

Математическое моделирование морских систем

УДК 551.465

Э.Н. Михайлова, Н.Б. Шапиро

Моделирование циркуляции и пространственной структуры термохалинных полей в Севастопольской бухте с учетом реальных внешних данных (зима 1997 г.)

Обсуждаются результаты численного эксперимента по моделированию перестройки течений и трансформации температурного и солевого режимов Севастопольской бухты в январе и феврале 1997 г. В расчете используются реальные данные о скорости и направлении ветра, температуре поверхности моря, расходе р. Черной. Показано, что циркуляция и структура гидрологических полей главным образом связаны с направлением ветра, его интенсивностью и изменчивостью по времени. Течения в бухте вследствие ее мелководности перестраиваются достаточно быстро, менее чем за час после изменения ветра; термохалинные поля перестраиваются медленнее. За счет втекания пресных вод р. Черной и притока соленых вод открытого моря через пролив в бухте формируется неоднородная как по вертикали, так и по горизонтали структура термохалинных полей. При этом основную роль в формировании вертикальной стратификации, что естественно для зимнего сезона, играет распределение солёности. За счет распреснения возникает достаточно большой вертикальный градиент солёности в верхнем слое моря, так что выхолаживание не приводит к возникновению конвекции и образуются инверсии температуры, когда более теплая вода располагается в придонных слоях.

Для эффективной природоохранной деятельности в различных прибрежных акваториях в последнее время успешно применяются результаты, полученные с помощью математических моделей экологического состояния этих районов. Одним из важных и интересных районов является Севастопольская бухта. Основными факторами, определяющими естественные свойства вод в Севастопольской бухте, являются взаимодействие с атмосферой (теплообмен, осадки, испарение), распреснение водами р. Черной, втекающей в восточную часть бухты, и сточными водами, а также взаимодействие с водами открытого моря через пролив в западной части бухты, в частности, осолонение морскими водами, поступающими в бухту. В результате взаимодействия поступающих в бухту вод, их перемешивания за счет адвекции и турбулентной диффузии формируются трансформированные воды собственно бухты. Свойства этих вод и величина антропогенного влияния изменяются в зависимости от соотношения объемов поступающих в бухту пресных (речных, сточных, с осадками) и соленых (морских) вод. Изучение динамики и трансформации вод необходимо проводить в рамках модели экосистемы бухты, термогидродинамический блок которой должен описывать циркуляцию и термохалинную структуру вод в рассматриваемом районе. В работе [1] для описания циркуляции вод использовалась модель Фельзенбаума [2], т.е. баротропная линейная модель ветровых установившихся течений в однородном море без учета горизонтального обмена количеством движения. Вычисленные при этом скорости течения использовались для расчета распространения примеси при различных ветровых ситуациях

© Э.Н. Михайлова, Н.Б. Шапиро, 2005

[3]. Однако для изучения трансформации пространственных полей температуры и солености, т.е. теплового и солевого режимов бухты, необходимо привлекать более сложные термогидродинамические (бароклинные) нелинейные модели.

В 1997 – 1999 гг. в Севастопольской бухте проводились комплексные исследования [4,5]. Были получены достаточно подробные данные об атмосферных факторах (температуре воздуха, скорости и направлении ветра, осадках и т.п.), поверхностной температуре воды и уровне моря. Измерения (через 6 ч) выполнялись на гидрометеорологической станции «Севастополь», расположенной в «центре» бухты на м. Павловский. Также были получены данные о расходе втекающей в бухту р. Черной (ежесуточные). Кроме этого, проводились ежемесячные измерения температуры и солености на семи гидрологических станциях разреза от вершинной части бухты (вблизи устья р. Черной) до выхода из бухты (пролива). Полученные данные пригодны для использования их в граничных условиях при прогностическом моделировании, целью которого является воспроизведение реальной структуры гидрофизических полей в море по известным из наблюдений сведениям о внешних воздействиях. В работе [6] эти данные были использованы для воспроизведения вертикальной термохалинной структуры вод в Севастопольской бухте и ее изменчивости в рамках одномерного (проинтегрированного по горизонтали) варианта квазиизопикнической многослойной модели.

В настоящей работе для изучения пространственной структуры циркуляции и трансформации теплового и солевого режимов бухты используется трехмерная нелинейная термогидродинамическая модель [7], основанная на так называемых примитивных уравнениях динамики моря, т.е. на нелинейных уравнениях в приближениях Буссинеска и гидростатики.

На поверхности моря задаются не меняющиеся по горизонтали тангенциальное напряжение трения ветра, рассчитанное с учетом реальной скорости ветра, и температура воды по данным наблюдений (на первом этапе расчетов для упрощения подбора параметров модели). Принимается условие отсутствия потоков соли, выполняется кинематическое условие, т.е. поверхность моря является поверхностью тока (приближение «твердой крышки» при этом не используется). На дне принимаются условия обтекания с трением по квадратичному закону и отсутствия потоков тепла и соли.

На боковых твердых границах задаются условия прилипания и отсутствия потоков тепла и соли. На открытых границах скорости течения задаются (устье р. Черной) или отдельно рассчитываются (пролив, отделяющий бухту от открытого моря), задаются также температура и соленость втекающей в бухту воды; вытекает из бухты вода со своими температурой и соленостью. В устье р. Черной скорость втекания задается постоянной по глубине, а соленость берется равной нулю. Температура воды в р. Черной берется постоянной по глубине и рассчитывается в зависимости от разности между температурой воздуха над бухтой и температурой воды на поверхности. Если эта разность по модулю не превышает 2°C , то температура берется равной поверхностной температуре. Если разность больше 2°C , температура воды в реке задается на 2°C выше поверхностной температуры, и, наоборот, на 2°C ниже, если разность меньше 2°C .

На жидкой границе в проливе сначала (на каждом шаге по времени) вычисляется интегральный расход воды через пролив, нормальный к границе, как балансирующий расход р. Черной и изменение объема воды в бухте со временем; касательная компонента расхода полагается равной нулю. Осадки и испарение, из-за их относительной малости [6], не учитываются. Изменение объема воды вычисляется по изменению среднего по площади уровня моря, в качестве которого используется уровень, измеренный на гидрометеорологической станции «Севастополь» у м. Павловский. Такое предположение основано на том, что изменения уровня по горизонтали, вообще говоря, малы [1] и, по крайней мере, существенно меньше, чем изменения по времени. Далее вычисляется не меняющаяся по сечению пролива баротропная (средняя по глубине) скорость течения. После этого рассчитывается вертикальный профиль скорости течения из условия равенства нулю производной по нормали к границе от бароклинических компонент скорости (отклонений от баротропной скорости) течения. А именно, из значений скорости на соседней в зональном направлении внутренней вертикали вычитается средняя по глубине скорость, и скорость на открытой границе получается сложением рассчитанных величин и известной здесь средней скорости течения. Таким образом, вертикальный профиль скорости в проливе определяется течениями внутри бухты. Подчеркнем, что задание баротропной компоненты скорости течения на открытой жидкой границе с учетом известного из наблюдений среднего уровня является спецификой постановки данной задачи.

Вертикальный профиль температуры воды в открытом море (также принимается не меняющимся по сечению пролива) рассчитывается отдельно с помощью локально-одномерной модели диффузии тепла с заданной на поверхности изменяющейся со временем температурой воды и равным нулю потоком тепла через дно моря. При этом поверхностная температура воды в открытом море берется такой же, как и внутри бухты. Соленость вне пролива задается постоянной величиной, равной 18‰.

