

Математическое моделирование морских систем

УДК 551.468

А.И. Кубряков, М.А. Попов

Моделирование циркуляции и распространения загрязняющей примеси в Балаклавской бухте

Модель океанической циркуляции Принстонского университета адаптирована к акватории Балаклавской бухты для расчета полей течений. Расчеты проведены диагностическим методом с использованием данных гидрологической съемки в бухте в августе 1992 г. Анализируются структура поверхностных и придонных течений в рассматриваемый период, а также вертикальная и средняя по глубине циркуляции.

Полученные трехмерные поля течений используются для расчета распространения пассивной загрязняющей примеси от источников, расположенных на берегах Балаклавской бухты.

1. Введение. В системе севастопольских бухт Балаклавская бухта занимает особое место. Она значительно отличается от остальных бухт не только Севастополя, но и всего Черного моря. Бухта расположена между м. Айя и м. Фиолент. Прилегающая местность гористая и имеет высоты до 500 м над уровнем моря. По своим морфометрическим характеристикам — небольшая (до 200 м) ширина, большая (до 30 м) глубина, крутые высокие берега, извилистость, корытообразный поперечный профиль — она напоминает уменьшенный в десятки раз фьорд. Бухта защищена от ветро-волнового воздействия, а водообмен с открытым морем достаточно затруднен.

Нерациональное с точки зрения экологии и рекреации использование акватории и территории бухты привело к серьезным последствиям. Сброс неочищенных бытовых сточных вод, промышленные стоки, ливневая канализация, постоянные утечки нефтепродуктов с судов, базирующихся и ремонтирующихся в бухте, смыв с полей и поступление удобрений и пестицидов с водами р. Балаклавки отрицательно сказываются на качестве вод бухты. Некоторое снижение антропогенного пресса после вывода подводного флота положительно отразилось на экологическом состоянии бухты. Однако уровень загрязнения вод остается по-прежнему высоким. Он намного превышает предельно допустимую концентрацию и средние значения, характерные для открытых областей Черного моря, по различным показателям [1, 2].

Природно-климатические условия и географическое положение Балаклавской бухты открывают широкие возможности для развития курортно-рекреационного комплекса. В то же время это неминуемо приведет к возрастанию антропогенной нагрузки на морскую среду.

Экологическими аспектами, прежде всего, и определяется актуальность задачи диагноза циркуляции вод в различных частях Черного моря, примы-

кающих к густонаселенным районам, поскольку повышенное поступление техногенных примесей, обусловленных интенсификацией хозяйственной деятельности человека, диктует необходимость более детального описания гидродинамики этих районов для оценки и прогнозирования распространения загрязнений. Навигационная безопасность также требует хорошего знания циркуляционного режима в этих районах. Для Балаклавской бухты, являющейся одной из наиболее интенсивно эксплуатируемых морским флотом бухт на Крымском побережье, проблема обостряется в связи с большой вероятностью разливов нефти и нефтяных продуктов вследствие аварий на судах.

Кроме того, задача интересна с физической точки зрения, т. к. гидрологический режим в районах, подобных Балаклавской бухте, определяемый сложной конфигурацией береговой линии, топографией дна, водообменом с морем и атмосферным воздействием, приводит к тому, что этот район отличается от остальных регионов Черного моря ярко выраженной спецификой проявления многих природных процессов.

В настоящей работе представлены результаты диагностических расчетов скоростей течений в Балаклавской бухте и распространения от береговых источников загрязняющей примеси, выполненных на основе использования численной математической модели и данных гидрологической съемки.

Используемая в настоящей работе модель в σ -координатах, а также более тонкое пространственное разрешение позволили детализировать картину течений и выявить дополнительные особенности циркуляции вод в заливе.

2. Описание модели. Для расчетов использовалась модель океанической циркуляции Принстонского университета (*Princeton Ocean Model* — *POM*), подробно описанная в [3, 4]. Модель основана на полной системе уравнений термогидродинамики океана со свободной поверхностью в приближениях Буссинеска, гидростатики и несжимаемости жидкости. Вертикальная, направленная вверх, декартова z -координата преобразуется в σ -координату по формуле

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{H + \zeta} \quad (1)$$

так, что свободная поверхность моря $z = \zeta(x, y, t)$ представляется в преобразованных координатах поверхностью $\sigma = 0$, а рельеф морского дна $z = H(x, y)$ — поверхностью $\sigma = -1$, где x, y горизонтальные декартовы координаты, направленные на восток и север соответственно, t — время. Для параметризации вертикального перемешивания используется так называемая модель турбулентности с уровнем замыкания 2.5, основанная на гипотезах турбулентности Ротта – Колмогорова и обобщенная Меллором и Ямадой [5] на случай стратифицированного потока.

