слабых значениях ветра будет значительно слабее перенос примеси течениями.

На рис.5 показаны распределения вертикальных скоростей. Наличие у берега достаточно интенсивных зон подъема и опускания вод может приводить к тому, что даже примесь с нейтральной плавучестью при попадании в такую зону может опускаться в нижележащие слои и распространяться в направлении, не совпадающем с поверхностными течениями. Возможен ее выход на поверхность, в силу тех же причин, у противоположного берега. Так при ветрах северного, северо-западного и северо-восточного направлений в месте проводимых работ будет наблюдаться интенсивная зона опускания, соответственно большая часть примеси будет уходить в нижележащие слои и выходить на поверхность у противоположного берега. Для ветров противоположного направления южных, юго-восточных и юго-западных все будет с точностью до наоборот, здесь будет наблюдаться зона интенсивного подъема и основное количество примеси будет распространяться в поверхностных слоях.

Таким образом, были проведены численные эксперименты и определены районы потенциального загрязнения для действия ветра различного направления согласно розе ветров, характерной для бухты. Были получены карты поля течений и исследованы варианты распределения примеси в зависимости от действия ветра, времени его действия, характеристик самой примеси. Изучены особенности рассматриваемого региона (конфигурация берега,



Р и с . 5. Вертикальные скорости (зоны подъема (розовый) и опускания (черный)) для восточного (а) и северного (б) направлений ветра.

рельефа дна), структуры горизонтальных течений, наличия интенсивных зон подъема и опускания вод на особенности распространения примеси.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ 14-45-01592, код «р_юг_а региональный конкурс Юг России» и при поддержке проекта «Разработка методов и создание экспериментального образца биотехнической системы мониторинга шельфовых зон морей западной Арктики и Юга России, в том числе в районе Крымского полуострова на основе спутниковых и контактных данных» (шифр «2014-14-579-0115-020, RFMEFI60714X0059).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлова Э.Н., Шапиро Н.Б., Юценко С.А. Моделирование распространения пассивной примеси в севастопольских бухтах // Морской гидрофизический журнал.– 1999.– № 3.– С.29-42.
2. Шапиро Н.Б., Юценко С.А. Моделирование ветровых течений в севастопольских бухтах // Морской гидрофизический журнал.– 1999.– № 1.– С.42-57.
3. Иванов В.А., Рябцев Ю.Н. Моделирование поверхностных течений и переноса нефти в бухтах Камышовая и Казачья // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2001.– С.18-30
4. Шапиро Н.Б. Моделирование течений на севастопольском взморье // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006.– вып.14.– С.119-134.

Материал поступил в редакцию 28.11.2014 г.

АНОТАЦІЯ Розглянута екологічна проблема моніторингу розповсюдження забруднюючої речовини, джерелом якої є роботи по очищенню корпусу судна, що стоїть біля берега в Севастопольській бухті в районі Килен бухти. Пропонується

використовувати підхід на основі чисельного моделювання. Розглянуті різні сценарії для моделювання розповсюдження і перенесення суспензії біологічного характеру, що поступає в бухту при вироблюваних роботах. Чисельні експерименти проведені для вітрів всіх основних напрямів. Також виконані розрахунки з речовиною, власною швидкістю занурення, що володіє, з метою визначення ареалу можливого відкладення речовини на дні. В результаті для різних напрямів вітру отримані карти розподілу швидкостей течій, концентрації речовини на поверхні і дні. Модель може бути використана для планування натурних спостережень в бухті і організації екологічного моніторингу.

ABSTRACT The ecological problem of monitoring of contaminating pollutants distribution, the source of which it is been work on cleaning of ship's hull, standing at shore in the Sevastopol bay in the district of Kilen bay, is considered. It is suggested to take approach on the basis of numerical modeling. Different scenarios are considered for the modeling of distribution and biological pollutants transport, entering to the bay during produced works. Numerical experiments are conducted for the winds of all basic directions. Calculations are also executed with pollutants, possessing own immersion velocity, with the purpose of area determination of possible pollutant deposit on the bottom. As a result for different wind directions, the maps of distribution of current velocity and pollutants concentrations are obtained on surface and bottom. The model can be applied for planning of in-situ observations in the bay and organization of the ecological monitoring.