В начальный момент времени (0 ч 1 января 1997 г.) течения во всей области отсутствуют, температура и соленость постоянные и равны 8°C и 17,9‰ соответственно. Отметим, что используемые в расчете данные наблюдений изменяются скачкообразно с интервалом 6 ч или 1 сут в зависимости от частоты измерений.

Итак, моделируется район Севастопольской бухты к востоку от пролива до устья р. Черной с реальной топографией дна и конфигурацией берегов. Он состоит из основной, Севастопольской бухты и тесно связанной с ней Южной бухты. Область разбита на боксы, горизонтальные размеры которых составляют 62,5 м по долготе и широте. По вертикали сетка неравномерная. Горизонтальные составляющие скорости течения, температура и соленость вычисляются на горизонтах: 0,25; 0,75; 1,25; 1,75; 2,5; 4,5; 6,5; 8,5; 10,5; 12,5; 14,5; 16,5 м. Вертикальная составляющая скорости течения рассчитывается для глубин, расположенных посередине между указанными горизонтами. Минимальная глубина моря принимается 1,3 м.

Эксперименты показали, что схема получается устойчивой и результаты реальными, когда коэффициент вертикального обмена количеством движения A_z (см²/с) задается переменным по горизонтали и пропорциональным скорости ветра и глубине моря по формуле для «мелкого» моря [2], а именно $A_z = 0,54HW$, где H — глубина моря (м) и W — скорость ветра (м/с). Коэффициент

горизонтальной вязкости принимается постоянным $A_l = 10^2 \text{ см}^2/\text{с}$. Коэффициент вертикальной диффузии тепла и соли взят постоянным $\mu = 1 \text{ см}^2/\text{с}$, коэффициенты горизонтальной диффузии из соображений устойчивости схемы берутся равными нулю.

В рамках описанного подхода проведен численный эксперимент по расчету циркуляции и термохалинных полей в Севастопольской бухте в январе и феврале 1997 г. Этот эксперимент — начальный этап в работе, целью которой является разработка математической прогностической модели циркуляции в Севастопольской бухте, позволяющей количественно точно воспроизводить реальную трехмерную структуру гидрофизических полей в море по известным из наблюдений данным о внешних воздействиях. Поэтапная стратегия расчетов принята в связи с тем, что такие численные эксперименты требуют больших технических и временных ресурсов, и при этом неизмеримо возрастает объем информации для анализа результатов расчетов. Анализ результатов этого численного эксперимента позволяет получить представление об эволюции циркуляции и сопутствующей перестройке гидрологических полей (в основном поля солёности) в зимний сезон в зависимости от направления ветра, его интенсивности и изменчивости.

Вследствие мелководности района течения перестраиваются достаточно быстро после изменения ветра. Поля температуры и солёности перестраиваются медленнее. Однако уже к 15 января в бухте формируется существенно неоднородная структура термохалинных полей, в основном за счет втекания пресных вод р. Черной, а также притока соленых вод через пролив в западной части бухты. При этом главную роль в формировании вертикальной стратификации, что естественно для зимнего сезона, играет солёность. За счет распреснения возникает достаточно большой вертикальный градиент солёности в верхнем слое моря, так что выхолаживание не приводит к возникновению конвекции и образуется инверсия температуры, т. е. более теплая вода располагается в глубинных слоях у дна.

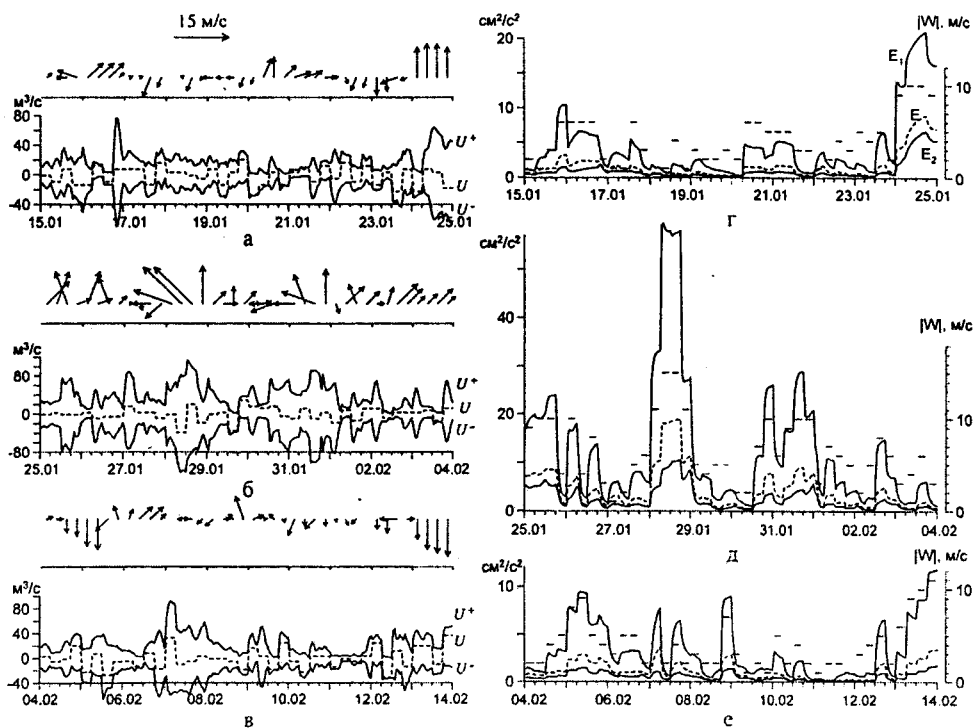
Особенности циркуляции и пространственной термохалинной структуры в рассматриваемый интервал времени с 16 января до 14 февраля 1997 г. тесно связаны с действием ветра и его изменчивостью. О характере изменчивости ветра в этот период можно судить по рис. 1, а – в, где вверху приведен временной ряд векторов скорости ветра. Видно, что ветер менялся достаточно сильно как по направлению, так и по интенсивности. В нижней половине рисунков штриховой линией обозначен временной ход вычисленного по данным наблюдений суммарного расхода воды U через пролив. Пресноводный сток р. Черной в рассматриваемый промежуток времени был достаточно стабильным и менялся в пределах $1 - 1,5 \text{ м}^3/\text{с}$. Сильно меняющийся по величине и направлению расход воды через пролив обусловлен колебаниями среднего по площади уровня воды в бухте. Они составляли до $7 - 9 \text{ см}$ за 6 ч (смещение уровня на 1 см за 6 ч соответствует расходу около $4 \text{ м}^3/\text{с}$). Сплошными линиями на рисунках обозначен временной ход рассчитанных в численном эксперименте расходов через сечение в проливе: «положительного»

$$U^+ = \int (u_n + |u_n|) dy dz / 2,$$

направленного в бухту течения, и «отрицательного»

$$U^- = \int (u_n - |u_n|) dy dz / 2,$$

направленного из бухты в открытое море. Здесь u_n — нормальная к границе компонента скорости. В большинстве случаев эти расходы превышают суммарный, интегральный расход $U = U^+ + U^-$, что свидетельствует об изменчивости скорости с глубиной.



