

Численное моделирование распространения заглубленного стока в прибрежной зоне Гераклейского полуострова

© 2016 В.А. Иванов, В.В. Фомин

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
E-mail: vaivanov@inbox.ru, fomin.dntmm@gmail.com

Поступила в редакцию 30.06.2016 г.

На основе трехмерной численной модели исследуется проблема распространения сточных вод в прибрежной зоне Гераклейского п-ова от подводного источника, имитирующего прорыв магистрали основного выпуска г. Севастополя. Расчеты проведены для трех типов плотностной стратификации, полученных в рейсах НИС «Бирюза» в сентябре 2015 г. и мае 2016 г. Глубина выпуска изменялась от 15 до 30 м. Выявлено, что выход загрязненных вод на поверхность зависит от особенностей плотностной стратификации. Основная причина, препятствующая подъему загрязненных вод, – наличие слоев скачка плотности выше источника выпуска. Прослеживается общая тенденция, заключающаяся в увеличении площади загрязненных слоев с ослаблением плотностной стратификации и уменьшением скорости течений. Установлено, что поле сточных вод вблизи выпуска состоит из факела и струи, ориентированной вдоль направления фонового течения. С увеличением скорости течения происходит опускание вершины факела и заглубление струи с одновременным уменьшением ее поперечных размеров.

Ключевые слова: прибрежная зона Крыма, сточные воды, подводный выпуск, плотностная стратификация, численное моделирование.

Введение. Одним из основных источников загрязнения морских прибрежных акваторий являются заглубленные стоки из подводных коллекторов. Для изучения процессов формирования и распространения поля сбрасываемых вод используются контактные и дистанционные методы наблюдений [1 – 6], а также физическое и математическое моделирование [1, 7 – 10].

Подводные выпуски за счет втекания в море более пресной воды создают у дна локальный источник положительной плавучести, который формирует системы устойчивых турбулентных течений в виде факелов и затопленных струй. Эти системы течений обычно называют плюмами (plumes). Турбулентная диффузия и адвективный перенос вызывают процессы разбавления загрязненных вод в плюме. На интенсивность (кратность) разбавления влияют следующие факторы: тип выпуска (точечный или распределенный источник в виде диффузора), расход воды в источнике, динамические условия приемной среды, разность плотности морской воды и сточных вод и др. Сточные воды при подъеме от выпуска могут задерживаться плотностной стратификацией на горизонте нейтральной плавучести, который обычно соответствует нижней границе пикноклина, и далее распространяться под пикноклином в горизонтальном направлении.

Современный уровень антропогенных нагрузок на прибрежную зону Крыма весьма значителен [11]. Поэтому исследование особенностей формирования и распространения поля сточных вод у берегов Крыма представляется важной и актуальной задачей.

В районе Голубой бухты Гераклеяского п-ова на расстоянии 3 км от берега на глубине 90 м располагается диффузор основного подводного выпуска сточных вод Севастополя. Комплексные экспедиционные исследования НИС «Бирюза» в сентябре 2015 г. и мае 2016 г. не выявили следов загрязнений в непосредственной близости от диффузора. При этом было обнаружено, что над магистралью выпуска вблизи берега существует источник загрязнения. Он содержит химические компоненты, характерные для сточных вод, которые в этом районе образуют мутные слои на глубинах 10 – 25 м. Вероятнее всего, что обнаруженный источник является следствием прорыва магистрали подводного выпуска. В этой связи представляет интерес выяснить, при каких глубинах расположения источника и каких типах плотностной стратификации возможно проникновение сточных вод в поверхностные слои моря.

Цель данной работы – математическое моделирование распространения сточных вод в прибрежной зоне Гераклеяского п-ова от подводного источника, имитирующего прорыв магистрали основного выпуска Севастополя. В задачи работы входило исследование особенностей пространственной структуры поля сточных вод в районе подводного выпуска для разных типов плотностной стратификации и разных величин скорости фоновых течений, а также определение условий, при которых возможен выход сточных вод на поверхность моря.

Формулировка задачи и исходные уравнения. Введем декартову систему координат (x, y, z) , ось z направим вертикально вверх. Рассмотрим бассейн прямоугольной формы и постоянной глубины h_0 , заполненный непрерывно стратифицированной жидкостью и ограниченный жидкими боковыми границами.

В начальный момент времени трехмерные термогидродинамические поля и поле концентрации загрязняющей примеси описываются следующими условиями:

$$u = U_0, v = w = 0, \eta = 0, T = T_0(z), S = S_0(z), C = 0. \quad (1)$$

Здесь u, v, w – компоненты скорости течений вдоль осей x, y, z соответственно; U_0 – постоянная по глубине скорость фонового течения, которое направлено вдоль оси x ; η – координата свободной поверхности бассейна; T, S – температура и соленость воды; $T_0(z)$ – фоновое распределение температуры; $S_0(z)$ – фоновое распределение солености; C – концентрация загрязняющей примеси. Для упрощения задачи примесь предполагается консервативной.

В момент времени $t > 0$ на дне бассейна в точке с координатами $(x_p, y_p, z_p = -h_0)$ начинает действовать локальный источник, моделирующий выпуск сточных вод. Известны следующие параметры источника: Q_p – расход воды; d – горизонтальный размер источника; $w_p = Q_p/d^2$ – скорость втекания воды; T_p, S_p – температура и соленость втекающей воды; C_p – концентрация примеси на выходе из источника.

