

Математическое моделирование морских систем

УДК 551.465

В.А. Иванов, Э.Н. Михайлова, Н.Б. Шапиро

Моделирование ветровых апвеллингов на северо-западном шельфе Черного моря в окрестностях локальных особенностей рельефа дна

Обсуждаются результаты численных экспериментов по изучению формирования трехмерной структуры зон подъема вод (апвеллингов) на северо-западном шельфе Черного моря в зависимости от направления ветра. Выделены три района (I, II, III) с достаточно резко выраженными неоднородностями рельефа дна. Район I расположен на севере шельфа, на его территории имеется узкая впадина юго-западнее Тендровской косы. В районе II – в придунайской зоне – располагается возвышенность, выходящая на поверхность моря, – о. Змеиный. Район III, расположенный на востоке шельфа, – это район резкого свала глубин с характерным изгибом береговой линии Каламитского залива и Гераклеийского п-ова. Проведенный анализ позволяет сделать выводы, что в окрестностях локальных особенностей рельефа дна и береговой линии (таких, как подводные возвышенности, впадины, мысы) формируются зоны подъема вод, проявляющиеся в основном в глубинных слоях моря.

Район северо-западного шельфа Черного моря привлекает пристальное внимание специалистов разных направлений как перспективный объект промышленного и хозяйственного использования. В связи с этим весьма важным является изучение циркуляции водных масс в этом регионе под влиянием различных внешних факторов [1 – 9]. Процессы на шельфе достаточно сильно отличаются от процессов, происходящих в глубоководных районах моря. В прибрежной мелководной области течения, как правило, довольно сильны, и придонное трение, которое в открытом море играет незначительную роль, становится важным. Присутствие береговой линии создает ограничение для движения воды и приводит к возникновению сгонов и нагонов. Речной сток способствует распреснению прибрежных морских вод, т.е. уменьшению солености и, следовательно, плотности морской воды, и тем самым также влияет на течения. Влияние термических внешних факторов также имеет специфические особенности на шельфе. Так, при одинаковых значениях потока тепла через поверхность моря более мелководные прибрежные области испытывают большие вариации температуры, чем глубоководные. На границе шельфа с глубоководной областью моря располагается свал глубин, где происходит резкое увеличение уклонов дна. Большие наклоны дна обуславливают особый характер циркуляции, что приводит к образованию фронтальных зон, интенсивных струйных течений, меандрирование которых, в свою очередь, ведет к образованию вихрей и возникновению апвеллингов и даунвеллингов.

© В.А. Иванов, Э.Н. Михайлова, Н.Б. Шапиро, 2008

В целом северо-западный шельф представляет собой яркий пример региона (с трехмерной структурой циркуляции и термохалинных полей), взаимодействующего с глубоководной частью моря. Одним из распространенных, но недостаточно изученных явлений в этом регионе является апвеллинг, который возникает как у берегов, так и в открытой части моря. Значительная часть апвеллингов, особенно вблизи берегов, имеет здесь преимущественно ветровой характер и обусловлена сгоном чисто дрейфовых течений от берега в сторону открытого моря и выходом глубинных вод на поверхность.

В настоящей работе на основе математического моделирования изучается реакция моря в районе северо-западного шельфа на воздействие ветров различных направлений. Данная статья, продолжающая цикл работ [5 – 9], посвящена более детальному анализу трехмерной структуры ветровых апвеллингов в удаленных от берега районах, в окрестностях локальных топографических особенностей.

В численной модели используется достаточно подробное пространственное разрешение (настолько, чтобы в простейшем виде учесть наличие о. Змеиный). При этом рассматривается северо-западная часть Черного моря с открытой границей, расположенной достаточно далеко от материкового склона, чтобы выбор граничных условий не оказывал существенного влияния на динамику вод в районе северо-западного шельфа и материкового склона. Используется численная многоуровневая модель [7 – 9], основанная на полных уравнениях гидродинамики океана, т.е. на нелинейных уравнениях в приближении Буссинеска и гидростатики. В модели предусмотрена возможность расчета топографии уровневой поверхности моря без использования приближения «твердой крышки». Такая модификация становится особенно существенной, поскольку из-за наличия о. Змеиный исследуемая область оказывается двусвязной и вместо уравнения для интегральной функции тока удобно использовать уравнение для уровня моря. Для описания процессов горизонтального обмена и диффузии взяты бигармонические операторы. Исходная система дифференциальных уравнений аппроксимируется разностными аналогами на основе консервативной схемы с использованием дозированной схемной диффузии при расчете температуры и солёности. Схема двухслойная по времени, неявная при аппроксимации вертикальных диффузии, вязкости и адвекции, придонного трения и ускорения Кориолиса. Разностная сетка неравномерная и сдвинута как по горизонтали (сетка B), так и по вертикали. Разностная аппроксимация выполнена по боксовой схеме. Рельеф дна аппроксимируется на выбранной сетке максимально приближенным к реальному рельефу, при этом толщина придонного бокса является переменной величиной.