Р и с. 1. Временной ряд векторов скорости ветра с интервалом 6 ч (направление на север — вверх, на восток — вправо) — (вверху), временной ход полученного из данных наблюдений суммарного расхода U воды через пролив и рассчитанных «положительного» расхода U^+ , направленного в бухту, и «отрицательного» U^- , направленного из бухты, — (внизу) 16.01 – 25.01.1997 г. (а), 26.01 – 04.02.1997 г. (б), 05.02 – 14.02.1997 г. (в); а также временной ход средней по площади кинетической энергии на горизонтах 0,75 м E_1 и 6,5 м E_2 , средней по объему кинетической энергии E и модуля скорости ветра $|W|$ (горизонтальные штрихи) 16.01 – 25.01.1997 г. (г), 26.01 – 04.02.1997 г. (д), 05.02 – 14.02.1997 г. (е)

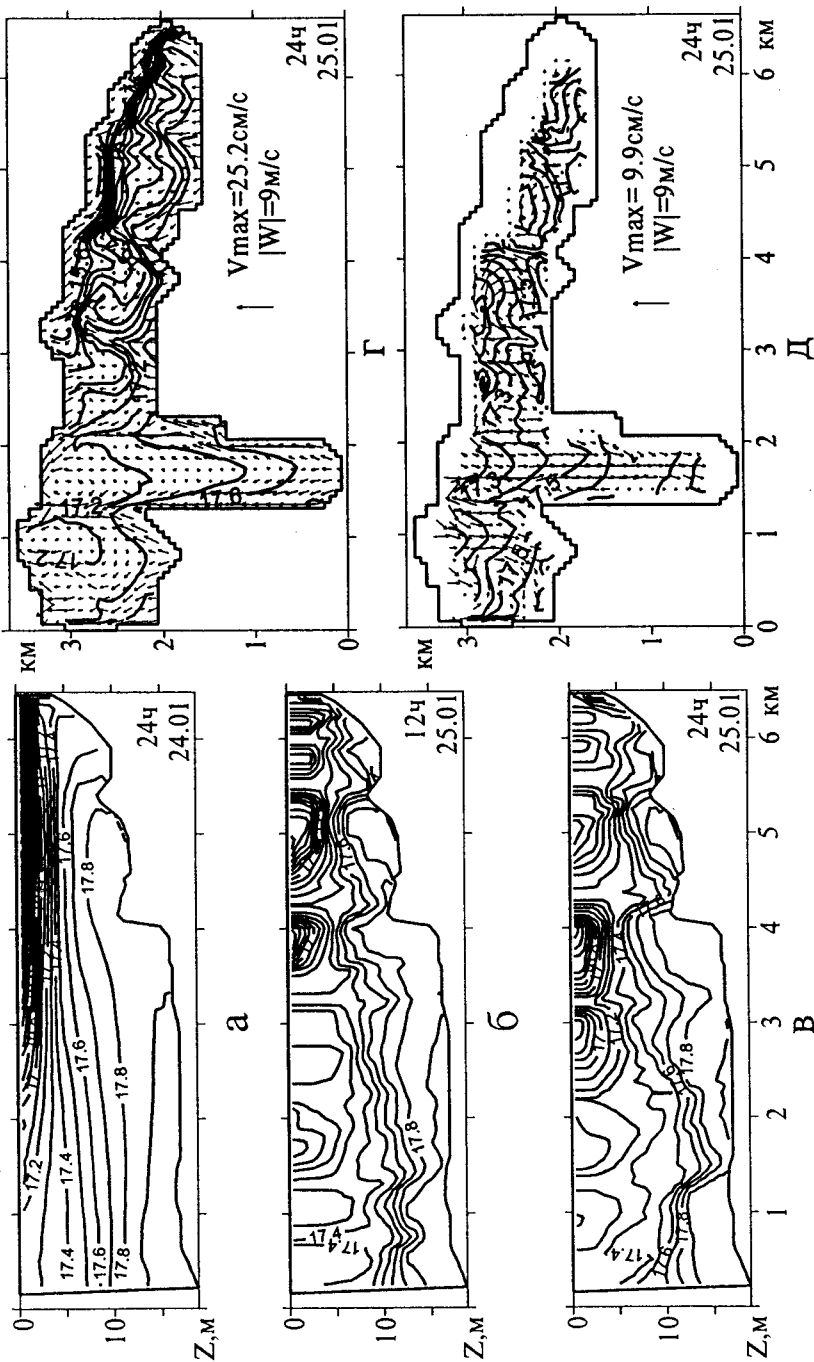
Видно, что перестройка течений в проливе происходит при каждом изменении внешних факторов (именно для выяснения этого и было взято скачкообразное их изменение), что говорит о достаточно быстрой (за промежуток времени порядка часа) подстройке течений к внешним факторам. Можно отметить, что вертикальная изменчивость профиля скорости увеличивается с усилением ветра, особенно южных и восточных румбов (например, 25 и 29 января, 1 февраля). Увеличение изменчивости происходит также при достаточно резком затухании ветров северного и западного направлений (скачок вечером

17 января; ситуация 8 февраля, когда юго-западный ветер сменился ветром восточного направления).

Циркуляция внутри бухты тоже существенно перестраивается при перестройке внешних факторов. На рис. 1, *г* – *е* приведены графики временного хода кинетической энергии, средней по площади на глубинах 0,75 м E_1 и 6,5 м E_2 , а также средней по объему E . Там же приведены графики временного хода модуля скорости ветра. Видно, что циркуляция в целом, которую характеризует энергия, быстро (за промежуток времени порядка часа) перестраивается при изменении скорости и направления ветра. При этом в большой степени интенсивность циркуляции в бухте связана с направлением ветра. Резко возрастает энергия при южных и особенно юго-восточных ветрах. Так, например, 25 января и 14 февраля целый день дули достаточно интенсивные ветры одного направления, в первом случае южный ветер (около 10 м/с), а во втором — северный (6 – 11 м/с). Однако в первом случае кинетическая энергия в поверхностном слое больше в два раза, а средняя по объему даже в три раза, чем во втором.

Рассмотрим подробнее эволюцию циркуляции и поля солёности в этих двух ситуациях. В обоих случаях непосредственно перед возникновением сильного ветра происходило затухание энергии и соответственно течений. Предшествующая структура солёности была достаточно гладкой и примерно одинаковой. Расположенный в поверхностном слое язык распресненных вод в районе устья р. Черной был смещен к южному берегу бухты, причем в первом случае он достигал Южной бухты и у входа в нее образовывал пятно относительно пресной воды. Верхняя граница придонного слоя воды солёностью больше 17,6‰ поднималась в направлении с запада на восток. На глубине 6,5 м горизонтальные градиенты солёности были малы.