На поверхности моря ($\sigma = 0$) задается напряжение трения ветра

$$\frac{\rho_0 K_M}{H} \left(\frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) = (\tau_{sx}, \tau_{sy}), \quad (2)$$

где τ_{sx}, τ_{sy} — компоненты напряжения трения ветра; u, v — компоненты скорости течений вдоль осей x, y соответственно; ρ_0 — относительная плотность

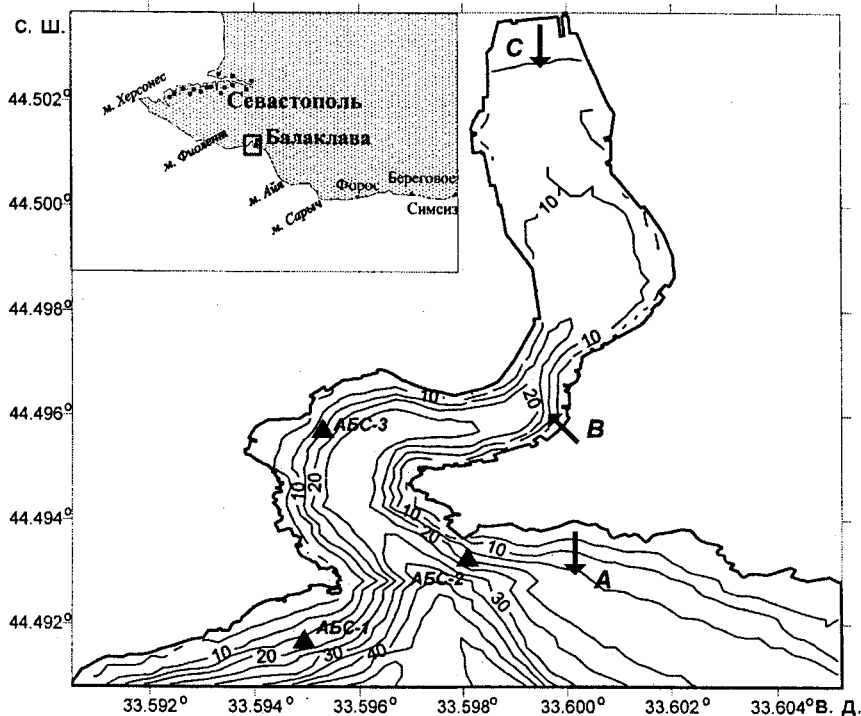
морской воды; H — глубина моря; K_M — коэффициент вертикальной турбулентной вязкости. На дне моря ($\sigma = -1$) используется аналогичное граничное условие с соответствующей заменой компонент напряжения трения ветра на $(\tau_{bx}, \tau_{by}) = \rho_0 C_D |\vec{V}_b| (u_b, v_b)$. Здесь коэффициент трения $C_D = \max \{k^2 [\ln(H + z_b)/z_0]^{-2}, 0.0025\}$ зависит от разрешения придонного пограничного слоя; z_b — глубина залегания ближайшего ко дну узла расчетной сетки, $\vec{V}_b$ — вектор скорости течений в этом узле, u_b, v_b — его компоненты; $k = 0,4$ — константа Кармана; z_0 — параметр шероховатости морского дна, принятый в настоящей работе равным 1 см.

Коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости принимается равным $A_M = 10^4$ см²/с, коэффициенты вертикальной турбулентной вязкости K_M и диффузии K_H находятся из модели турбулентного замыкания.

При конечно-разностной аппроксимации исходных уравнений модели используется сетка C по терминологии Аракавы [6]. Решение ищется отдельно для бароклинной и баротропной мод, по времени используется схема «че-харда». В конце каждого шага по времени для обеих мод применяется временной фильтр Айселина [7] во избежание расщепления решения во времени.

Расчет течений по описанной модели можно проводить различными методами: диагностическим, т. е. при заданном поле плотности, или различными модификациями адаптационного метода [8]. При этом использование адаптационного метода приводит к более согласованным полям температуры, солености и скорости. Однако применение этого метода к мелководным бассейнам, каким является Балаклавская бухта, приводит к сильному сглаживанию всех рассчитанных полей, при этом часто «исчезают» реально существующие мелкомасштабные особенности в этих полях [8, 9]. Поскольку в рассматриваемой бухте мелкомасштабные особенности могут быть достаточно важны при описании процессов переноса, в настоящей работе применялся диагностический метод.

На твердой боковой границе для скоростей потока использовалось условие свободного скольжения. Задание граничных условий на жидкой — открытой — границе, примыкающей к открытому морю, является наиболее сложной проблемой. В настоящей работе на южной открытой границе задавались составляющие скорости и полного потока, которые определялись интерполяцией по измеренным средним значениям скорости течений на автономных буйковых станциях АБС-1 и АБС-2 (рис. 1). При этом интерполяция проводилась таким образом, что полный расход через южную границу равнялся нулю. На достаточно малом участке открытой восточной границы задавались условие Зоммерфельда для нормальных составляющих скоростей бароклинной моды и условие равенства нулю для нормальных составляющих скоростей баротропной моды.



Р и с. 1. Рельеф дна (м) Балаклавской бухты (стрелками указаны места выброса загрязняющих веществ: А — выпуск сточных вод Балаклавы; В — ливневый сток; С — сточные воды завода «Металлист»; на врезке показано положение Балаклавской бухты на Крымском побережье)

Следует отметить, что модель *РОМ* успешно применялась и применяется для решения различных задач динамики моря, включая как исследования в эстуариях и шельфовых районах моря, так и общей циркуляции морей и океанов [10 – 16]. В нашем случае использование σ -координат оказалось весьма полезным, поскольку в заливе мелководные районы весьма тесно соседствуют с достаточно глубоководными.