На поверхности моря задаются тангенциальное напряжение ветра, условие отсутствия потоков тепла и соли. На дне принимаются условия обтекания с трением и отсутствия потоков тепла и соли. На боковых твердых границах задаются условия прилипания и отсутствия потоков тепла и соли, а также дополнительные условия отсутствия потоков горизонтальной диффузии, связанные с введением бигармонического оператора. На открытой границе, отделяющей северо-западную часть моря от остального бассейна, для скоростей

течения ставятся условия свободного протекания. При этом там, где вода втекает в бассейн, задаются температура и соленость, а там, где вытекает, ставится условие отсутствия диффузионных потоков тепла и соли, т.е. в открытое море вытекает вода с температурой и соленостью, сформировавшаяся во внутренней области. Кроме того, как и на твердых границах, ставятся дополнительные условия.

Численный эксперимент

Район моря к северу от 43° с.ш. и к западу от 35° в.д., полностью охватывающий весь северо-западный шельф, с реальной топографией дна и подробной береговой линией разбит на боксы, размеры которых по горизонтали составляли 2,5' (3,05 км) вдоль параллели и 1,25' (2,31 км) вдоль меридиана. Горизонтальные составляющие скорости течения, температура и соленость рассчитывались на глубинах: 0,5, 1,5, 6,5, 13,5, 26,5, 43,5, 76,5, 123,5, 226,5, 473,5, 926,5 м, так что максимальное число уровней по вертикали равняется 11. Вертикальные составляющие скорости течения рассчитывались на поверхности, дне моря и на горизонтах, расположенных посередине между приведенными выше глубинами. Толщина нижних боксов равнялась разности между реальной глубиной моря $H(x,y)$ и глубиной залегания нижней границы предпоследнего бокса. Минимальная глубина в прибрежной зоне моря задавалась равной 7 м. Остров Змеиный моделируется заданием глубины моря, равной нулю в одном боксе разностной сетки, так что размер острова по горизонтали соответствует одному боксу.

Коэффициент вертикального обмена количеством движения A , как в [9], задается пропорциональным глубине моря $H(x,y)$ и изменяется от 7 до $100 \text{ см}^2/\text{с}^2$. Коэффициент горизонтальной вязкости равен $A_T = 10^{16} \text{ см}^4/\text{с}$, коэффициенты вертикальной и горизонтальной диффузии равны соответственно: $\mu_z = 5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}^2$, $\mu_1 = 10^{15} \text{ см}^4/\text{с}$.

Расчет проводился следующим образом. В начальный момент времени скорости течения во всей области принимались равными нулю, а температура и соленость – горизонтально-однородными и стратифицированными по вертикали. Профиль солености был взят соответствующим характерному многолетнему профилю для глубоководной части Черного моря: соленость равнялась 18‰ в первом – пятом слоях, т.е. до глубины 35 м, а в следующих слоях она была равна 18,3, 18,5, 19,5, 20,5, 21,5, 22,0‰. Вертикальный профиль температуры воды взят в соответствии с термическим состоянием в начале летнего прогрева. В этот сезон, когда гидрометеорологическая ситуация неустойчива и в то же время уже существует прогретый верхний слой, причем достаточно тонкий, апвеллинги наиболее четко проявляются на поверхности моря именно по температуре. Температура равнялась 20°C в верхнем четырехметровом слое, 18 и 12°C – на горизонтах 6,5 и 13,5 м и 8°C – ниже. Такими же профили температуры и солености поддерживались в течение всего времени расчетов на открытой границе области. Расчет проводился на срок в одни сутки (достаточно типичная для Черного моря продолжительность, при которой возникает апвеллинг).

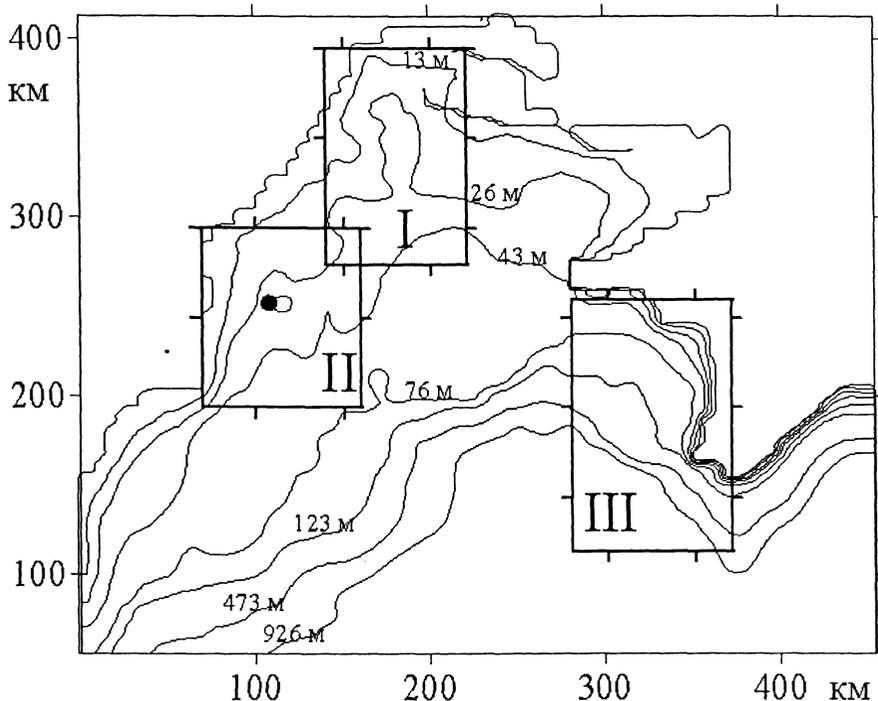
Такая постановка задачи позволяет изучить быструю реакцию морской среды на ветровое воздействие, а именно: процессы перестройки циркуляции и термохалинных полей, в частности генерацию апвеллинга (даунвеллинга).