Ставится задача исследовать эволюцию поля примеси, вызванную действием источника при разных типах $T_0(z)$ и $S_0(z)$ и разных значениях h_0 и U_0 . Для ее решения используем численную бароклинную модель циркуляции вод [12, 13]. В основу модели положены трехмерные σ -координатные уравнения динамики океана в приближении Буссинеска и гидростатики следующего вида (предполагается суммирование по повторяющимся индексам α и β от 1 до 2):

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(Du_\alpha) + \Lambda u_\alpha + \varepsilon_{\alpha\beta} f Du_\beta + gD \frac{\partial \eta}{\partial x_\alpha} + DB_\alpha = \\ & = \frac{\partial}{\partial x_\beta}(D\tau_{\alpha\beta}) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_M}{D} \frac{\partial u_\alpha}{\partial \sigma} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_\alpha}(Du_\alpha) + \frac{\partial w_*}{\partial \sigma} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(DT) + \Lambda T = \frac{\partial}{\partial x_\beta} \left(A_T \frac{\partial T}{\partial x_\beta} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_T}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right), \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(DS) + \Lambda S = \frac{\partial}{\partial x_\beta} \left(A_S \frac{\partial S}{\partial x_\beta} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_S}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right), \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(DC) + \Lambda C = \frac{\partial}{\partial x_\beta} \left(A_C \frac{\partial C}{\partial x_\beta} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_C}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right), \quad (6)$$

$$\rho = \rho(T, S), \quad (7)$$

$$\Lambda \varphi = \frac{\partial}{\partial x_\beta}(Du_\beta \varphi) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(w_* \varphi), \quad B_\alpha = \frac{g}{\rho_0} \left(\frac{\partial}{\partial x_\alpha} D \Big|_\sigma \rho d\sigma' + \sigma \frac{\partial D}{\partial x_\alpha} \rho \right), \quad (8)$$

$$\tau_{\alpha\alpha} = 2A_M \frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\alpha}, \quad \tau_{\alpha\beta} = \tau_{\beta\alpha} = A_M \left(\frac{\partial u_\beta}{\partial x_\alpha} + \frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\beta} \right), \quad (9)$$

где $(x_1, x_2) = (x, y)$; σ – безразмерная вертикальная координата, изменяющаяся в пределах от -1 до 0 ; $D = h_0 + \eta$ – динамическая глубина; $\tau_{\alpha\beta}$ – компоненты тензора турбулентных напряжений; $A_M, K_M, A_T, K_T, A_S, K_S, A_C, K_C$ – коэффициенты турбулентной вязкости и диффузии; g – ускорение свободного падения; f – параметр Кориолиса; ρ_0 – средняя плотность воды; $\varepsilon_{\alpha\beta} = 0$ при $\alpha = \beta$; $\varepsilon_{12} = -1$; $\varepsilon_{21} = 1$.

Искомые переменными системы (2) – (9) являются: $(u_1, u_2) = (u, v)$ – горизонтальные компоненты скорости; w_* – нормальная к поверхностям $\sigma = \text{const}$ компонента скорости течений; поля T, S, C и поле плотности морской воды ρ .

На свободной поверхности ($\sigma = 0$) граничные условия имеют вид

$$w_* = 0, \quad \frac{K_M}{D} \frac{\partial u_\alpha}{\partial \sigma} = 0, \quad \frac{K_T}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} = 0, \quad \frac{K_S}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} = 0, \quad \frac{K_C}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} = 0. \quad (10)$$

Граничные условия на дне за пределами источника ($\sigma = -1, x \neq x_p, y \neq y_p$) записываются следующим образом:

$$w_* = 0, \quad \frac{K_M}{D} \frac{\partial u_\alpha}{\partial \sigma} = \mu |u| u_\alpha, \quad \frac{K_T}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} = 0, \quad \frac{K_S}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} = 0, \quad \frac{K_C}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} = 0, \quad (11)$$

где μ – коэффициент донного трения; $|u| = \sqrt{u_1^2 + u_2^2}$.

Граничные условия на дне в области действия источника ($\sigma = -1, x = x_p, y = y_p$) можно представить в виде [14]

$$w_* = w_p, \quad \frac{K_M}{D} \frac{\partial u_\alpha}{\partial \sigma} = \mu |u| u_\alpha, \quad (12)$$

$$w_p T - \frac{K_T}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} = w_p T_p, \quad w_p S - \frac{K_S}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} = w_p S_p, \quad w_p C - \frac{K_C}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} = w_p C_p. \quad (13)$$

Коэффициенты горизонтальной турбулентной вязкости и диффузии вычисляются с помощью формулы Смагоринского [15]. Для определения коэффициентов вертикальной турбулентной вязкости и диффузии используется модель Мейлора – Ямады [12, 16].

Численный алгоритм решения системы (2) – (13) основан на разделении задачи на баротропную и бароклинную моды и применении явных схем по горизонтальным координатам и неявных схем – по σ -координате. Для аппроксимации адвективных операторов Λ в (2), (4) – (6) используются схемы TVD [17, 18]. Эти схемы обладают свойством монотонности, что является необходимым условием для адекватного моделирования полей с большими пространственными градиентами. Детальное описание численного алгоритма модели приведено в работе [12].

Численные эксперименты и обсуждение результатов. Численные эксперименты проводились для квадратного бассейна размером 2 км и глубиной h_0 . Координаты источника $(x_p, y_p, z_p) = (600 \text{ м}, 1000 \text{ м}, -h_0)$, его горизонтальный размер $d = 20$ м. Номинальный расход воды в источнике $Q_p = 1,4 \text{ м}^3/\text{с}$, концентрация в нем примеси $C_p = 500 \text{ мг/л}$. Предполагалось, что втекающая вода имеет нулевую соленость ($S_p = 0$), а ее температура равна температуре окружающей среды, т. е. $T_p = T_0(-h_0)$. Таким образом, эффект положительной плавучести в подводном источнике создавался за счет втекания пресной воды.

Для рассматриваемой задачи число Фруда имеет вид $\text{Fr} = w_p / \sqrt{g'd}$, где $g' = g(\rho_b - \rho_p) / \rho_b$, ρ_p – плотность воды в источнике, ρ_b – плотность окружающей источник воды. При принятых значениях Q_p и d величина $\text{Fr} \sim 0,01$. Это означает, что в данной постановке задачи эффект плавучести является преобладающим.

Численное моделирование выполнялось на равномерной прямоугольной сетке с шагом d по горизонтали и дискретностью 1 м – по вертикали. Шаг интегрирования по времени равнялся 5 с, общее время интегрирования составляло 12 ч. За первый час модельного времени расход воды в источнике линейно увеличивался в пределах 0 – 1,4 м³/с и далее оставался неизменным. Граничные условия при $x = 0$ задавались в виде (1). На других жидких границах использовались условия гладкого продолжения [12, 14], что приемлемо при расчетах на небольшие промежутки времени.

Коэффициент донного трения в граничных условиях (11), (12) определялся по формуле $\mu = 0,16/\ln^2(\delta z/z_b)$, где δz – расстояние по вертикали от дна до точки, в которой определяется коэффициент трения; $z_b = 0,01$ м – параметр шероховатости донной поверхности. Расчеты проводились с нулевым параметром Кориолиса. Уравнение состояния морской воды (7) задавалось формулой *UNESCO*.