3. Данные наблюдений. Для задания полей температуры и солености использовались данные гидрологической съемки, выполненной Институтом биологии южных морей НАН Украины (ИнБЮМ) 25 августа 1992 г. в рамках экологического мониторинга Балаклавской бухты, проводившегося совместно с Гидрографической службой Черноморского флота. Съемка производилась при помощи *CTD*-зонда «Катран» с борта мотобота «Вяземский».

Автономные буйковые станции были установлены с борта БГК-697 и приняты на борт НИС «Академик Ковалевский». Скорости течений регистрировались измерителями АЦИТ на горизонтах 5, 10 и 15 м. Данные были обработаны сотрудниками Гидрологического отряда войсковой части 90742 и переданы ИнБЮМ Гидрографической службой Черноморского флота согласно «Договору о творческом сотрудничестве». Эти данные в дальнейшем использовались для задания граничных условий и сопоставления с результатами расчетов.

4. Описание численных экспериментов. Для проведения расчетов область Балаклавской бухты от $44^{\circ}29,1'$ до $44^{\circ}30,2'$ с. ш. и от $33^{\circ}35,4'$ до $33^{\circ}36,3'$ в. д. была разбита на боксы переменных размеров, величина которых по горизонтали составляла примерно 16,5 м по долготе и 20 м по широте. По вертикали использовалось 6 уровней, соответствующих пятиметровому разрешению, нормированному на максимальную глубину, равную 50 м. Рельеф дна сглаживался так, чтобы отношение разности глубин в соседних боксах к их сумме не превышало величины 0,2. Минимальная глубина моря составляла 1 м. Для баротропной моды шаг по времени составлял 0,25 с, для бароклинной — 15 с.

Составляющие напряжения трения ветра в (2) вычислялись по формуле

$$(\tau_{sx}, \tau_{sy}) = \rho_a C_a |\bar{U}_a| (u_a, v_a),$$

где $\bar{U}_a$ — вектор скорости ветра с компонентами u_a, v_a вдоль осей x, y соответственно; ρ_a — плотность воздуха; $C_a = 1,4 \cdot 10^{-3}$.