Для исследования реакции моря на действие интенсивных ветров различных направлений было проведено восемь численных экспериментов. Рассмотрены ситуации для восточного, юго-восточного, южного, юго-западного, западного, северо-западного, северного и северо-восточного ветров с амплитудой поверхностного напряжения $4 \text{ см}^2/\text{с}^2$, что соответствует скорости ветра $\sim 15 \text{ м/с}$. При таком ветре можно пренебречь структурой фонового состояния термохалинных полей. Необходимость проведения отдельных расчетов для противоположных направлений ветрового воздействия диктуется нелинейностью задачи. В этих экспериментах сток Дуная не учитывается.

Ранее проведенный анализ результатов расчетов [5, 7, 9] показал, что в данной постановке задачи и рассматриваемых временных масштабах (ветер мгновенно возникает и дует одни сутки) положение зон апвеллинга (даунвеллинга) тесно связано с характером береговой линии и рельефом дна. В поверхностном слое апвеллинги (холодные аномалии), как быстрая реакция морской среды на ветровое воздействие, проявляются в основном около берега. Около западного берега шельфа формируется практически сплошная полоса апвеллингов при юго-западном, западном и северо-западном ветрах. Относительно крупномасштабные пятна апвеллингов возникают здесь также при южном ветре. Достаточно интенсивные локальные апвеллинги практически при всех направлениях ветра образуются около западной оконечности Тендровской косы. В Каркинитском заливе подъем вод при северо-западном, северном и северо-восточном ветрах формируется в северной половине залива, а при восточном, юго-восточном и южном ветрах – в южной половине. Отметим, что холодные аномалии практически не проникают в район мелководья в северо-восточном углу залива. При западном ветре четко выраженный апвеллинг виден у северного побережья залива в районе м. Тарханкут. В Каламитском заливе наиболее мощные апвеллинги возникают при северо-западном, северном, северо-восточном и восточном ветрах.

Полученные результаты численных экспериментов позволяют также провести детальный анализ ветровых апвеллингов в удаленных от берега районах, в окрестностях локальных топографических особенностей. Для такого исследования в рассматриваемой области северо-западного шельфа было выделено три района с достаточно характерными неоднородностями в рельефе дна. На рис. 1 приведена область, для которой выполнялись расчеты, а также нанесены изобаты, ограничивающие расчетные горизонты, начиная с четвертого (верхние три горизонта ограничены контуром области). На плане нанесены выбранные для анализа районы I, II, III. Район I расположен на севере шельфа, на его территории имеется узкая впадина в рельефе дна юго-западнее оконечности Тендровской косы. Район II представляет собой придунайскую зону с о. Змеиный и соответственно с окружающей его возвышенностью дна. Район III – район резкого свала глубин и изгиба береговой линии, в него входит Каламитский залив и часть открытого моря южнее м. Херсонес на западной оконечности Гераклеийского п-ова. Следует отме-

тить, что у берегов о. Змеиный апвеллинги всегда выходят на поверхность моря, тогда как в остальных случаях они проявляются, как правило, только как холодные аномалии на подповерхностных горизонтах.