Плотностная стратификация 9 – 10 сентября 2015 г. В первом цикле численных экспериментов в качестве $T_0(z)$ и $S_0(z)$ использовались профили, показанные на рис. 1, а, б. Сплошные черные кривые соответствуют гидрологической ситуации 9 сентября 2015 г. (далее – первый тип стратификации); пунктирные черные кривые – гидрологической ситуации 10 сентября 2015 г. (далее – второй тип стратификации). Эти профили получены путем осреднения по ансамблю станций, которые были наиболее близко расположены к магистрали подводного выпуска. Как видно, профили заметно отличаются друг от друга лишь в верхнем 30-метровом слое. Анализ профилей частоты Вяйсяля – Брента N показывает (рис.1, в), что наибольшие градиенты плотности воды для обоих типов стратификации локализованы в слое 15 – 30 м. Среднее значение N в слое 0 – 30 м для каждого типа профилей равно 18,3 и 13,1 цикл/ч соответственно.

Перечень численных экспериментов для первого и второго типов стратификации с различными значениями U_0 и h_0 приведен в табл. 1. Выбор значений U_0 основан на результатах *ADCP*-измерений в районе Гераклеийского п-ова осенью 2015 г. [19], согласно которым средние скорости течений в период наблюдений составляли ~0,05 м/с.

Основным объектом исследований являлось поле концентрации примеси c , нормированное на величину концентрации примеси в источнике C :

$$c(x, y, z, t) = 100\% C(x, y, z, t) / C(x_p, y_p, -h_0, t). \quad (14)$$

Для идентификации областей загрязнения (границ плюма) использовалось пороговое значение $c = 5\%$. Общая площадь загрязнения в каждом расчетном слое толщиной $z_{k+1} - z_k$ оценивалась по формуле

$$V(z_{k+1/2}, t) = \sum_{i,j} \gamma(x_i, y_j, z_{k+1/2}, t), \quad (15)$$

$$\gamma(x_i, y_j, z_{k+1/2}, t) = \begin{cases} b, & c(x_i, y_j, z_{k+1/2}, t) \geq 5\%, \\ 0, & c(x_i, y_j, z_{k+1/2}, t) < 5\%, \end{cases}$$

где k – номер горизонта; $z_{k+1/2} = (z_{k+1} + z_k)/2$ – вертикальная координата центра ячейки; x_i, y_j – горизонтальные координаты узлов разностной сетки; $b = d^2$ – площадь горизонтального сечения ячейки. Из (15) видно, что $V(z_{k+1/2}, t)/b$ – общее количество расчетных ячеек в слое $z_{k+1} - z_k$, для которых $c \geq 5\%$.

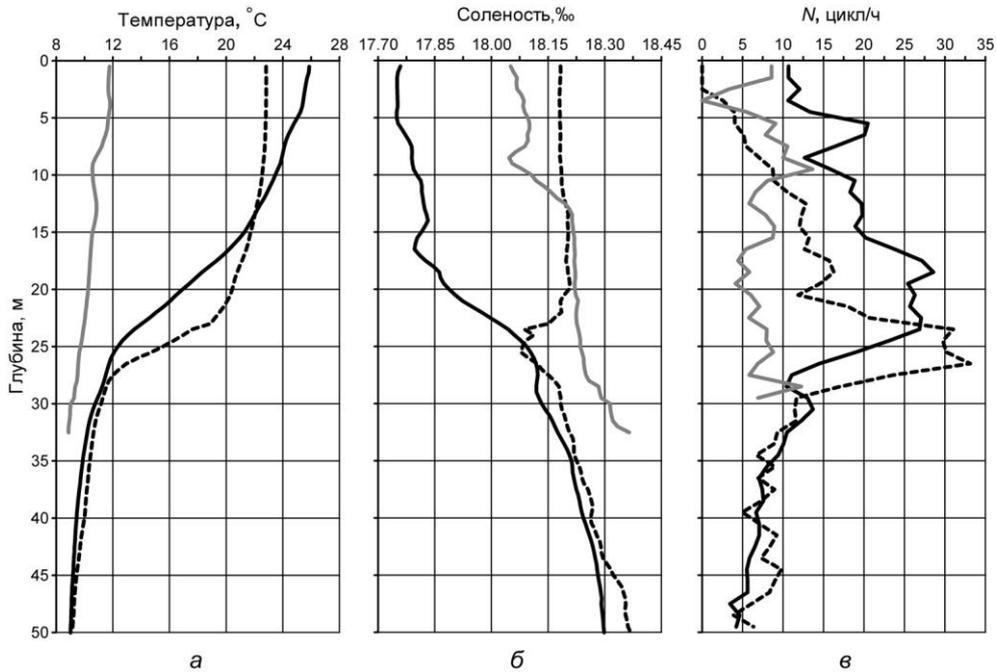


Рис. 1. Профили температуры воды, солености и частоты Вьясяля – Брента в районе подводного выпуска для трех гидрологических ситуаций: сплошные черные кривые – 9 сентября 2015 г.; пунктирные черные кривые – 10 сентября 2015 г.; сплошные серые кривые – 20 мая 2016 г.

Некоторое представление о вертикальном распределении зон загрязнения при разных комбинациях параметров h_0 и U_0 дают кривые на рис. 2 – 6.

На рис. 2 приведено распределение V/b при глубине источника $h_0 = 15$ м для первого и второго типов стратификации и трех значений U_0 . Кривые соответствуют моменту времени $t = 12$ ч. Как видно, при первом типе стратификации основные области загрязнения находятся на глубинах 5 м и ниже (рис. 2, а), что обусловлено наличием локального скачка плотности в слое 5 – 7 м (рис. 1, в). На положение областей загрязнения и их площади существенное влияние оказывает скорость фоновых течений. Так, при увеличении U_0 от 0,025 до 0,075 м/с происходит опускание областей от 5 м до дна с одновременным уменьшением их площадей в 1,5 – 2 раза.