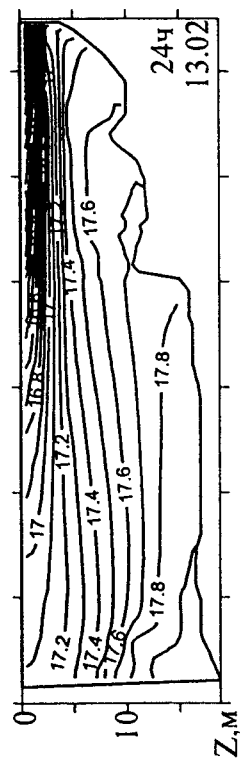
На рис. 2 приведены распределения солёности на разрезе вдоль бухты (от устья р. Черной на востоке до центральной части пролива на западе) в 24 ч 24 января, в 12 и 24 ч 25 января. Также приведены распределения солёности и векторов скорости течения V (см/с) на поверхности моря и на глубине 6,5 м. Смена довольно слабого северо-восточного ветра, дующего вечером 24 января, сильным южным ветром привела к усилению течений и к их полной перестройке за относительно короткий срок. Общая картина циркуляции далее сохраняла свою качественную структуру при сохранении направления ветра. Отличительной особенностью циркуляции (интегральной) в этой ситуации явилось формирование системы круговоротов в бухте. Течения на поверхности в основном были направлены на север. На горизонте 6,5 м практически сразу возник довольно интенсивный поток на юг в центральной части Южной бухты. На поверхности наличие круговоротов проявилось в том, что интенсивные течения у восточного и западного берегов Южной бухты пересекли основную бухту и достигли ее северного берега, а также возникли локальные интенсификации меридиональных течений, обусловленные локальными особенностями конфигурации береговой линии. На глубине 6,5 м достаточно быстро у входа в Южную бухту возникла система круговоротов, которые усиливались, и со временем возникли круговороты восточнее и западнее этого района. Источником генерации более слабых вихревых движений явился также район сужения фарватера в восточной части бухты. К концу суток вдоль бухты можно видеть до 12 круговоротов различной ориентации и интенсивности.



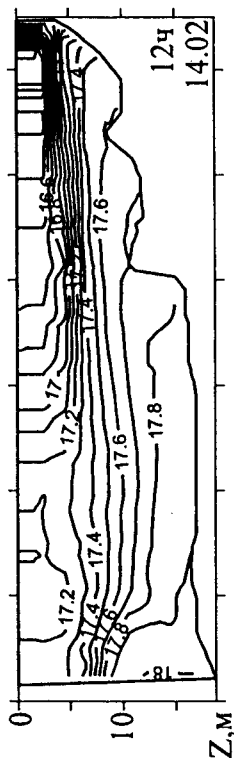
Р и с. 2. Распределения солёности (‰) на зонально-вертикальном разрезе (от устья р. Черной на востоке до центральной части пролива на западе) в 24 ч 24 января (а), 12 ч 25 января (б) и 24 ч 25 января (в), а также распределения солёности и векторов скорости течения V (см/с) на поверхности моря (г) и на глубине 6,5 м (д) в 24 ч 25 января при сильном южном ветре

Такая структура циркуляции обусловила специфическую перестройку термохалинных полей. Под действием южного ветра распресненные воды от южного берега сместились в центральную часть бухты, при этом они заместились выносимыми апвеллингом глубинными солеными водами. Из-за неравномерного характера течений эти соленые воды на поверхности проникли местами практически до северного берега, и между языками соленых вод расположились пятна распресненных вод. Наиболее протяженное в меридиональном направлении пятно появилось в районе Южной бухты. Таким образом, в центральной части бухты возникли довольно глубокие приповерхностные линзы распресненной воды. В целом распреснение захватывает слой толщиной примерно 5 – 10 м, а ниже возникает галоклин, который местами заглубляется практически до дна. Придонный слой с соленостью, большей 17,6‰, также разбивается на ряд линз вдоль оси бухты. На глубине 6,5 м возникли значительные градиенты солености из-за подъема у южного берега более соленых вод и появления в северной половине менее соленых вод, опустившихся с поверхности. По-видимому, в формировании пространственной структуры поля солености наряду с адвекцией играли определенную роль и локальные процессы конвекции в языках соленой воды, приносимых вихревыми образованиями, при ослаблении устойчивости стратификации (в модели учитывается процедура конвективного приспособления при появлении неустойчивой стратификации по плотности). Характер изолиний температуры в целом такой же, как у изолиний солености. При этом, как уже говорилось выше, более теплая вода находится в глубинных слоях и, как правило, там же, где и максимальная соленость. В целом градиенты температуры хоть и незначительные, все время имели место.

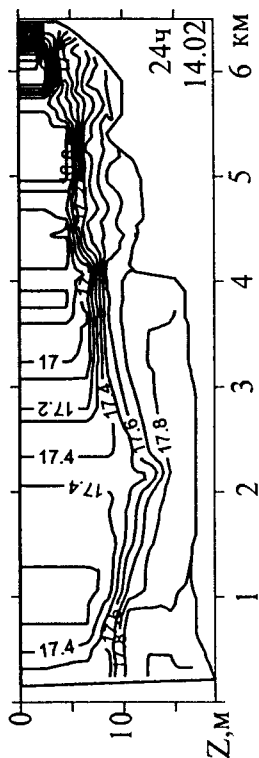
На рис. 3 приведены распределения тех же полей, что на рис. 2, на 13 и 14 февраля. Действие сильного северного ветра привело к быстрому усилению течений. Течения на поверхности в основном были направлены на юг с интенсификацией у восточного и западного берегов Южной бухты; их структура со временем не менялась. В этом случае пространственная неоднородность циркуляции (интегральной) менее выражена, чем в случае южного ветра. Однако на поверхности моря также можно отметить несколько локальных интенсификаций меридиональных течений, обусловленных локальными особенностями конфигурации береговой линии и рельефа дна. На горизонте 6,5 м возникло северное течение в центральной части Южной бухты. Со временем несколько усилились течения, направленные на север, и в основной бухте. В районе сужения фарватера в восточной части основной бухты усилилось течение, направленное на запад. Можно отметить, что скорости течения в этом случае оказались меньшими, чем в случае южного ветра, и гораздо быстрее затухали в глубинных слоях. Интересно, что при этом ветре не возникли движения вихревого характера.