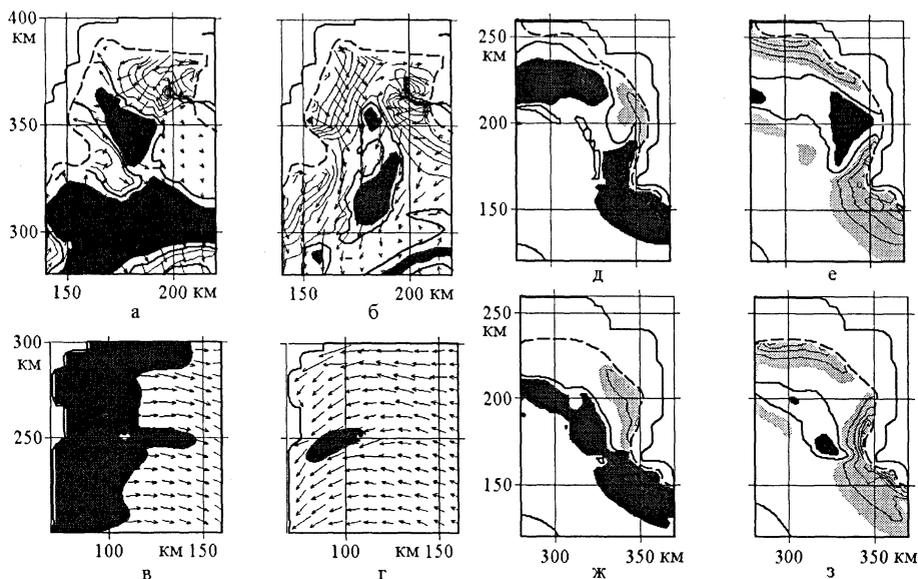
Р и с. 1. Расчетная область с изобатами. Выделены области, в которых подробно анализируются особенности ветровых апвеллингов. Жирная точка – о. Змеиный

Области подъема и опускания вод будем идентифицировать по распределениям аномалий температуры и солёности. Очевидно, что области отрицательных аномалий температуры соответствуют зонам, где происходит подъем вод (апвеллинг), а области положительных аномалий расположены там, где происходит опускание вод. И наоборот, области отрицательных аномалий солёности расположены там, где происходит опускание вод, а области положительных аномалий соответствуют зонам, где происходит подъем вод. Распределение аномалий температуры на верхнем горизонте является индикатором распределения зон поверхностных апвеллингов. По распределениям аномалий температуры и солёности на нижних горизонтах можно судить о пространственной структуре вертикальных движений в толще моря. Отметим, что структура аномалий температуры и солёности обусловлена не только действием вертикальных движений, но также переносом аномалий горизонтальными течениями.

Для анализа распределения областей подъема и опускания вод в районе I используем распределения аномалий температуры на горизонте 13,5 м. В районе II проанализируем картину поверхностных апвеллингов. А для индикации глубинных зон подъема и опускания вод в районе III рассмотрим распределения аномалий солёности на горизонтах 43,5 и 76,5 м.

Полученные результаты в выбранных районах будем рассматривать попарно при ветрах противоположных направлений. Соответствующие распределения при разных направлениях ветра приведены на рис. 2 – 5.

На рис. 2, а, б – 5, а, б показаны изолинии аномалий температуры и векторы скорости течения на глубине 13,5 м в районе I при ветрах противоположных направлений. Изолинии проведены с интервалом 1°C и начинаются с $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Жирной линией приведено положение нулевой изолинии аномалии температуры, штриховой – положение изобаты 13 м. Затемненные области – зоны подъема вод, где аномалии температуры ниже $-0,5^\circ\text{C}$.



Р и с. 2. Распределение зон подъема и опускания вод в районах исследования при западном (а, в, д, ж) и восточном (б, г, е, з) ветрах

На рис. 2, в, г – 5, в, г приведены изолинии аномалий температуры и векторы скорости течения на поверхности моря в районе II. Изолинии проведены с интервалом 1°C и начинаются с $-0,5^\circ\text{C}$. Затемненные области – районы апвеллинга, где аномалии температуры ниже $-0,5^\circ\text{C}$.

На рис. 2, д – з – 5, д – з показаны изолинии аномалий солёности в районе III на глубинах 43,5 м (д, е) и 76,5 м (ж, з) соответственно при ветрах противоположных направлений. Изолинии проведены с интервалом 0,1‰ и начинаются с $\pm 0,1\text{‰}$. Жирной линией приведено положение нулевой изолинии аномалии солёности, штриховой – положение изобаты 43 м (д, е) и 76 м (ж, з). Затемненные области – районы апвеллинга, где аномалии солёности выше 0,05‰, более светлые – районы опускания вод, где аномалии ниже $-0,05\text{‰}$.

Западный и восточный ветры (рис. 2)

Район I. При западном ветре (рис. 2, а) практически вся южная часть рассматриваемой области охвачена подъемом вод. В центральной части тоже имеется зона подъема, которая располагается в подводной впадине (ложбине).

Зоны опускания видны около западной оконечности Тендровской косы и над подводной возвышенностью на западном береговом склоне.

При восточном ветре (рис. 2, б) в рассматриваемой области преобладают процессы опускания вод. Они сосредоточены около западного берегового склона, а также у северного и южного края Тендровской косы. Зона подъема вод располагается над котловиной с локальным экстремумом апвеллинга в ее северной части и с интенсивной холодной аномалией температуры у южного края, где происходит резкое расширение изобат. Интересно отметить, что при западном ветре здесь (но в более обширной области) тоже происходит подъем вод. Таким образом, имеет место влияние нелинейности, поскольку изменение направления ветра не приводит просто к изменению знака температурных аномалий.