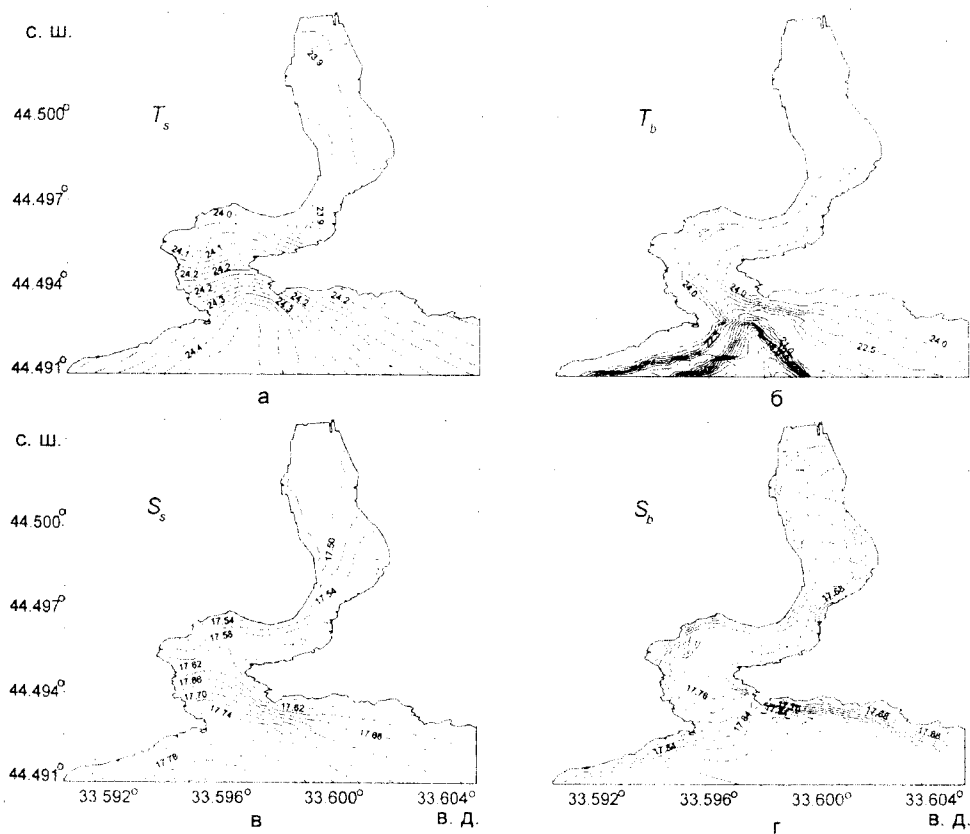


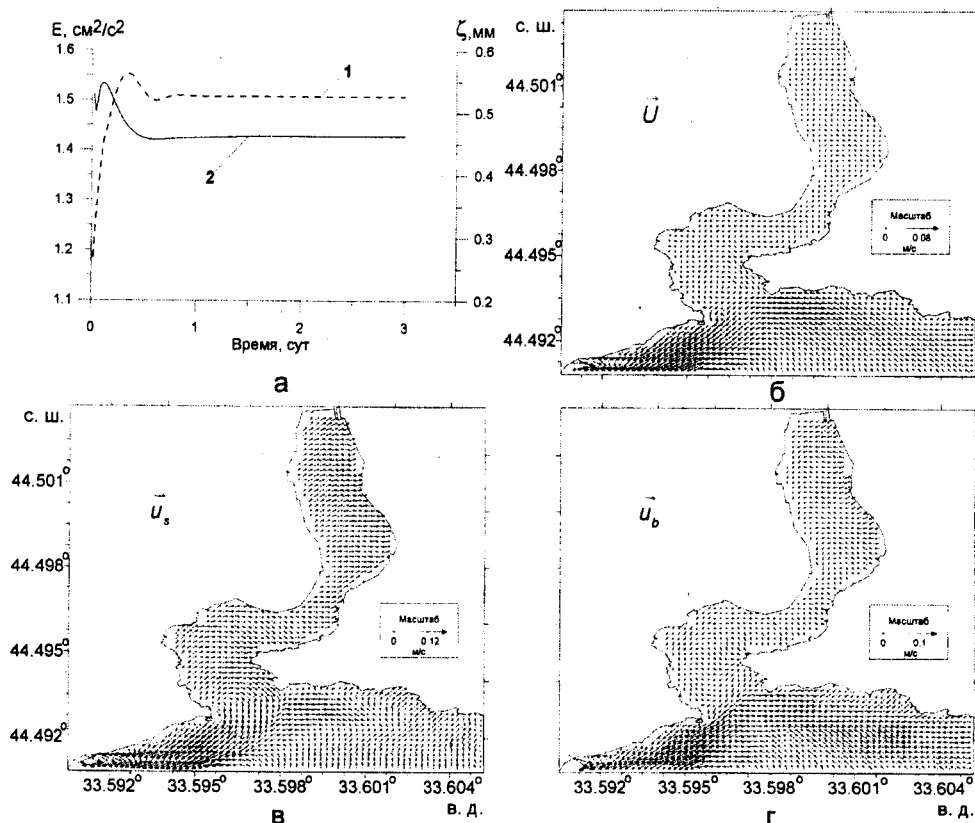
Рис. 2. Распределение температуры $T, ^{\circ}\text{C}$ и солености $S, \text{‰}$ в поверхностном (а, б) и придонном (в, г) слоях

Заданные в начальный момент времени поля температуры и солености, полученные интерполяцией измеренных значений в узлы расчетной сетки, оставались фиксированными. На рис. 2 приведено распределение температуры и солености в поверхностном (а, в) и придонном (б, г) слоях.

Проведенные численные эксперименты состояли из расчета квазистационарной циркуляции, возбуждаемой из состояния покоя заданным ветром, который ввиду малости акватории бухты предполагался однородным по площади. Составляющие скорости ветра во время съемки равнялись:

$$u_a = 0,64 \text{ м/с}, \quad v_a = 0,77 \text{ м/с}.$$

Достижение квазистационарного состояния контролировалось по уровню средней по объему бассейна кинетической энергии и среднего по площади уровня моря. Расчеты проводились на период времени 3 сут. Как показали проведенные численные эксперименты, циркуляция устанавливается практически через 2 сут расчетного времени (рис. 3, а). Далее приведены и анализируются результаты расчетов полей скорости течений на конечный момент времени.



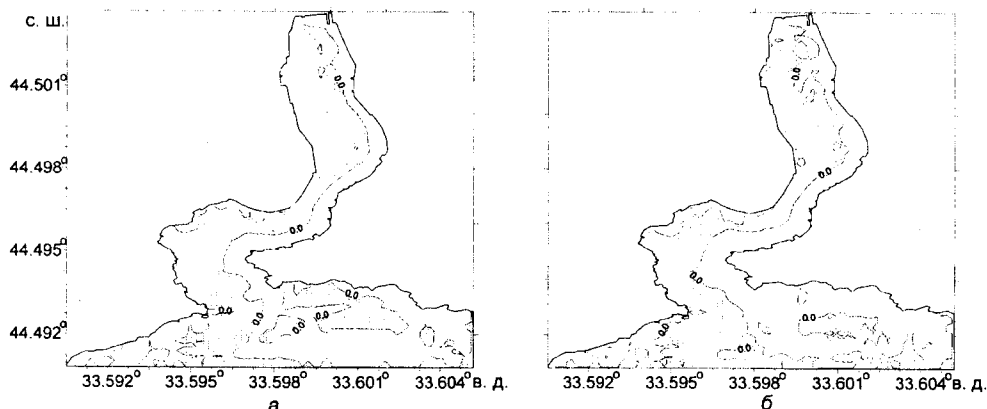
Р и с. 3. Изменение во времени средней по объему бассейна кинетической энергии E (кривая 1) и среднего по площади уровня моря ζ (кривая 2) (а), а также распределение средней по глубине скорости течений $\bar{U}$ (б), скорости течений в поверхностном слое $\bar{U}_s$ (в) и скорости течений в придонном слое $\bar{U}_b$ (г)