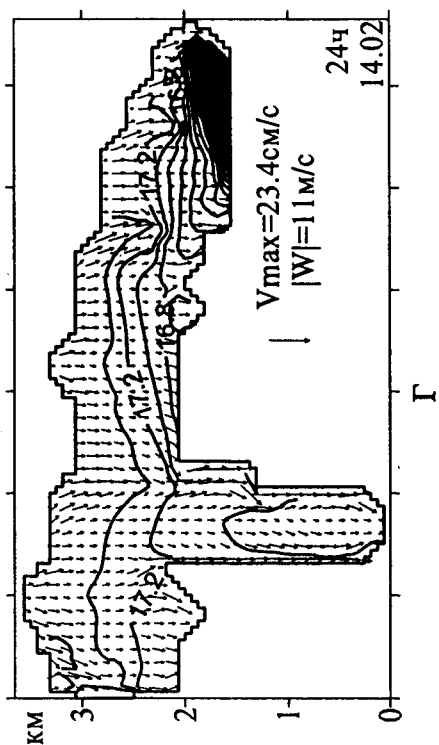
а



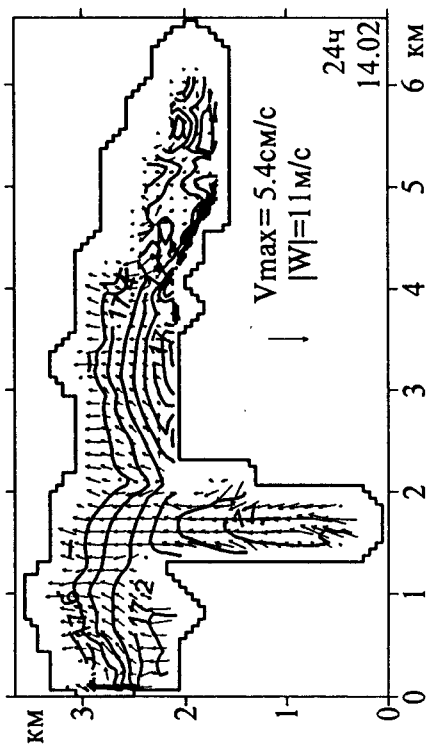
б



в

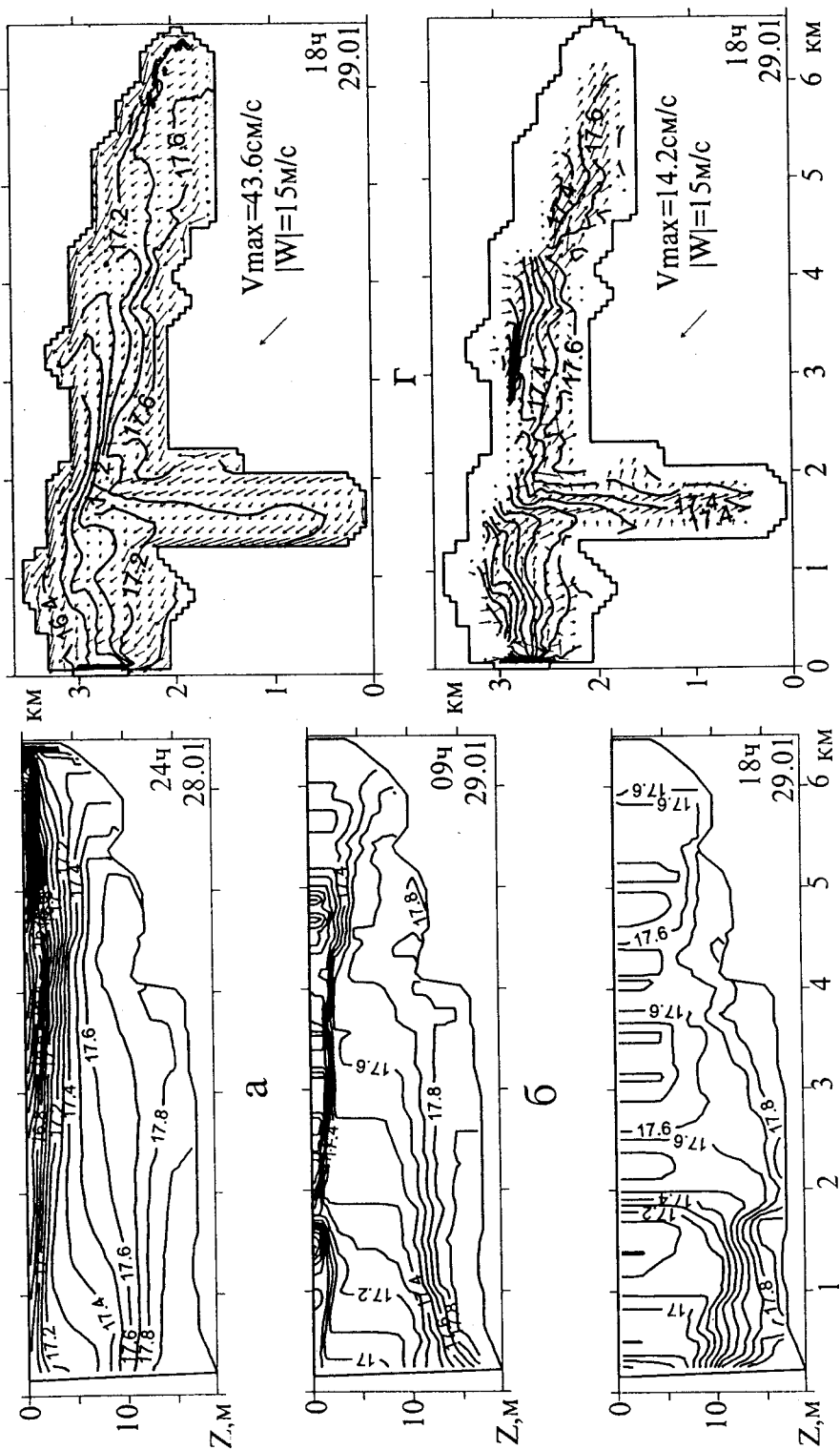


г



д

Р и с. 3. То же, что на рис. 2, только в 24 ч 13 февраля (а), 12 ч 14 февраля (б) и 24 ч 14 февраля (в, д) при сильном северном ветре



Р и с. 4. То же, что на рис. 2, только в 24 ч 28 января (а), 9 ч 29 января (б) и 18 ч 29 января (в, г) при сильном юго-восточном ветре

Поверхностные распресненные воды сместились течениями в юго-восточную часть бухты, а около северного берега апвеллинг вынес на поверхность более соленые глубинные воды. Структура поля солености вдоль разреза от пролива до устья р. Черной перестраивалась следующим образом. Поверхностные течения принесли сюда более соленые воды с севера, из-за чего устойчивость стратификации ослабла, что привело к конвективному перемешиванию. В результате у поверхности моря со временем образовался квазиоднородный слой толщиной 5 – 10 м с максимальной толщиной в западной половине основной бухты, особенно на траверзе Южной бухты. В этом отличие от случая южного ветра, когда конвекция возникала локально, только в языках соленой воды, приносимых вихревыми движениями. На глубине 6,5 м также со временем усилились градиенты солености (несколько более слабые, но более упорядоченные, чем в случае южного ветра). У северного берега из-за апвеллинга вода становилась более соленой, а на юге — менее соленой за счет опускания вод. Температура в случае северного ветра вела себя не так, как соленость. Поверхностные направленные на юг течения принесли в центральную часть бухты более теплые, поднявшиеся за счет апвеллинга у северного берега, воды, так что вода с минимальной температурой оказалась под поверхностью — образовался как бы холодный промежуточный слой. Процессы конвекции привели к заглублению (до 10 м) этого слоя, он сохранялся до конца суток.

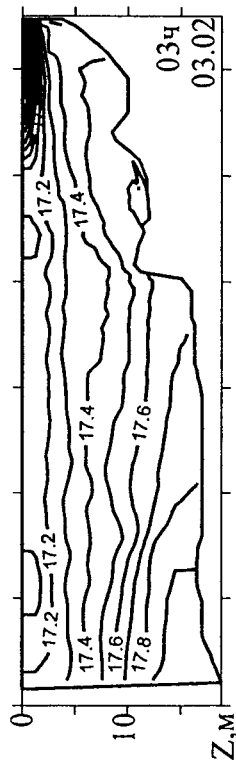
Как видно на рис. 1, наиболее интенсивная циркуляция возникла 29 января при сильном (11 – 15 м/с) юго-восточном ветре продолжительностью около 18 ч. На рис. 4 приведены распределения полей в рассматриваемый промежуток времени. К концу предшествующих суток под действием северо-восточного ветра (6 м/с) сформировалась нестандартная структура поля солености. Практически весь поверхностный слой в бухте был заполнен распресненными водами. В восточной половине бухты воды с минимальной соленостью находились около южного берега, при этом наблюдался достаточно большой до 2‰ перепад солености к северному берегу. В западной половине бухты воды минимальной солености располагались у входа в Южную бухту и в прилегающей к ней области. Воды с максимальной соленостью находились у северо-западного края основной бухты и вдоль восточного берега Южной бухты. На глубине 6,5 м соленость слабо возрастала в восточном направлении, при этом в Южной бухте также была более соленая вода.