Район II. Отметим, во-первых, что около о. Змеиный при указанных направлениях ветра возникает апвеллинг. При западном ветре (рис. 2, в) возникающий у восточного берега острова локальный апвеллинг сносится течениями на восток, при этом он может рассматриваться как локальный максимум в более крупномасштабном прибрежном апвеллинге у западного берега шельфа. При ветре восточного направления (рис. 2, г) у западного края острова возникает локальный интенсивный апвеллинг, который сносится поверхностными течениями в направлении запад – юго-запад.

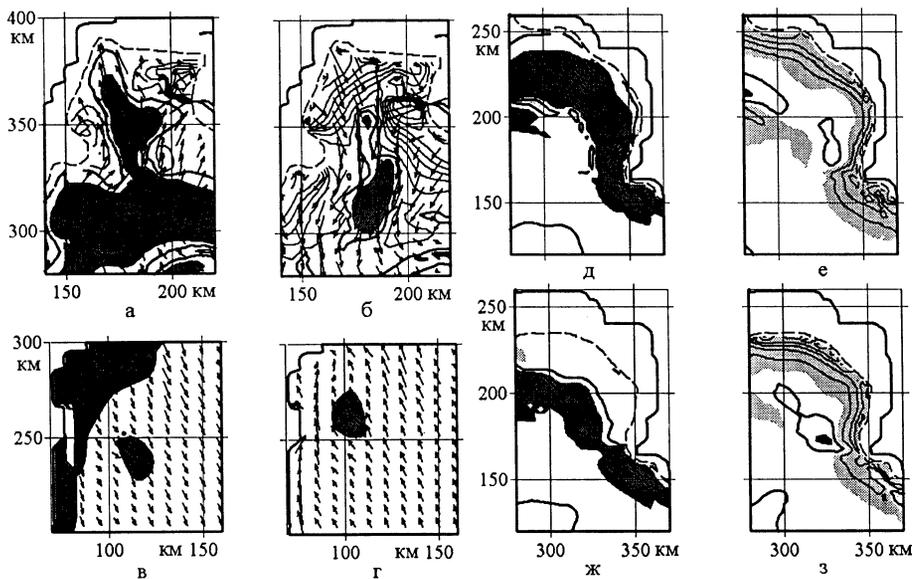
Район III. В Каламитском заливе при западном ветре в глубинных слоях преобладают процессы подъема вод (рис. 2, д, ж). Только во вдающейся в сушу вершине залива имеет место их опускание. Видно, что при продвижении от берега к морю опускание вод сменяется слабым подъемом на верхнем горизонте (рис. 2, д) и довольно интенсивным – на нижнем (рис. 2, ж). Эта зона подъема вод распространяется вдоль Крымского побережья, значительно усиливаясь у крутого склона около южного берега Гераклеяского п-ова. Отметим, что в данном случае апвеллинг проявляется и на поверхности моря в виде температурных аномалий [7].

При восточном ветре (рис. 2, е, з) апвеллинг как пятно соленых вод виден в глубинных слоях непосредственно в Каламитском заливе. Он тоже проявляется и на поверхности моря в виде температурных аномалий [7]. По сравнению с теплой аномалией у поверхности моря, расположенной примерно в этом же районе при западном ветре, холодная аномалия распространяется гораздо дальше к западу и занимает практически всю центральную область залива. Вдоль берега к северу и югу от этой области происходит мощное опускание вод. Эти зоны опускания также видны в рассматриваемой области и на глубинных горизонтах. Можно сделать вывод, что при двух рассматриваемых направлениях ветра апвеллинг в Каламитском заливе (и около него) выносит на поверхность воды с относительно больших глубин, глубинный подъем вод при приближении к поверхности моря сливается с поверхностным прибрежным апвеллингом, обусловленным стоном.

Северо-западный и юго-восточный ветры (рис. 3)

Район I. При северо-западном ветре (рис. 3, а) практически вся центральная часть рассматриваемой области охвачена подъемом вод. Зона подъема располагается в котловине и южнее между изобатами 13 и 26 м. Зоны опус-

кания расположены только около северного края Тендровской косы и над западным береговым склоном (над подводной возвышенностью). При юго-восточном ветре (рис. 3, б) в рассматриваемой области преобладают процессы опускания вод. Зоны опускания сосредоточены около западного берегового склона, а также у северного и южного края Тендровской косы. Над котловиной расположена зона подъема вод с локальными экстремумами аномалий температуры в северной и южной частях. Наибольшая холодная аномалия температуры находится в южной половине, где происходит резкое расширение изобат. Отметим, что в районе котловины при ветрах противоположных направлений, как и при действии зональных ветров, имеет место подъем вод.