Максимальные площади зон загрязнения ($\max V$) и глубины их залегания (z_{\max}) для первого и второго типов стратификации (ТС) при разных значениях U_0 и h_0

h_0 , М	U_0 , м/с	ТС	$\max V$, км ²	z_{\max} , М	h_0 , М	U_0 , м/с	ТС	$\max V$, км ²	z_{\max} , М
15	0,025	1	0,52	5,5	15	0,025	2	3,54	0,5
15	0,050	1	0,28	9,5	15	0,050	2	2,69	0,5
15	0,075	1	0,37	14,5	15	0,075	2	0,05	0,5
20	0,025	1	0,47	11,5	20	0,025	2	2,25	0,5
20	0,050	1	0,31	13,5	20	0,050	2	0,85	0,5
20	0,075	1	0,25	18,5	20	0,075	2	0,01	1,5
25	0,025	1	0,40	18,5	25	0,025	2	0,35	13,5
25	0,050	1	0,29	19,5	25	0,050	2	0,21	16,5
25	0,075	1	0,42	19,5	25	0,075	2	0,26	21,5
30	0,025	1	0,37	20,5	30	0,025	2	0,33	23,5
30	0,050	1	0,28	22,5	30	0,050	2	0,29	24,5
30	0,075	1	0,37	22,5	30	0,075	2	0,37	22,5

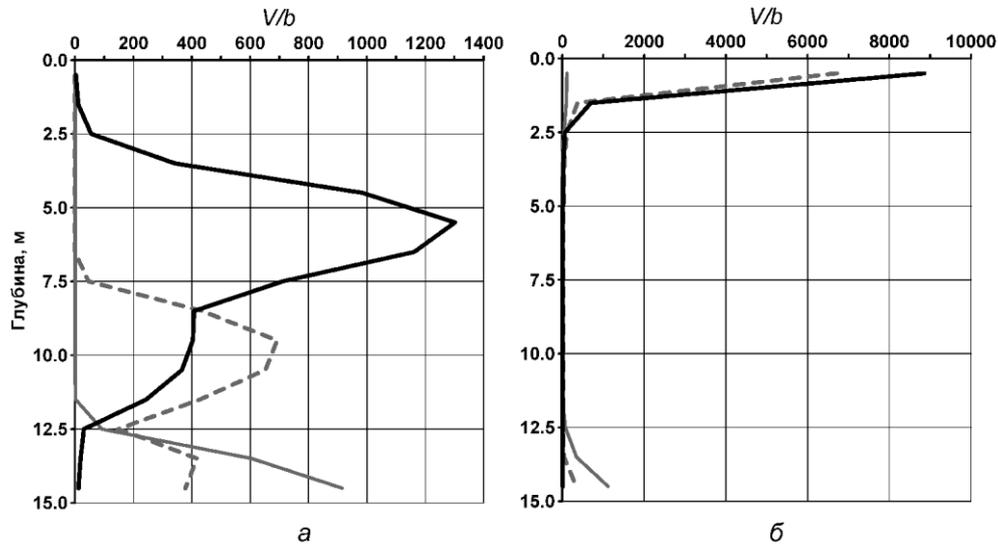


Рис. 2. Распределение по вертикали площади загрязнения при $h_0 = 15$ м для первого (а) и второго (б) типов стратификации при $t = 12$ ч. Сплошные черные кривые – V/b при $U_0 = 0,025$ м/с; пунктирные серые кривые – V/b при $U_0 = 0,050$ м/с; сплошные серые кривые – V/b при $U_0 = 0,075$ м/с

Вертикальная структура зон загрязнения для второго типа стратификации (рис. 2, б) отлична от рассмотренного выше случая. Вследствие более слабой стратификации в слое 0 – 20 м (рис. 1, в) загрязненные воды достигают поверхности бассейна и растекаются по ней слоем толщиной 1 – 2 м. При $U_0 = 0,075$ м/с площадь загрязнения поверхности бассейна на два порядка меньше, чем при $U_0 = 0,025$ м/с и $U_0 = 0,05$ м/с.

Кривые V/b для $h_0 = 20$ м показаны на рис. 3. При первом типе стратификации источник располагается в слое скачка плотности, при этом основные зоны загрязнения формируются на глубинах более 10 м (рис. 3, а). При втором типе стратификации источник находится над слоем скачка. В случаях, когда $U_0 = 0,025$ м/с и $U_0 = 0,05$ м/с, формируются обширные зоны загрязнения в поверхностном слое (рис. 3, б).

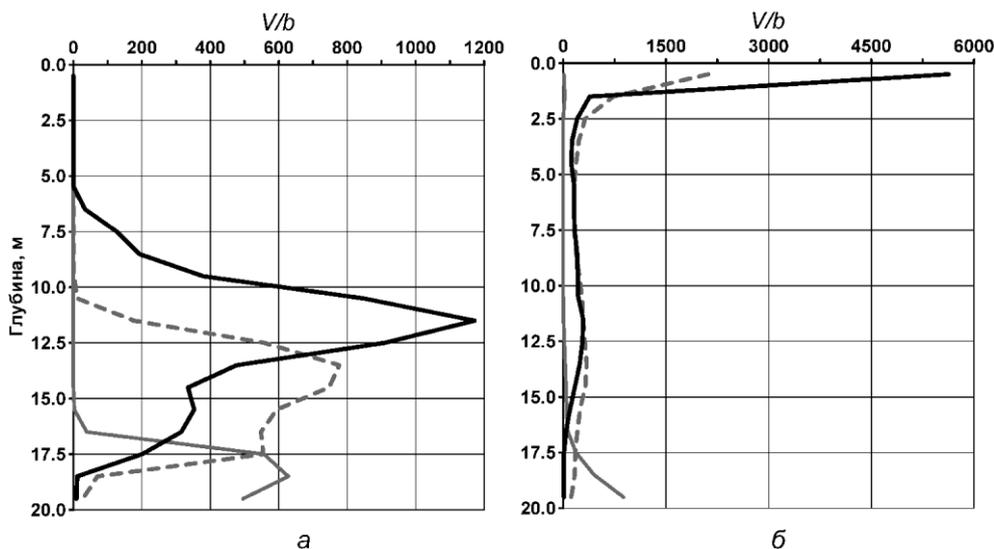


Рис. 3. Распределение по вертикали площади загрязнения при $h_0 = 20$ м для первого (а) и второго (б) типов стратификации при $t = 12$ ч. Соответствие цветов и типов линий такое же, как на рис. 2

На рис. 4 показано распределение V/b для $h_0 = 25$ м. При первом типе стратификации при всех значениях U_0 области загрязненных вод сосредоточены в слое ~15 – 22 м (рис. 4, а). При втором типе стратификации положение этих областей зависит от скорости фоновых течений. Так, увеличение U_0 от 0,025 до 0,075 м/с вызывает заглубление областей с 13 до 22 м.