Интенсивность циркуляции была относительно небольшая. На поверхности бухты наиболее интенсивные течения (до 17 см/с) располагались около берегов и были направлены в зависимости от ориентации береговой линии на запад или на юг. На глубине 6,5 м поток, направленный в Южной бухте на север, в основной бухте разворачивался и сливался с течением, направленным на восток в ее центральной части; скорость течения на этой глубине не превышала 4 см/с.

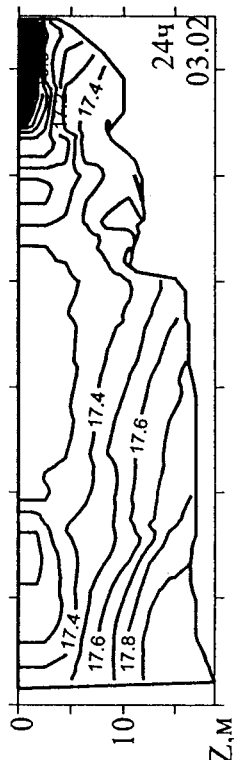
Под действием юго-восточного ветра на поверхности возникли течения, направленные на северо-запад и пересекающие бухту (с локальными усилениями до 40 – 45 см/с из-за особенностей оротографии). На глубине 6,5 м в основной бухте усилились течения, направленные на восток. В Южной бухте

течение поменяло направление с северного на южное. Скорости на этой глубине достигали 15 см/с. Пятно распресненных вод от юго-восточного края бухты стало смещаться в северо-западном направлении, со временем оно сместилось к северному берегу бухты и стало распространяться вдоль берега на запад. Апвеллинг соленых вод у юго-восточного берега привел к образованию на поверхности резкого фронта солёности, смещающегося также в северо-западном направлении. На разрезе вдоль бухты (рис. 4, б) через 9 ч действия ветра еще виден слой распресненной воды на поверхности моря. Глубже более соленые воды, приносимые подповерхностными течениями с севера, привели к появлению конвекции и образованию подповерхностного квазиоднородного слоя. Позднее и на поверхности моря, после прохождения фронта, появились более соленые воды, так что квазиоднородный слой вышел на поверхность моря. В структуре этого квазиоднородного слоя из-за неоднородности поля течений возникли пространственные неоднородности поля солёности (рис. 4, в). В результате сложилась достаточно необычная ситуация: в восточной половине бухты солёность оказалась близкой по величине к солёности в открытом море, а в западной половине бухты, точнее в северо-западном углу, образовалось достаточно крупное (глубиной до 10 м) пятно воды с относительно малой солёностью. К концу действия ветра на поверхности моря в северо-западной части бухты еще существовала фронтальная зона в поле солёности. На глубине 6,5 м также возникли относительно резкие перепады солёности: в зональном направлении в основной бухте и практически в меридиональном — в Южной бухте. При этом самая соленая вода находилась в восточной половине основной бухты — у ее южного берега, а самая распресненная — около пролива, т.е. у выхода из бухты.

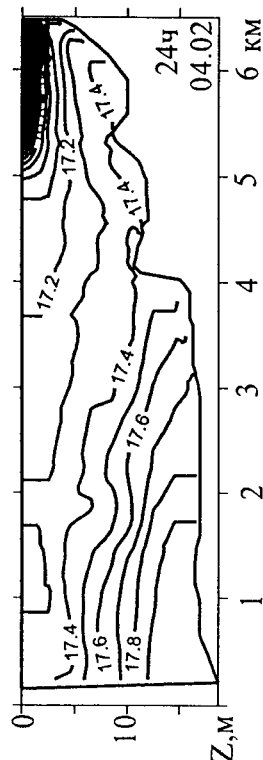
В предыдущих примерах рассматривались ситуации, имеющие место во время сильных ветров и характеризующиеся всплесками кинетической энергии. Рассмотрим теперь процесс эволюции гидрологических полей 3 и 4 февраля при действии умеренного юго-западного ветра (5 – 8 м/с) в период достаточно устойчивой метеорологической ситуации (рис. 5). Видно, что и в этом случае перестройка циркуляции происходит быстро, при сохранении направления ветра не меняется качественная структура поля скорости, и также со временем сохраняются, только проявляются более четко, качественные особенности структуры поля солёности. Характерная картина циркуляции на поверхности моря в данный период времени: направленные на восток или на север, в зависимости от ориентации берега, прибрежные течения и направленные на северо-восток течения, пересекающие бухту с локальными усилениями (до 20 – 25 см/с) из-за особенностей ортографии бассейна. На глубине 6,5 м течения направлены на юго-запад, при ослаблении ветра появляются вихревые структуры. Смещение к северо-востоку зоны распресненных вод происходит неравномерно, на западе у пролива смещения практически не происходит и сохраняется пятно такой воды. Если за нижнюю границу принять изохалину 17,4‰, то глубина распресненного слоя здесь (примерно 5 м) не меняется со временем, но происходит слабое осолонение слоя. Восточнее происходит заметное, местами до дна, заглубление и распреснение этого слоя со временем. При этом происходит вытеснение придонного, соленого слоя на запад, способствуя выходу его из бухты.