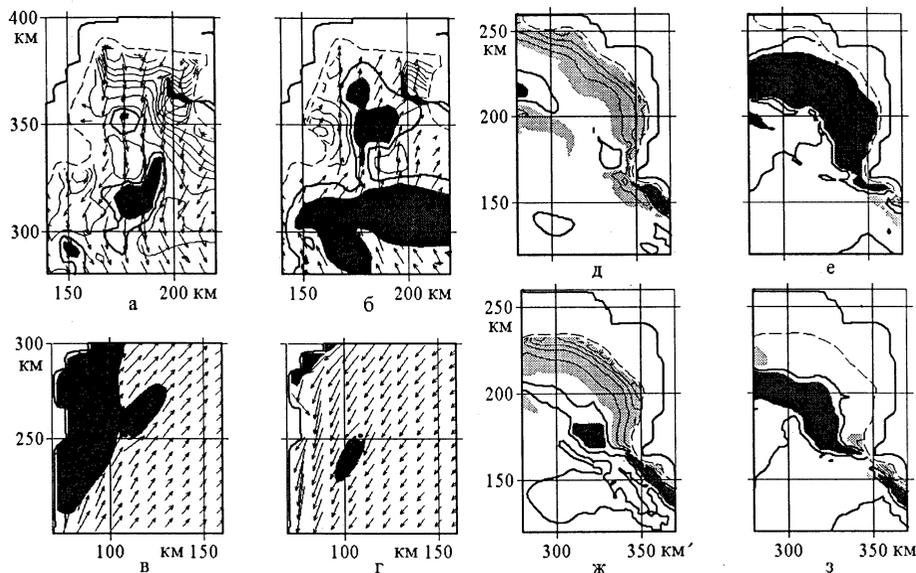
Р и с. 3. Распределение зон подъема и опускания вод в районах исследования при северо-западном (а, в, д, ж) и юго-восточном (б, г, е, з) ветрах

Район II. При северо-западном ветре (рис. 3, в) возникает локальный апвеллинг у юго-восточного берега о. Змеиный, который сносится течениями на юго-восток. При этом он расположен вне крупномасштабного апвеллинга у западного побережья шельфа. При ветре юго-восточного направления (рис. 3, г) у северо-западного края острова возникает локальный апвеллинг, который слегка вытянут на северо-запад.

Район III. При северо-западном ветре (рис. 3, д, ж) происходит мощный подъем вод вдоль свала глубин. Можно отметить сужение зоны апвеллинга в глубинных слоях западнее южной границы Каламитского залива. При юго-восточном ветре (рис. 3, е, з) практически во всей прибрежной зоне происходит опускание вод. Обратим внимание на то, что в глубинных слоях северо-западнее м. Херсонес имеется локальное пятно холодной воды (рис. 3, з). Это свидетельствует о том, что здесь возникает, как и при восточном ветре, локальный глубинный апвеллинг (но значительно более слабый), исчезающий при подходе к поверхности.

Южный и северный ветры (рис. 4)

Район I. При южном ветре (рис. 4, а) в рассматриваемой области преобладают процессы опускания вод. Они наиболее интенсивны в северо-восточной части района, около Тендровской косы. Можно отметить также локальную теплую аномалию у западного берега, южнее подводной возвышенности. В районе котловины расположены две зоны подъема вод – очень слабая в северной половине и интенсивная на юге, где происходит резкое расширение изобат.



Р и с. 4. Распределение зон подъема и опускания вод в районах исследования при южном (а, в, д, ж) и северном (б, г, е, з) ветрах

При северном ветре (рис. 4, б) имеются только небольшие зоны опускания вод около подводной возвышенности у западного берега и севернее Тендровской косы. Над северной частью ложбины возникает изолированная зона подъема вод. Южнее, между изобатами 13 и 26 м, расположена полоса апвеллинга с локальными экстремумами. Отметим, что в обоих случаях над впадиной происходит подъем вод, но если в первом случае подъем максимален, то при северном ветре здесь имеет место локальное ослабление апвеллинга.

Район II. При южном ветре (рис. 4, в) в рассматриваемой области возникает прибрежный крупномасштабный апвеллинг на северо-западе и локальный апвеллинг у северного края о. Змеиный, вытянутый на северо-восток. При северном ветре (рис. 4, г) образуется только локальный апвеллинг у о. Змеиный, вытянутый на юго-запад.