Горизонтальная циркуляция. На рис. 3, б приведено поле средней по глубине скорости течений $\bar{U}$. Видно, что в рассматриваемую область моря вода поступает через восточную границу и, в соответствии с заданными граничными условиями, через южную границу к востоку от 33, 597° в. д. Поступающие из открытого моря воды вдоль восточного побережья переносятся вплоть до входа собственно в бухту, где поток раздваивается. Большая его часть поворачивает на юго-запад и вдоль западного берега выносится в открытое море через южную границу области. Другая часть формирует у входа в бухту антициклонический круговорот. Далее воды в основном вдоль восточного берега текут в бухту, а вдоль западного — из бухты. Можно отметить наличие двух связанных круговоротов: циклонического круговорота непосредственно после максимальной узкости бухты и антициклонического к северу от него в районе 44,500° с. ш. В вершине бухты также наблюдается вихревой диполь: с антициклонической завихренностью на севере и циклонической — южнее. Максимальные значения средней скорости составляют приблизительно 0,06 м/с.

В поверхностном слое (рис. 3, в) в мелководной северной части бухты направление течений практически совпадает с направлением ветра и лишь слегка отклоняется вправо от него в более глубоких местах. В примыкающих к бухте глубоководных районах картина совсем иная. В восточной части вода течет через южную границу в бухту практически по нормали к границе, но примерно на широте 44,493° поворачивает на запад. У входа в бухту образуется интенсивный антициклонический круговорот, который, взаимодействуя с направленным на запад потоком, приводит к образованию протяженной зоны конвергенции. Максимальные скорости в поверхностном слое имеют место в западной прибрежной зоне у входа в бухту и достигают величины 0,12 м/с.

В придонном слое (рис. 3, г) в самой бухте течения направлены в противоположную сторону по сравнению с поверхностной циркуляцией. И на протяжении всей бухты вода вытекает из бухты вдоль западного берега. Зона конвергенции сместилась на северо-запад и располагается непосредственно у входа в бухту. И хотя в целом интенсивность придонной циркуляции существенно ниже поверхностной, в западной прибрежной зоне у входа в бухту наблюдаются сравнимые по величине скорости течений.

Вертикальная циркуляция. На рис. 4, а приведено распределение вертикальной скорости в приповерхностном слое, а на рис. 4, б — в ближайшем к придонному слою. Заштрихованные области показывают зоны подъема вод, а незаштрихованные — опускания. Видно, что распределения практически одинаковы, причем аналогичная картина имеет место по всей глубине бассейна. Вдоль всего западного берега широкой полосой тянется зона подъема вод. Вдоль восточного берега в самой бухте располагается зона опускания вод шириной примерно в два раза меньшей. В восточной части области открытого моря, примыкающей к бухте, также превалирует опускание вод, хотя наблюдается и небольшой участок зоны апвеллинга. Максимальная скорость подъема вод в приповерхностном слое равнялась $3,8 \cdot 10^{-3}$ м/с, опускания — $1,8 \cdot 10^{-3}$ м/с; в глубинном слое — $6 \cdot 10^{-3}$ и $4,5 \cdot 10^{-3}$ м/с соответственно.



Р и с. 4. Распределение вертикальной скорости в приповерхностном (а) и ближайшем к придонному (б) слоях (заштрихованная область — зона подъема вод, незаштрихованная — опускания)

Сопоставление с данными измерений. Как упоминалось выше, во время гидрологической съемки устанавливались автономные буйковые станции (рис. 1). Полученные модельные значения скоростей течений сравнивались с данными измерений на АБС. В таблице приведено сопоставление рассчитанных и измеренных составляющих средней по глубине скорости потока. Видно достаточно хорошее соответствие модельных и измеренных данных. Наибольшее расхождение имеет место для меридиональной составляющей на АБС-3. Однако, как отмечают авторы, проводившие обработку этих измерений [17], место постановки АБС-3 отличается весьма высокой степенью неустойчивости течений.

Измеренные и рассчитанные значения составляющих U и V средней по глубине скорости течений (см/с)

Номер АБС	U		V	
	эксперимент	модель	эксперимент	модель
1	-5,8	-2,2	-0,3	-0,6
2	-1,1	-0,8	0,3	0,03
3	0,32	0,06	1,27	-0,07

5. Распространение загрязняющей примеси. Полученные трехмерные поля течений использовались для расчета распространения пассивной загрязняющей примеси. На рис. 1 стрелками указаны места выброса загрязняющих веществ: A — выпуск сточных вод Балаклавы; B — ливневый сток; C — сточные воды завода «Металлист».