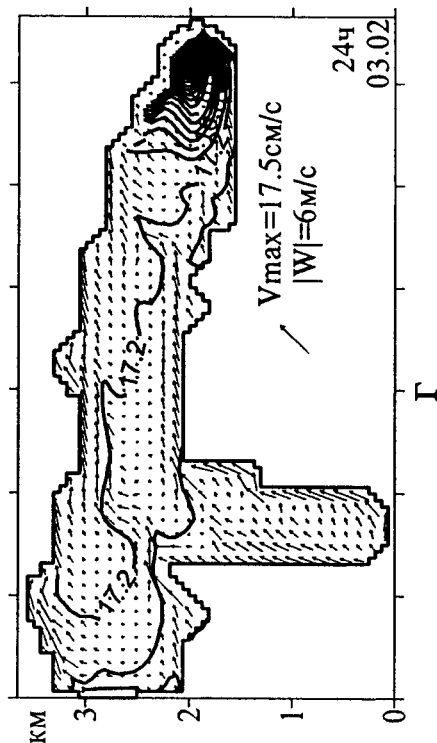
а



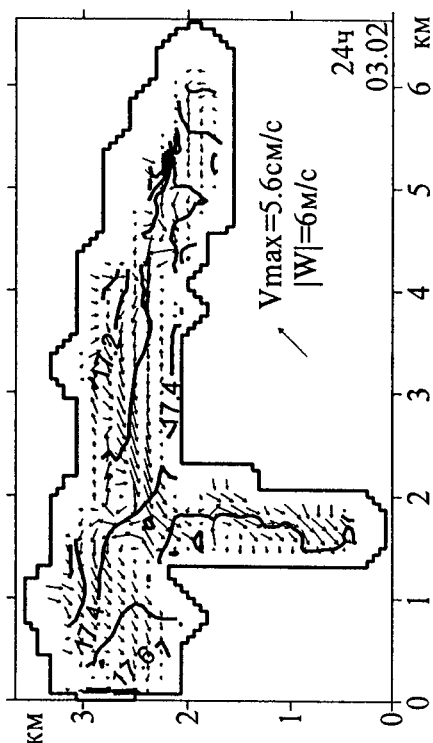
б



в

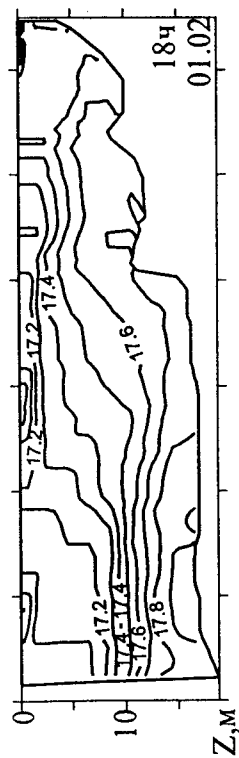


г

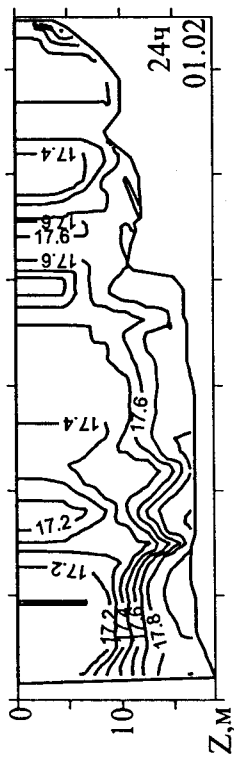


д

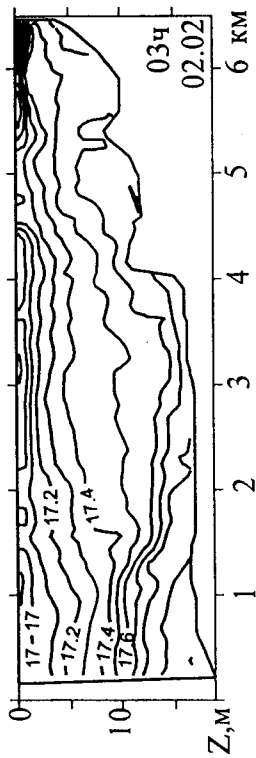
Р и с. 5. То же, что на рис. 2, только в 3 ч 3 февраля (а), 24 ч 3 февраля (б) и 24 ч 4 февраля (в), а также в 24 ч 3 февраля (г, д) при умеренном юго-западном ветре



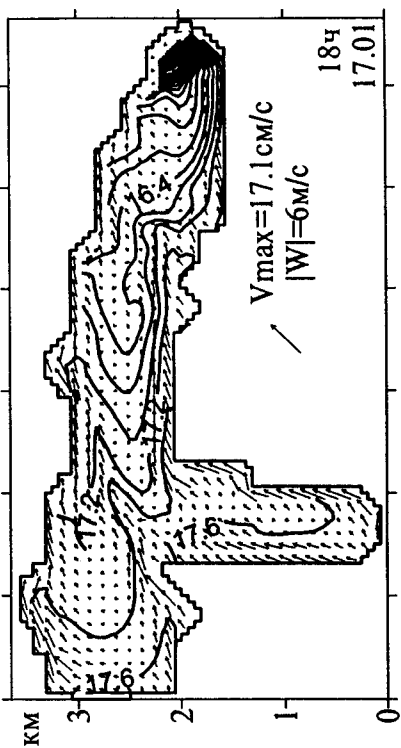
а



б



в



г

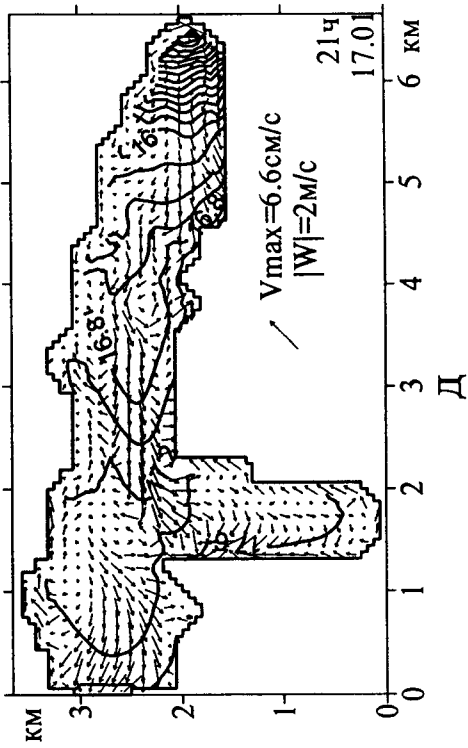


Рис. 6. То же, что на рис. 2, только в 18 ч 1 февраля (а), 24 ч 1 февраля (б) и 3 ч 2 февраля (в), а также распределения солёности и векторов скорости течения на поверхности моря в 18 ч 17 января (з) и 21 ч 17 января (д) при быстром изменении интенсивности и направления ветра

Опишем, не приводя рисунков, ситуацию 20 января, когда начиная с 0 ч и до 18 ч дул относительно слабый восточный ветер. В этом случае также быстро сформировалась и сохранялась качественная структура гидротермодинамических полей. Поверхностные течения были направлены на запад с интенсификацией у северного и южного берегов бухты. На глубине 6,5 м течения в основной бухте были направлены на восток. В Южной бухте циркуляция практически отсутствовала. Поверхностные распресненные воды переносились прибрежными течениями на запад вдоль северного и южного берегов. Со временем у входа в Южную бухту начало формироваться пятно относительно пресной воды. На глубине 6,5 м соленость менялась слабо, изолинии солености были направлены в основном в меридиональном направлении. На меридиональном разрезе вдоль бухты соленость в поверхностном слое увеличивалась с востока на запад, а на глубинах ниже 5 м, наоборот, уменьшалась.

Во всех рассмотренных выше примерах анализировались ситуации, когда ветер усиливался и дул продолжительное время в одном направлении. В таких случаях, как правило, происходит быстрая перестройка и формирование полей с характерными особенностями, присущими определенной ветровой ситуации. Представляет интерес рассмотреть случаи, когда происходит быстрое изменение интенсивности и направления ветра (напомним, что в проведенном численном эксперименте ветер задается меняющимся скачком каждые 6 ч). В качестве первого примера рассмотрим ситуацию в ночь с 1 на 2 февраля. В 18 ч сильный юго-восточный ветер (10 м/с) сменился южным ветром (10 м/с), а в 24 ч начал дуть северо-западный ветер (3 м/с). Как видим, вначале ветер просто поменял направление, во втором случае наряду с изменением направления произошло и резкое уменьшение его скорости. Рассмотрим подробнее, как при этом перестраивается поле солености (рис. 6). К 18 ч структура полей оказалась качественно близкой к структуре, описанной ранее при обсуждении эволюции полей при действии сильного юго-восточного ветра (рис. 4). Это еще раз подтверждает вывод, что сценарии перестройки и качественный характер гидрологических полей тесно связаны с направлением ветра.