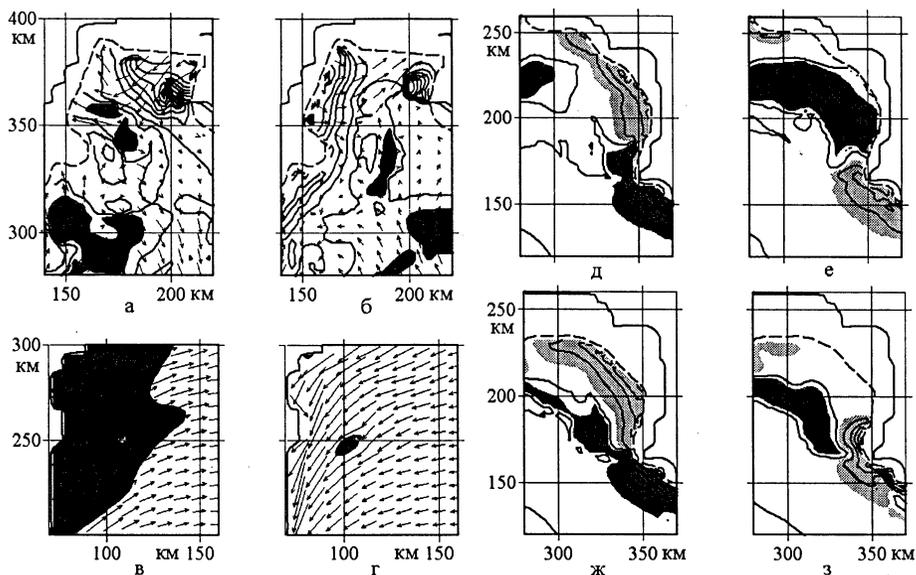
Район III. При южном ветре (рис. 4, д, ж) в рассматриваемой области, начиная с северного края и до Гераклейского п-ова, вдоль всего побережья расположена зона опускания вод. Южнее, после поворота береговой линии к востоку возникает узкая полоса прибрежного апвеллинга. В глубинных слоях западнее южной границы Каламитского залива можно отметить пятно

соленых вод (рис. 4, ж), свидетельствующее о глубинном апвеллинге, исчезающем при подъеме в вышележащие слои.

При северном ветре (рис. 4, е, з) возникают две области апвеллинга, разделенные Гераклейским п-овом. Северная более обширная зона представляет собой мощный апвеллинг, возникающий в глубоководной части. При переходе в верхние слои он усиливается, приближается к берегу и выходит на поверхность моря [7]. Южнее Гераклейского п-ова апвеллинг проявляется только в глубинных слоях, он исчезает при выходе к поверхности.

Юго-западный и северо-восточный ветры (рис. 5)

Район I. При юго-западном ветре (рис. 5, а) на северо-востоке района – около Тендровской косы и к западу от нее – образуется область опускания вод. Южнее можно видеть несколько локальных зон апвеллинга. В южной части района, в области расширения изобат, возникает апвеллинг, наиболее интенсивный в западной части.



Р и с. 5. Распределение зон подъема и опускания вод в районах исследования при юго-западном (а, в, д, ж) и северо-восточном (б, г, е, з) ветрах

При северо-восточном ветре (рис. 5, б) область опускания вод формируется около западного берегового склона. Можно также отметить наличие локальной зоны опускания к северу от Тендровской косы. В центральной и восточной частях расположены зоны слабого апвеллинга.

Район II. При юго-западном ветре (рис. 5, в) западная половина района охвачена мощным прибрежным апвеллингом. Наличие о. Змеиный проявляется только в некотором увеличении протяженности зоны апвеллинга в восточном направлении. При северо-восточном ветре (рис. 5, г) у юго-западного края острова видно пятно слабого локального апвеллинга.

Район III. При юго-западном ветре (рис. 5, д, ж) в районе Каламитского залива вдоль берегового склона формируется зона опускания вод. Южнее,

начиная от Гераклеийского п-ова, над свалом глубин вблизи берега возникает мощный прибрежный апвеллинг. Он распространяется к северо-западу в открытое море на нижнем горизонте и к северу вдоль берега в южную часть Каламитского залива, оттесняя к северу зону опускания вод.

При северо-восточном ветре (рис. 5, е, з) опускание прибрежных вод происходит в южной части района, к югу от Гераклеийского п-ова на верхнем горизонте. На нижнем горизонте виден перенос более пресных вод к северу, в Каламитский залив. В его глубоководной части возникает апвеллинг, который усиливается и смещается к берегу при приближении к поверхности. Обратим внимание на то, что при этих противоположных ветрах в рассматриваемом районе возникают достаточно обширные зоны апвеллинга, хотя и расположенные в пространстве по-разному.

Заключение

Таким образом, результаты проведенных численных экспериментов свидетельствуют о том, что кратковременное ветровое воздействие вызывает апвеллинги не только в поверхностном слое около берега. В зависимости от рельефа дна генерируется сложная трехмерная структура течений, и достаточно быстро возникают глубинные апвеллинги в окрестностях локальных неоднородностей в рельефе дна. При этом со сменой направления ветра местоположение таких апвеллингов меняется незначительно, но происходит расширение или сужение их зоны.

В **районе I** над подводной впадиной практически при всех направлениях ветра формируется локальный подъем вод. Здесь во всех рассмотренных случаях можно выделить три характерных конфигурации апвеллинга.

Первая конфигурация характеризуется пятном апвеллинга над северным краем впадины и полосой подъема вод над склоном у южного края впадины, она возникает при западном, северо-западном и северном ветрах. Над центральной частью впадины зона подъема вод сужается и сам апвеллинг ослабевает, а при северном ветре практически исчезает.

При *второй конфигурации*, возникающей при восточном, юго-восточном и южном ветрах, над центральным и южным районами впадины формируется локальная зона апвеллинга, вытянутая примерно в северо-восточном направлении.