На рис. 5 показано распределение V/b для $h_0 = 30$ м (для обоих типов стратификации источник расположен под слоем скачка плотности). Видно, что в этом случае фоновые течения не оказывают заметного влияния на положение слоев загрязненных вод. Как для первого, так и для второго типов стратификации основные зоны загрязнения сосредоточены в слое ~18 – 27 м.

В табл. 1 приведены величины максимумов площадей зон загрязнения ($\max V$) и соответствующие им горизонты (z_{\max}) для 24 комбинаций параметров задачи. Как видно, при варьировании U_0 и h_0 площадь зон загрязнения меняется от 0,01 до 3,5 км². Прослеживается общая тенденция, заключающаяся

ся в увеличении площади загрязнения с уменьшением вертикальных градиентов плотности и скорости течений. Средние значения $\max V$ для первого и второго типов стратификации равны 0,36 и 0,93 км² соответственно. При втором типе стратификации создаются более благоприятные условия для проникновения загрязненных вод в поверхностные слои моря (в 6 случаях из 12 зоны максимальных загрязнений располагаются в верхнем двухметровом слое).

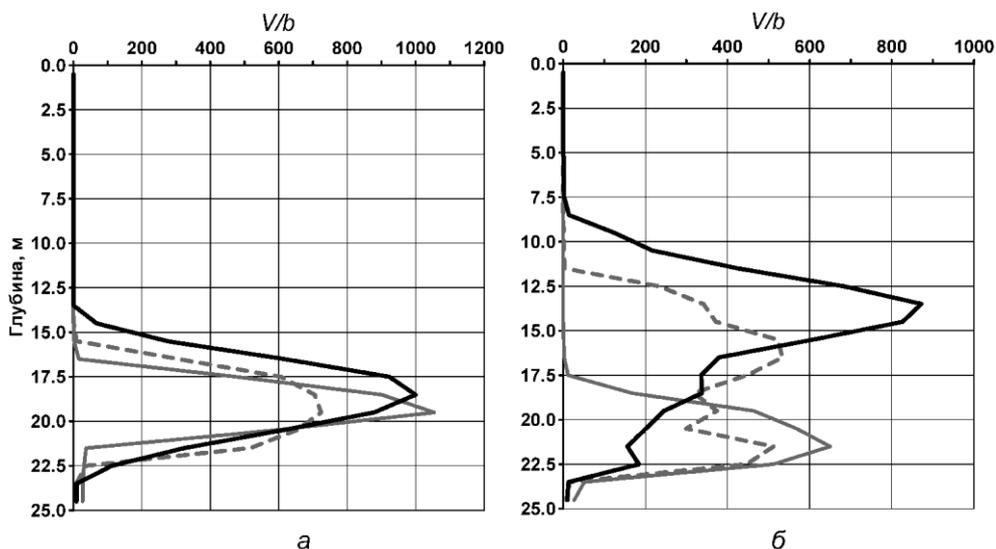


Рис. 4. Распределение по вертикали площади загрязнения при $h_0 = 25$ м для первого (а) и второго (б) типов стратификации при $t = 12$ ч. Соответствие цветов и типов линий такое же, как на рис. 2

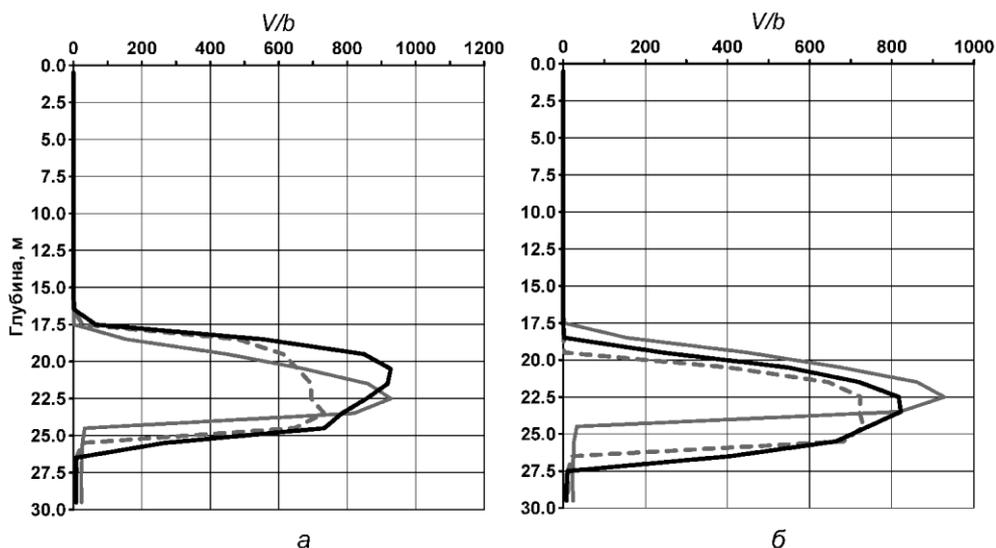


Рис. 5. Распределение по вертикали площади загрязнения при $h_0 = 30$ м для первого (а) и второго (б) типов стратификации при $t = 12$ ч. Соответствие цветов и типов линий такое же, как на рис. 2

Плотностная стратификация 20 мая 2016 г. Во втором цикле численных экспериментов (табл. 2) использовались профили $T_0(z)$ и $S_0(z)$, показанные на рис. 1 сплошными серыми линиями (далее – третий тип стратификации). Эти профили построены на основе данных зондирования над трассой подводного выпуска на станции глубиной ~ 30 м. Такой тип профилей по сравнению с рассмотренными выше характеризуется более слабой стратификацией (средняя величина N в слое 0 – 30 м равна 7,3 цикл/ч). Рассматриваемый случай представляет особый интерес, поскольку на этой станции было визуально обнаружено поверхностное пятно загрязненных вод размером $\sim 100 - 200$ м.