После изменения направления ветра быстро сформировалась циркуляция, характерная для ветра южного направления, аналогичная представленной на рис. 2, возникла даже система круговоротов на входе в Южную бухту и в районе сужения фарватера на востоке основной бухты. Из-за неравномерного характера поля скорости течения в центральной части бухты возникли линзы относительно пресных вод (рис. 6, б), как и в ранее обсуждавшейся ситуации (рис. 2). Отметим, что в верхнем слое вода с максимальной соленостью расположена в восточной половине бухты, а самая распресненная вода располагается у входа в бухту на западе; в придонном слое, наоборот, самая соленая вода находится на западе, а к востоку соленость уменьшается.

Когда сильный южный ветер сменился слабым северо-западным ветром, уже через 3 ч произошла практически полная перестройка циркуляции и поля солености. Соответствующее южному ветру поле течений сменилось течениями практически противоположного направления в соответствии с ветро-

вой ситуацией. Однако сохранился вихревой характер движения, особенно на глубине 6,5 м, но при этом изменилось на противоположное направление вращения. Полностью перестроилось поле солёности (рис. 6, в), его достаточно изрезанная структура разрушилась, и через 3 ч картина солёности стала достаточно гладкой, при этом в поверхностном слое сохранилась тенденция уменьшения солёности к западу. На поверхности уменьшились горизонтальные градиенты солёности и в целом здесь произошло распреснение. На глубине 6,5 м за 3 ч произошло даже изменение знака градиента солёности. При южном ветре у северного берега располагались опустившиеся с поверхности распреснённые воды, а у южного берега — более солёные. Вызванный северо-восточным ветром подъём вод у северного берега привёл к появлению там относительно более солёных глубинных вод.

Рассмотрим также ситуацию вечером 17 января (рис. 6, г, д), когда в 18 ч произошло резкое (от 6 до 2 м/с) ослабление юго-восточного ветра. При этом кардинально изменилась картина течений. Поверхностные течения оказались направленными против ветра, изменились на противоположные практически всюду течения на глубине 6,5 м. Три линзы распреснённых вод на разрезе вдоль бухты оказались практически размытыми. Исчез градиент солёности у южного берега бухты, ослаб «запирающий» эффект речного стока ветром.

Проведённые расчёты показывают, что структура циркуляции и термохалинных полей в Севастопольской бухте зимой определяется действием ветра, поступлением солёных вод из внешней области бухты через пролив, втеканием пресных вод р. Черной. Последний факт особенно важен для гидрологической структуры. Как показывает расчёт, даже в зимний период сохраняется неоднородность стратификации в бухте, причём в поле температуры возникают инверсии и, как правило, вода у дна теплее, чем в верхних слоях. Перестройка циркуляции происходит достаточно быстро, за время порядка часа. Отметим, что существенную роль играет нелинейность, так что ветры противоположных румбов не вызывают течений строго противоположных направлений, как это видно на примере северного и южного ветров. Особенность циркуляции — возникновение вихревых структур при ветрах с преобладающей южной составляющей. Разный характер циркуляции в случаях северного и южного ветров можно связать с конфигурацией береговой линии, а именно с наличием Южной бухты. При южном ветре направленные на север поверхностные сильные течения у восточного и западного берегов этой бухты на выходе из нее захватывают окружающие воды и заглубляются. Достигнув северного берега, они разворачиваются, так что, с одной стороны, усиливают направленное в Южную бухту глубинное течение, а с другой стороны, возникающие возвратные течения способствуют возникновению круговоротов в прилегающих областях основной бухты, которые усиливаются и, в свою очередь, генерируют вихревые движения во всей бухте. В случае северного ветра течения у берегов Южной бухты направлены на юг, а глубинное направленное на север течение недостаточно сильно, чтобы вызвать заметные круговороты в основной бухте. При ветрах с преобладающей меридиональной составляющей происходит формирование максимального вертикального градиента солёности на глубине 5 – 10 м. При таких ветрах в центральных районах бухты возникает локальная или повсеместная конвекция и образуется верхний квазиоднородный слой. Как

правило, с каждым направлением ветра связана характерная структура циркуляции и гидрологических полей. Некоторое отклонение может возникать при резком ослаблении ветра. В отсутствие ветра может существовать достаточно интенсивная остаточная циркуляция, например, 8 февраля ночью при безветрии скорости течения на поверхности доходили до 10 – 12 см/с, а на глубине 6,5 м до 5 см/с. Поскольку горизонтальные размеры бухты невелики, то даже течения со скоростью порядка 1 см/с могут приводить к существенной перестройке пространственной структуры гидрологических полей (1 см/с приблизительно равен 1 км/сут). К сожалению, у нас нет возможности сопоставить полученные результаты с данными наблюдений, поскольку в обсуждаемый период времени измерений в море не проводилось; это является предметом последующего анализа результатов последующих этапов численного эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шапиро Н.Б., Юценко С.А.* Моделирование ветровых течений в севастопольских бухтах // Морской гидрофизический журнал. — 1998. — № 6. — С. 28 – 42.
2. *Фельзенбаум А.И.* Теоретические основы и методы расчета установившихся морских течений. — М: Изд-во АН СССР, 1960 — 128 с.
3. *Михайлова Э.Н., Шапиро Н.Б., Юценко С.А.* Моделирование распространения пассивной примеси в севастопольских бухтах // Морской гидрофизический журнал. — 1999. — № 3. — С. 29 – 42.
4. *Овсяный Е.И., Кемп Р.Б., Репетин Л.Н. и др.* Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты в условиях антропогенного воздействия (по наблюдениям 1998 – 1999 гг.) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. — Севастополь: МГИ НАН Украины, 2000. — С. 79 – 103.
5. *Репетин Л.Н., Гордина А.Д., Павлова Е.В. и др.* Влияние океанографических факторов на экосистему полузамкнутой антропогенно нагруженной Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журнал. — 2003. — № 2. — С. 66 – 80.
6. *Иванов В.А., Михайлова Э.Н., Репетин Л.Н. и др.* Модель Севастопольской бухты. Воспроизведение вертикальной структуры полей температуры и солености в 1997 – 1999 гг. // Там же. — 2003. — № 4. — С.15 – 35.
7. *Михайлова Э.Н., Иванов В.А., Кубряков А.И. и др.* Особенности циркуляции вод в окрестностях острова Змеиный при воздействии ветров разных направлений // Там же. — 1998. — № 4. — С.17 – 23.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 27.11.03
После доработки 12.01.04

ABSTRACT Results of the numerical experiments on modeling the flow evolution and transformation of temperature and salt regimes in the Sevastopol bay in January – February, 1997 are considered. Actual data on wind velocity and direction, sea surface temperature and the river Chernaya discharge are used in calculations. It is shown that circulation and structure of the hydrological fields are mainly related to the wind direction, its intensity and variability in time. As the bay is shallow the currents there change rather quickly – less than in an hour after the wind changes; the thermohaline fields change slower. Due to the inflows of fresh water from the river Chernaya and salt waters from the open sea through the channel, a non-uniform (both vertically and horizontally) structure of thermohaline fields is formed in the bay. The basic part in forming the vertical stratification, that is natural for a winter season, is attributed to the salinity distribution. Due to freshening there is rather a significant vertical salinity gradient in the sea upper layer. Therefore cooling does not result in the development of convection, and the temperature inversions occur when the warmer water is located in deep layers.