Процесс переноса загрязняющей примеси описывался следующим уравнением, выражающим изменение во времени и пространстве ее концентрации C :

$$\frac{\partial CD}{\partial t} + \frac{\partial CuD}{\partial x} + \frac{\partial CvD}{\partial y} + \frac{\partial C\omega}{\partial \sigma} = F_T + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_H}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right) + \mu C, \quad (3)$$

где $D \equiv H + \zeta$; C — концентрация загрязняющих веществ;

$F_T \equiv \frac{\partial}{\partial x} (A_H D \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_H D \frac{\partial C}{\partial y})$ — член, описывающий горизонтальную

турбулентную диффузию, $A_H = 100 \text{ см}^2/\text{с}$ — коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии; μ — коэффициент неконсервативности, учитывающий

изменение концентрации примеси вследствие химических и биологических превращений и в общем случае являющийся функцией координат и времени;

ω — трансформированная вертикальная скорость, физически являющаяся нормальной к σ -поверхности компонентой скорости течений. На поверхности и

на дне моря задается отсутствие потоков примеси $\frac{\partial C}{\partial \sigma} = 0$. На твердой боковой

границе задается нулевой нормальный поток примеси, так же как и на жидкой боковой границе в местах, где вода вытекает из области. В местах, где вода втекает в область, задается значение концентрации примеси C_{in} , которая имеется в поступающей жидкости; в нашем случае $C_{in} = 0$.

Следует отметить, что загрязняющие примеси, поступающие из трех вышеупомянутых источников, значительно отличаются друг от друга по своим химическим и физическим свойствам. И для описания переноса и трансформации каждой из них требуется решать свое уравнение вида (3) с соответствующим коэффициентом μ . Однако в данной работе ставилась цель лишь оценки степени и путей распространения загрязняющей примеси при существующей системе течений без детального описания трансформации примеси, обусловленной химическими и биологическими процессами и взаимодействием с окружающей средой. Таким образом, примесь предполагалась пассивной, и, исходя из этого, решалось одно уравнение (3), в котором коэффициент μ полагался равным нулю.

Численные эксперименты проводились следующим образом. По истечении 3 сут расчетного времени и получения установившейся циркуляции начинался собственно расчет переноса загрязняющей примеси: в каждой из точек выброса в трех боксах по вертикали задавалась начальная концентрация $C_0 = 1$, а в остальной части акватории $C_0 = 0$, и далее вместе с уравнениями модели считалось уравнение (3) на срок 1 сут, т. е. выброс предполагался импульсным. При конечно-разностной аппроксимации уравнения (3) использовалась схема первого порядка точности с направленными против потока разностями. Для уменьшения схемной вязкости применялась итеративная схема Смоларкевича [18] со специально определяемой антидиффузионной скоростью.

На рис. 5, а – г приведена конфигурация пятен примеси в поверхностном слое. Видно, что в вершине бухты от источника С примесь равномерно по всей акватории распространяется в южном направлении, что связано с мелководностью района и перемешивающим действием круговоротов, которые располагаются в вершине бухты (рис. 3, б).

На распространение пятен примеси от источников А и В сильное влияние оказывает вертикальная циркуляция. Так через 6 ч после выброса (рис. 5, а) пятно от источника В имеет не только относительно малые размеры, но и ма-

лую концентрацию примеси, что связано с интенсивным даунвеллингом у восточного берега бухты. В дальнейшем пятно, распространяясь на запад, попадает в зону апвеллинга и становится более насыщенным (рис. 5, б). Через 18 ч (рис. 5, в) оно, значительно расширившись, почти достигает крайней западной точки бухты. Через 24 ч (рис. 5, г) относительно высокие концентрации уже имеют место и у западного берега, что также связано с восходящим движением вод.

Пятно примеси от источника *A* в поверхностном слое через 6 ч после выброса (рис. 5, а) лишь незначительно вытянулось вдоль берега. Но уже через 12 ч (рис. 5, б) пятно не только полностью перекрывает вход в бухту, но и достигает южной границы области. Причем относительно высокие концентрации наблюдаются лишь на небольшом участке у западного берега уже вне бухты. В дальнейшем северная граница пятна продвигается в бухту, а южная находится вдали от места выброса. Через 24 ч (рис. 5, г) у западного берега в поверхностном слое концентрация пятна становится практически нулевой и пятно никак не связано с местом выброса.

В глубинном слое (рис. 5, д – з) пятно примеси от источника *C*, в отличие от поверхностного слоя, распространяется на юг не равномерно по всей ширине бухты, а более интенсивно вдоль обоих берегов.

Пятно примеси от источника *B* в глубинном слое через 6 ч после выброса (рис. 5, д), в отличие от поверхностного слоя, занимает гораздо большую площадь и имеет большую концентрацию, что также обусловлено вертикальной циркуляцией. В дальнейшем же (рис. 5, е – з) площадь пятна меньше, чем в поверхностном слое, но картины распространения примеси весьма схожи с поверхностным слоем.

Распространение примеси в глубинном слое от источника *A* разительно отличается от поверхностного слоя. Уже через 6 ч после выброса (рис. 5, д) пятно примеси перекрывает вход в бухту, причем почти во всем пятне имеет место относительно высокая концентрация. Через 12 ч (рис. 5, е) часов пятно вытягивается в юго-западном направлении, высокие концентрации наблюдаются вдоль всего западного берега области вне бухты и у входа в бухту. Через 18 ч (рис. 5, ж) концентрация в пятне падает, его северная граница продвигается вглубь бухты, а южная также приближается ко входу в бухту. Через 24 ч (рис. 5, з) вне бухты находится лишь узкая полоска примеси, а северная граница пятна почти соприкасается с пятном от источника *B*. Отметим, что в отличие от поверхностного слоя пятно не теряет связи с местом выброса.