Т а б л и ц а 2

Максимальные площади зон загрязнения ($\max V$), глубины их залегания (z_{\max}) и поверхностные аномалии T и S для третьего типа стратификации при разных значениях U_0

h_0 , м	U_0 , м/с	$\max V$, км ²	z_{\max} , м	δT , °C	δS , ‰
30	0,010	0,83	7,5	-1,05	-0,12
30	0,025	0,85	7,5	-0,78	-0,08
30	0,050	0,41	8,5	-0,22	-0,01
30	0,075	0,30	13,5	-0,02	0,01

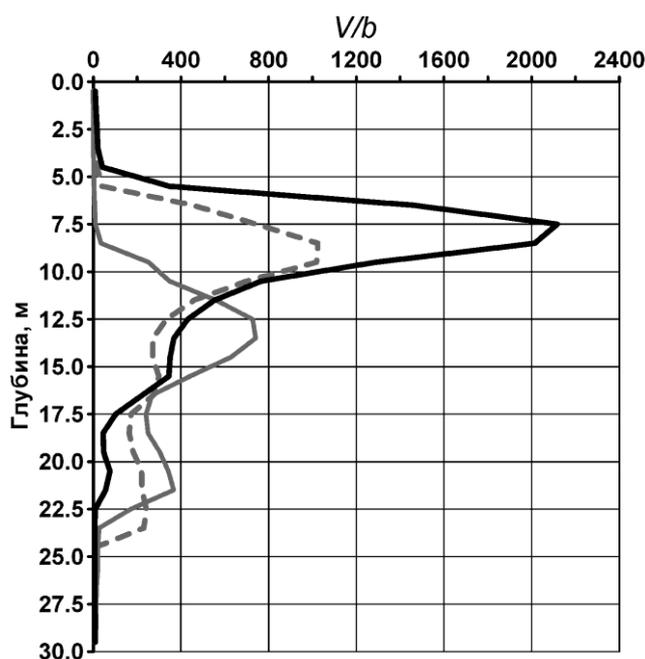


Рис. 6. Распределение по вертикали площади загрязнения при $h_0 = 30$ м для третьего типа стратификации при $t = 12$ ч. Соответствие цветов и типов линий такое же, как на рис. 2

На рис. 6 для третьего типа стратификации показано распределение V/b при $h_0 = 30$ м и трех значений U_0 . Кривые соответствуют моменту времени $t = 12$ ч. Как видно, при $U_0 = 0,025$ м/с наибольшему загрязнению подвержен слой 6 – 10 м. При U_0 , равном 0,050 и 0,075 м/с, площади загрязнения уменьшаются более чем в 2 раза по сравнению со случаем, когда $U_0 = 0,025$ м/с.

Выявлено, что ниже основного слоя загрязнения могут возникать еще и другие, менее выраженные слои. Так, при $U_0 = 0,075$ м/с наиболее загрязненными оказываются слои 12 – 15 и 20 – 22 м. Такое расщепление поля сточных вод по вертикали на несколько слоев является достаточно типичным явлением для прибрежных вод Крыма [2].

Как видно из табл. 2, площади зон загрязнения для третьего типа стратификации в среднем составляют $\sim 0,6$ км² при средней глубине залегания $\sim 9,3$ м.

Вертикальная структура поля загрязненных вод для третьего типа стратификации показана на рис. 7. Здесь даны изолинии функции $c(x, y_p, z, t)$ при $t = 12$ ч для трех значений U_0 . По горизонтальной координате отложена безразмерная величина x/d . Характерные особенности представленных полей – поднимающийся от подводного выпуска факел и струя, ориентированная вдоль направления фонового течения. С увеличением скорости фонового течения происходит опускание вершины факела, удлинение струи в продольном направлении и ее сжатие по вертикали за счет заглубления верхней границы на ~ 5 м.

Результаты моделирования показали, что по критерию $c \geq 5\%$ поперечный масштаб струи на расстоянии 1 км от источника может достигать ~ 500 м при $U_0 = 0,025$ м/с и 250 – 200 м при двух других значениях U_0 . Вид струи загрязненных вод на 6 характерных горизонтах при $U_0 = 0,050$ м/с показан на рис. 8. Струя хорошо прослеживается в слое 7,5 – 9,5 м и имеет здесь поперечный размер ~ 200 м. За пределами этого слоя происходит резкое сужение струи до 50 м и менее.

Следует отметить, что идентификация затопленных струй обычно проводится на основе серии вертикальных зондирований перпендикулярно направлению распространения струи [2]. При ее малых поперечных размерах такая методика не исключает «проскоков» осевого участка струи, что, вероятнее всего, и произошло 20 мая 2016 г. при измерении мутности вод в районе подводного выпуска.

Представляет интерес оценить величины поверхностных аномалий температуры и солёности воды с помощью соотношений

$$\delta T = \overline{T(x_p, y_p, 0, t)} - T_0(0), \quad \delta S = \overline{S(x_p, y_p, 0, t)} - S_0(0), \quad (16)$$

где черта сверху означает осреднение за период времени 12 ч.

Расчеты по формулам (16) показывают (табл. 2), что непосредственно над источником сброса загрязненных вод формируются отрицательные аномалии температуры и солёности, величины которых зависят от скорости фоновых течений. При $U_0 = 0,025$ м/с величина температурных аномалий достигает -1°C , аномалий солёности $-0,1\%$.