Наконец, при *третьей конфигурации*, возникающей при северо-восточном и юго-западном ветрах, в районе впадины формируется несколько мелкомасштабных очагов апвеллинга.

В **районе II**, включающем о. Змеиный, в непосредственной близости к нему при всех ветрах возникают апвеллинги, положение и интенсивность которых зависят от направления ветра, что должно приводить к практически постоянной вентиляции вод.

В **районе III**, над свалом глубин, как правило, в зависимости от направления ветра возникает либо крупномасштабный апвеллинг (при западном, северо-западном и северном ветрах), либо полоса практически сплошного опускания вод (при восточном, юго-восточном и южном ветрах). Исключение представляет ситуация при северо-восточном и юго-западном

ветрах, когда крупномасштабный апвеллинг сменяется даунвеллингом в глубоководной области немного северо-западнее Гераклейского п-ова. Более детальный анализ показывает, что именно в этом месте практически всегда отмечается наличие апвеллинга – либо локального, когда в районе III происходит крупномасштабное опускание вод, либо как части крупномасштабного подъема вод.

В большинстве рассмотренных случаев речь идет об апвеллингах, которые в проведенных расчетах не проявляются на поверхности моря. Однако факт их практически постоянного местоположения и возникновения при разных ветрах наводит на мысль, что в окрестности локальных особенностей рельефа дна возможно существование квазистационарных апвеллингов, которые как достаточно долговременные структуры могут проявляться даже на поверхности моря.

Настоящее исследование сосредоточено на анализе последствий кратковременного воздействия ветра, возникшего внезапно и далее не меняющегося. Полученные результаты имеют практическое значение и позволяют районировать местоположение ветровых апвеллингов, как прибрежных, так и связанных с локальными особенностями рельефа дна на шельфе. Разумеется, необходимы дальнейшие исследования временной эволюции апвеллингов при долговременном действии ветра, а также роли временной и пространственной неоднородности ветра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андросович А.И., Михайлова Э.Н., Шапиро Н.Б. Численная модель и расчеты циркуляции вод северо-западной части Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 1994. – № 5. – С. 28 – 42.
2. Иванов В.А., Кубряков А.И., Михайлова Э.Н., Шапиро Н.Б. Формирование и эволюция вихревых образований, обусловленных стоком рек на северо-западном шельфе Черного моря // Исследования шельфовой зоны Азово-Черноморского бассейна. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 1995. – С. 147 – 167.
3. Иванов В.А., Кубряков А.И., Михайлова Э.Н., Шапиро Н.Б. Моделирование распределяющего эффекта речного стока во время весеннего половодья на северо-западном шельфе Черного моря // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 1996. – 32, № 1. – С. 152 – 160.
4. Михайлова Э.Н., Шапиро Н.Б. Моделирование распространения и трансформации речных вод на северо-западном шельфе и в глубоководной части Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 1996. – № 3. – С. 30 – 40.
5. Иванов В.А., Коснырев В.К., Михайлова Э.Н. Апвеллинг в северо-западной части Черного моря в период летнего прогрева // Там же. – 1996. – № 4. – С. 26 – 35.
6. Коснырев В.К., Михайлова Э.Н., Станичный С.А. Апвеллинг в Черном море по результатам численных экспериментов и спутниковым данным // Там же. – 1996. – № 5. – С. 34 – 46.
7. Иванов В.А., Коснырев В.К., Михайлова Э.Н., Шапиро Н.Б. Численное моделирование апвеллингов на северо-западном шельфе и в районе материкового склона в Черном море // Диагноз состояния среды прибрежных и шельфовых зон Черного моря. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 1996. – С. 17 – 30.

8. *Коснырев В.К., Михайлова Э.Н., Шапиро Н.Б.* Численное моделирование апвеллинга в северо-западной части Черного моря // *Метеорология и гидрология*. – 1996. – № 12. – С. 65 – 71.
9. *Михайлова Э.Н., Иванов В.А., Кубряков А.И., Шапиро Н.Б.* Особенности циркуляции вод в окрестности острова Змеиный при воздействии ветров различной направленности // *Морской гидрофизический журнал*. – 1998. – № 4. – С. 17 – 23.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 18.01.07
После доработки 14.02.07

ABSTRACT The results of numerical experiments on studying the formation of three-dimensional structure of the zones of water rise (upwelling) on the Black Sea northwest shelf depending on the wind direction are discussed. Three areas (I, II, III) with rather pronounced heterogeneities of the bottom topography are selected. Area I is in the north of the shelf; it includes a narrow cavity to the southwest of the Tendra spit. In area II, the near-Danube zone, there is a height which forms the island Zmeiny on the sea surface. Area III located in the east of the shelf is an area of steep bottom slope with a characteristic coastal line bend of the Kalamita bay and the Gerakleya peninsula. The carried out analysis permits to conclude that in the vicinity of local features of bottom topography and coastal line (such as underwater heights, cavities and capes) the zones of water rise manifested mainly in the sea deep layers are formed.