Заключение. В результате проведенных расчетов получено поле скорости течений в Балаклавской бухте. Удовлетворительное качественное и количественное соответствие данных измерений результатам расчетов позволяет надеяться на достаточно правильное воспроизведение трехмерной картины циркуляции в бухте в целом. Следует отметить, что проведенный ранее анализ данных наблюдений [17, 19 – 21] также хорошо согласуется с полученными в настоящей работе результатами. Достаточно хорошее пространственное разрешение позволяет детально описать структуру течений в бухте в различных слоях.

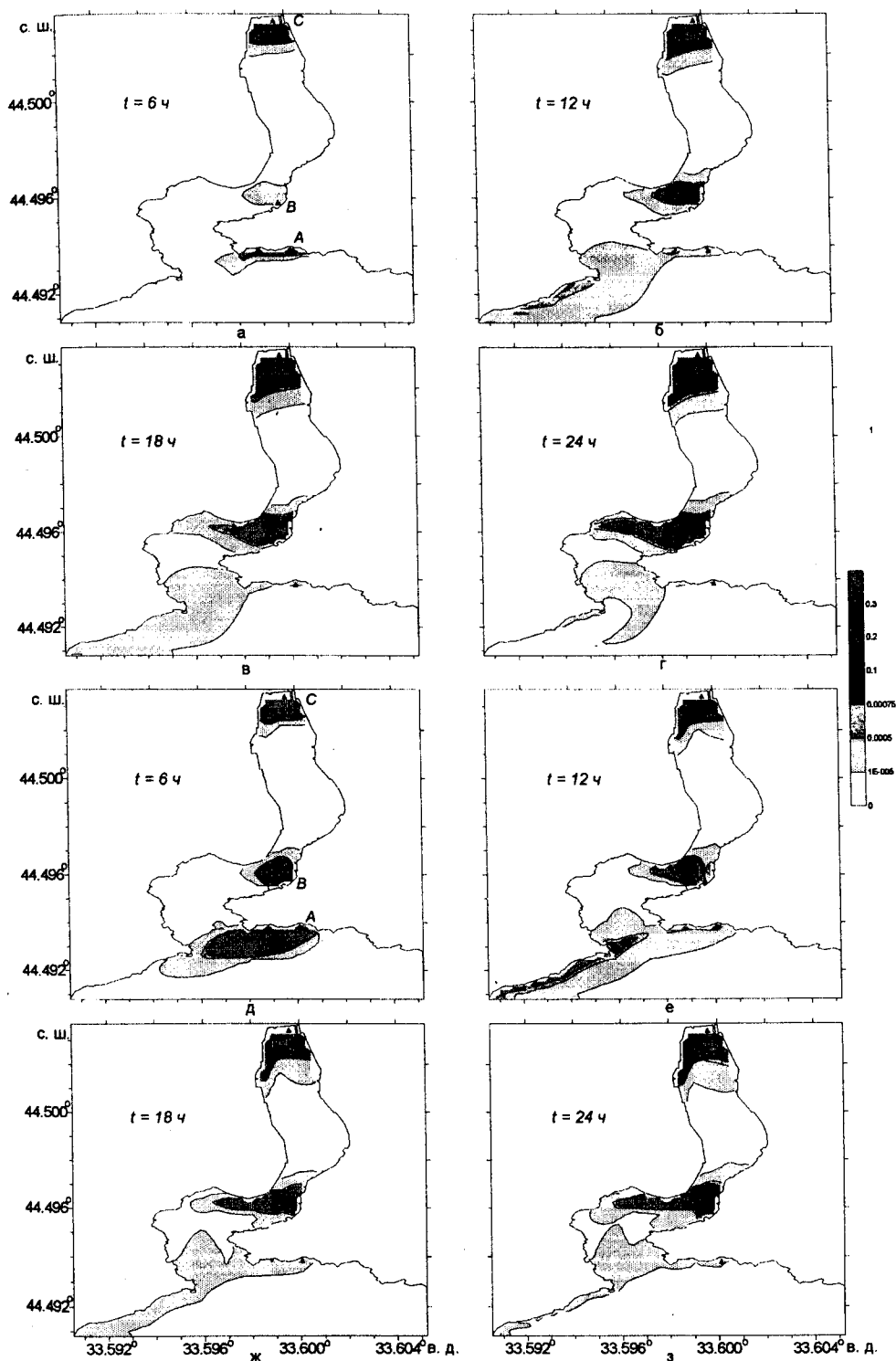


Рис. 5. Распределение концентрации загрязняющей примеси в разные моменты времени в поверхностном (а – в) и ближайшем к придонному (д – з) слоях (треугольниками обозначены места выброса)

К сожалению, авторам не удалось найти работы по моделированию циркуляции в Балаклавской бухте, поэтому здесь не проводится сопоставление с другими модельными расчетами.

Проведенные расчеты переноса течениями пассивной примеси позволяют оценить степень и пути распространения загрязнений из различных мест выброса, расположенных на берегах бухты.