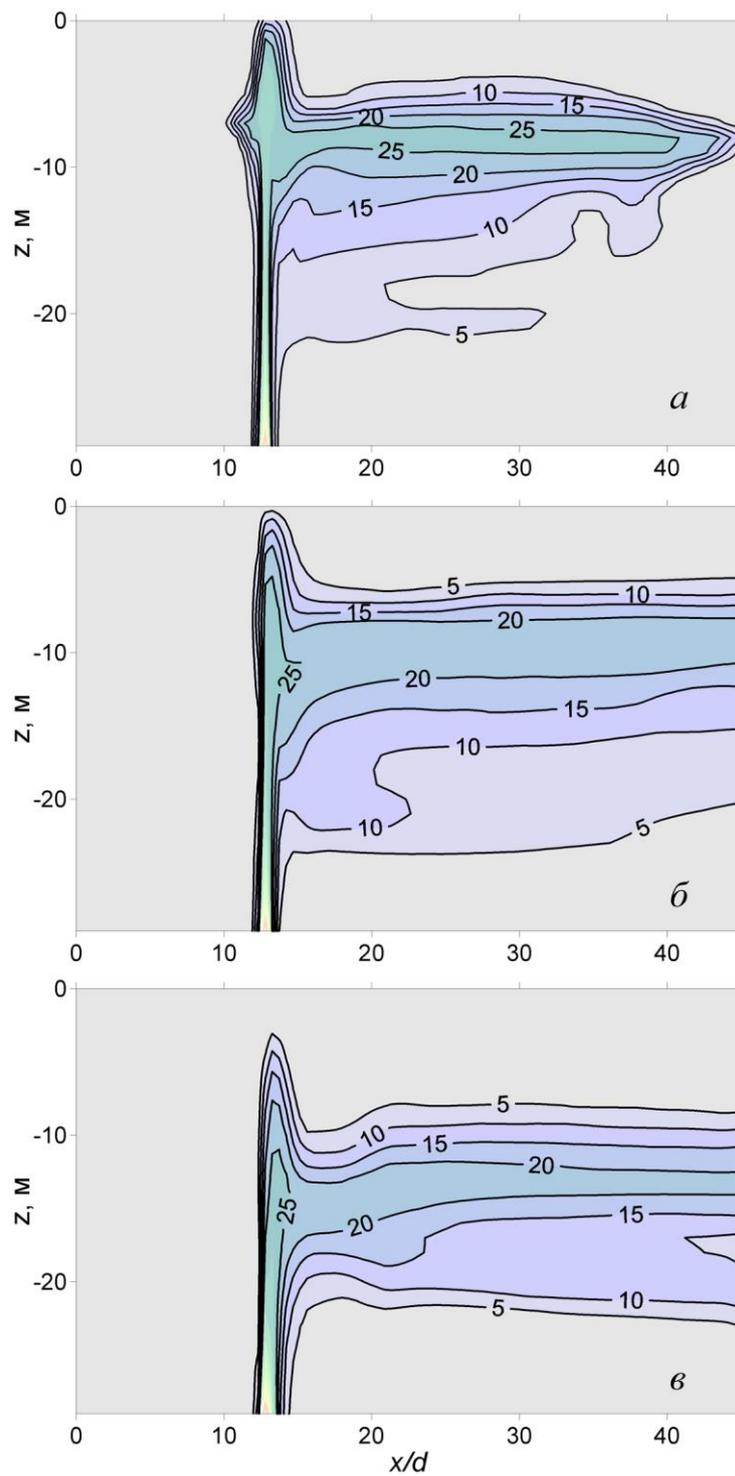


Рис. 7. Изолинии функции $c(x, y_p, z, t=12ч)$ для третьего типа стратификации: *a* – при $U_0 = 0,025$ м/с; *б* – при $U_0 = 0,050$ м/с; *в* – при $U_0 = 0,075$ м/с

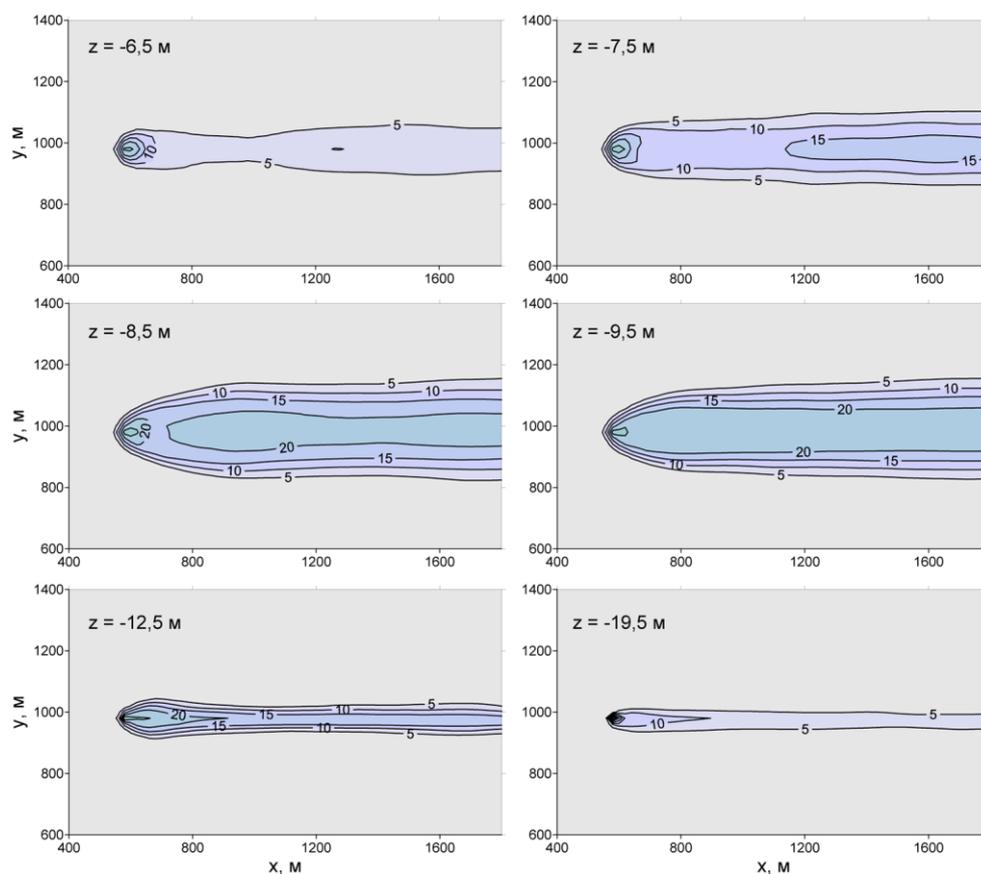


Рис. 8. Изолинии функции $c(x, y, z_{k+1/2}, t = 12 \text{ ч})$ для третьего типа стратификации при $U_0 = 0,050 \text{ м/с}$ и разных значениях k

Заключение. В работе рассматривается проблема распространения сточных вод в прибрежной зоне Гераклейского п-ова от подводного источника, имитирующего прорыв магистрали основного выпуска Севастополя.

На основе трехмерной численной модели выполнены расчеты начальной стадии распространения сточных вод для трех типов плотностной стратификации, полученных в рейсах НИС «Бирюза» в сентябре 2015 г. и мае 2016 г. Расход воды в источнике составлял $1,4 \text{ м}^3/\text{с}$. Эффект положительной плавучести в модели создавался за счет втекания пресной воды. Глубина источника h_0 изменялась в пределах $15 - 30 \text{ м}$, скорость фонового течения U_0 – в пределах $0,025 - 0,075 \text{ м/с}$.

Анализ результатов моделирования показал, что выход загрязненных вод на поверхность зависит как от особенностей плотностной стратификации, так и от значений U_0 и h_0 . Основная причина, препятствующая подъему загрязненных вод, – наличие выше источника слоев со скачками плотности.

Прослеживается общая тенденция, заключающаяся в увеличении площади загрязненных вод с уменьшением вертикальных градиентов плотности и скорости течений. Площадь областей загрязненных вод меняется в пределах $0,4 - 0,9 \text{ км}^2$.

Поле сточных вод вблизи источника состоит из факела и струи, ориентированной вдоль направления фонового течения. С увеличением U_0 происходит опускание вершины факела и заглубление струи с одновременным уменьшением ее поперечных размеров. В некоторых случаях возникает расщепление поля сточных вод по вертикали на два слоя.

На поверхности воды над источником формируются отрицательные аномалии температуры и солености, достигающие -1°C и $-0,1\%$.

Результаты работы могут быть использованы при интерпретации и планировании натуральных экспериментов по исследованию распространения сточных вод в районе Крымского п-ова.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0110).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В.* Дистанционная индикация антропогенных воздействий на морскую среду, вызванных заглубленными стоками: моделирование, эксперименты // Исследование Земли из космоса. – 2001. – № 6. – С. 49 – 67.
2. *Моделирование* процессов самоочищения вод шельфовой зоны моря / Под ред. Г.А. Гольдберга, В.И. Заца, Ж.М. Ациховской и др. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 230 с.
3. *Bondur V.* Complex satellite monitoring of coastal water areas // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment, June 20 – 24, 2005. – Saint Petersburg, 2005. – 7 p.
4. *Bondur V.G.* Satellite Monitoring and Mathematical Modelling of Deep Runoff Turbulent Jets in Coastal Water Areas // Waste Water - Evaluation and Management. – <http://www.intechopen.com>.
5. *Keeler R., Bondur V., Vithanage D.* Sea truth measurements for remote sensing of littoral water // Sea Technol. – April, 2004. – P. 53 – 58.
6. *Бондур В.Г., Филатов Н.Н., Гребенюк Ю.В. и др.* Исследования гидрофизических процессов при мониторинге антропогенных воздействий на прибрежные акватории (на примере бухты Мамала, о. Оаху, Гавайи) // Океанология. – 2007. – 47, № 6. – С. 827 – 846.
7. *Blumberg A., Ji Z., Ziegler C.* Modeling outfall plume behavior using far field circulation model // J. Hydraul. Engineer. – 1996. – 122, № 11. – P. 610 – 616.
8. *Zhang X., Adams E.* Prediction of near field plume characteristics using far field circulation model // Ibid. – 1999. – 125, № 3. – P. 233 – 241.
9. *Бондур В.Г., Журбас В.М., Гребенюк Ю.В.* Математическое моделирование турбулентных струй глубинных стоков в прибрежные акватории // Океанология. – 2006. – 46, № 6. – С. 805 – 820.
10. *Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Ежова Е.В. и др.* Поверхностные проявления внутренних волн, излучаемых заглубленной плавучей струей. Ч. 3. Поверхностные проявления внутренних волн // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2010. – 46, № 4. – С. 519 – 529.
11. *Совга Е.Е., Пасынков А.А., Андреева О.А.* Экологическое состояние прибрежно-морских районов Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2011. – Вып. 25. – С. 169 – 180.

12. *Иванов В.А., Фомин В.В.* Математическое моделирование динамических процессов в зоне море – суша. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2008. – 363 с.
13. *Фомин В.В., Полозок А.А., Фомина И.Н.* Моделирование циркуляции вод Азовского моря с учетом речного стока // *Морской гидрофизический журнал.* – 2015. – № 1. – С. 16 – 28.
14. *Михайлова Э.Н., Шаниро Н.Б.* Трехмерная негидростатическая модель субмаринной разгрузки в прибрежной зоне моря // Там же. – 2014. – № 4. – С. 28 – 50.
15. *Smagorinsky J.* General circulation experiments with primitive equations, I. The basic experiment // *Mon. Wea. Rev.* – 1963. – 91, № 3. – P. 99 – 164.
16. *Mellor G.L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // *Rev. Geophys. Space Phys.* – 1982. – 20, № 4. – P. 851 – 875.
17. *Фомин В.В.* Применение TVD-схем для численного моделирования фронтальных зон солености в мелком море // *Метеорология и гидрология.* – 2006. – № 2. – С. 59 – 68.
18. *Harten A.* On a class of high resolution total-variation-stable finite-difference schemes // *J. Numer. Analys.* – 1984. – 21, № 1. – P. 1 – 23.
19. *Морозов А.Н., Иванов В.А., Шутов С.А. и др.* Пространственная структура течений у Гераклеяского полуострова по данным ADCP наблюдений 2015 г. // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря.* – Севастополь: Морской гидрофизический институт РАН, 2016. – Вып. 1. – С. 73 – 79.

Numerical modeling of propagation of underwater runoff in the coastal zone of the Heraklean Peninsula

V.A. Ivanov, V.V. Fomin

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
e-mail: vaivanov@inbox.ru, fomin.dntmm@gmail.com*

The problem of waste water propagation from the underwater source over the Heraklean Peninsula coastal zone is studied based on the three-dimensional numerical model simulating a break on the Sevastopol major municipal sewage trunk line. The calculations are made for three types of density stratification obtained by R/V "Biryuza" in September, 2015 and May, 2016. The outlet depth varied from 15 to 30 m. It is revealed that the waste water rising to the surface depends on the features of density stratification. The basic reason preventing the polluted water rising is presence of the density drop layers above the outlet. The general trend consisting in increase of the polluted layers' area accompanied by weakening of density stratification and decrease of currents' velocities is observed. It is found that the waste water field close to the outlet consists of a torch and a jet oriented along the direction of the background current. The current velocity increase is followed by lowering of the torch top and sinking of the jet with simultaneous diminishing of its transverse size.

Keywords: coastal zone of the Crimea, waste water, underwater outlet, density stratification, numerical simulation.