Таким образом, выполненные расчеты циркуляции вод и адаптированная к условиям Балаклавской бухты модель *ROM* могут служить основой для исследования экологических последствий различного рода техногенных аварий и катастроф в бухте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковригина Н.П., Попов М.А., Лисицкая Е.В. и др. Оценка антропогенного воздействия и сгонно-нагонных явлений на экологическое состояние вод Балаклавской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Вып. 8. — Севастополь: МГИ НАН Украины, 2003. — С. 105 – 114.
2. Куфтаркова Е.А., Ковригина Н.П., Родионова Н.Ю. Гидрохимическая характеристика вод Балаклавской бухты и прилегающей к ней прибрежной части Черного моря // Гидробиол. журнал. — 1999. — 35, № 3. — С. 88 – 99.
3. Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of a three-dimensional coastal ocean model // Three-Dimensional Shelf Models, Coastal Estuarine Sci. V.5 / Ed. N. Heaps. — Washington, D. C.: AGU, 1987. — P. 1 – 16.
4. Mellor G. L. User's guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model // Report. Progr. Atmos. and Ocean. Sci. — Princeton: Princeton Univ., 1991. — № 3. — 35 p.
5. Mellor G. L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. — 1982. — 20. — P. 851 – 875.
6. Аракава А., Лэмб В.В. Вычислительные схемы для основных динамических процессов в глобальной циркуляционной модели Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе // Модели общей циркуляции атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1981. — С. 197 – 284.
7. Asselin R. A. Frequency filter for time integrations // Mon. Wea. Rev. — 1980. — 100. — P. 487 – 490.
8. Иванов В.А., Кубряков А.И., Любарцева С.П. и др. Моделирование гидрофизических процессов в морских прибрежных регионах // Морской гидрофизический журнал. — 2005. — № 2. — С. 8 – 29.
9. Иванов В.А., Кубряков А.И., Шапиро Н.Б. Термохалинная структура и динамика вод в Измирском заливе // Там же. — 1997. — № 4. — С. 47 – 63.
10. Blumberg A.F., Mellor G.L. Diagnostic and prognostic numerical circulation studies of the South Atlantic Bight // J. Geophys. Res. — 1983. — 88. — P. 4579 – 4592.
11. Oey L.Y., Mellor G.L., Hires R.I. A three-dimensional simulation of the Hudson-Raritan estuary. I. Description of the model and model simulations // J. Phys. Oceanogr. — 1985. — 15. — P. 1676 – 1692.
12. Zavatarelli M., Mellor G.L. The numerical study of the Mediterranean Sea circulation // J. Phys. Oceanogr. — 1995. — 25, № 6. — P. 1384 – 1414.
13. Oguz T., Malanotte-Rizzoli P., Aubrey D. Wind and thermohaline circulation of the Black Sea by yearly mean climatological forcing // J. Geophys. Res. — 1995. — 100. — P. 6845 – 6863.
14. Ezer T., Mellor G.L. Diagnostic and prognostic calculations of the North Atlantic circulation and sea level using a sigma coordinate ocean model // Ibid. — 1994. — 99. — P. 14159 – 14171.
15. Еремеев В.Н., Кубряков А.И., Щипцов А.А. Расчет распространения техногенного загрязнения у Южного берега Крыма в результате аварии в Ласпинской бухте // Глобальная система наблюдений Черного моря: фундаментальные и прикладные аспекты. — Севастополь: МГИ НАН Украины, 2000. — С. 45 – 55.
16. Иванов В.А., Кубряков А.И., Мубарак В. А.-М. Диагностический расчет циркуляции вод в Персидском заливе по данным наблюдений в 1992 г. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Вып. 3. — Севастополь: МГИ НАН Украины, 2001. — С. 159 – 167.

17. Ациховская Ж. М., Субботин А. А. Динамика вод Балаклавской бухты и прилегающей акватории Черного моря // *Экология моря*. — 2000. — Вып. 50. — С. 5 – 8.
18. Smolarkiewicz P.K. A fully multidimensional positive definite advection transport algorithm with small implicit diffusion // *J. Comput. Phys.* — 1984. — 54. — P. 325 – 362.
19. Зима В.В., Шаповалов Ю.И., Щетинин Ю.Т. Результаты опытной эксплуатации автономного гидрозонда МГИ-4117 // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. — Севастополь: МГИ НАН Украины, 2000. — С. 334 – 338.
20. Миронов О.Г., Кирюхина Л.Н., Алемов С.В. Комплексные экологические исследования Балаклавской бухты // *Экология моря*. — 1999. — Вып. 49. — С. 16 – 20.
21. Мезенцева И.В., Чайкина А.В., Клименко Н.П. Современный уровень загрязнения вод акватории Балаклавской бухты // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Вып. 8. — Севастополь: МГИ НАН Украины, 2003. — С. 115 – 118.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь
Институт биологии южных морей НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 12.11.03
После доработки 16.01.04

ABSTRACT The Princeton Ocean Model is adapted to the Balaklava bay to calculate the current field in it. The calculations are carried out by the diagnostic method using the data of the hydrological survey in August, 1992. The structure of surface and near-bottom currents, and also the vertical and the average over depth circulations during the examined period are analyzed.

The obtained three-dimensional current fields are used for calculating the propagation of passive contaminating impurity from the sources located on the Balaklava bay coast.