

С.Г. Демьшев, Н.А. Евстигнеева

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТЕЧЕНИЙ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ЮЖНОГО БЕРЕГА КРЫМА В ИЮЛЕ 2000 ГОДА НА ОСНОВЕ АССИМИЛЯЦИИ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В МОДЕЛИ ЦИРКУЛЯЦИИ

На основе гидродинамической модели, включающей нелинейные уравнения движения, уравнения адвекции тепла и соли и процедуры ассимиляции, проведен численный эксперимент с высоким разрешением (350 м по горизонтали и 38 горизонтов по вертикали) с усвоением данных наблюдений гидрологической съемки, проведенной в июле 2000 г. в прибрежной зоне Южного берега Крыма. Изучена структура полей уровня и течений в зависимости от действующего ветра. В поле течений обнаружены и исследованы мезомасштабные структуры, которые соответствуют наблюдениям и отсутствуют в экспериментах с более грубым разрешением.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: численное моделирование, прибрежная зона, ассимиляция данных наблюдений, мезомасштабные вихри.

Введение. В прибрежной зоне Черного моря регулярно выполняются экспедиционные наблюдения, однако до настоящего времени обработка данных съемок с помощью гидротермодинамических моделей не проводилась. Синтез численной модели динамики и данных наблюдений позволяет восстановить трехмерные поля температуры, солености и течений, непрерывные по времени и пространству, и поле вертикальной скорости, которое не измеряется.

Гидрологическая съемка проводилась в прибрежной области Южного берега Крыма (ЮБК), ее схема изображена на рис. 1.

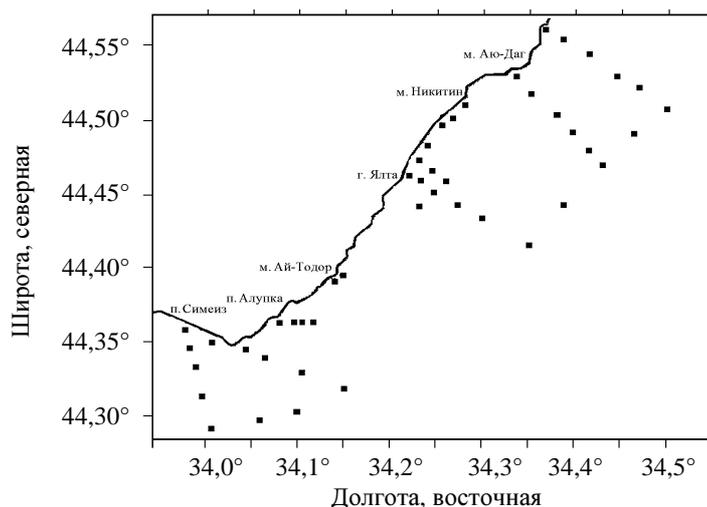


Рис. 1. Схема расположения океанографических станций, выполненных на НИС «Нептун» в прибрежном районе ЮБК в июле 2000 г.

Среди данных наблюдений, имеющихся в банке данных Морского гидрофизического института (МГИ) НАН Украины [1] за период с 2000 по 2009 гг., для анализа выбрана гидрологическая съемка, которая была наиболее всего обеспечена данными по температуре и солёности и где наблюдалась значительная мезомасштабная изменчивость (июль 2000 г.).

Качественные характеристики термохалинной структуры и динамики вод прибрежных зон ЮБК изучались в работах [2, 3], однако пространственно-временная изменчивость гидрофизической структуры шельфа Черного моря на масштабах 1 – 10 км и 1 – 100 час остается малоисследованной.

Для исследуемого района ЮБК в [3, 4] с помощью гидродинамической модели, основанной на линейных уравнениях мелкой воды с учетом сил трения, проведены расчеты циркуляции с пространственным шагом 2 км для трех направлений ветра и различными профилями скорости климатических течений на жидких границах. Из анализа многолетней геострофической циркуляции в выбранном районе выделено три вида течений: Основное Черноморское течение (ОЧТ) с хорошо выраженным струйным профилем скорости к берегу (для февраля), Ялтинский антициклонический круговорот (наиболее развит в ноябре), локальные круговороты в прибрежной зоне и ослабленное ОЧТ (в летний период). Отмечено, что рельеф дна является важным фактором при формировании циркуляции у ЮБК.

В настоящей работе гидродинамическая модель МГИ НАН Украины [5], адаптированная к условиям прибрежной зоны ЮБК, с процедурой ассимиляции данных измерений температуры и солёности используется для восстановления гидрофизических полей с высоким разрешением в июле 2000 г. Особое внимание уделяется изучению мезомасштабных структур, формирующихся в полях течений в прибрежной области Черного моря, определяются их кинематические характеристики и время существования.

Описание гидрологической съемки в прибрежной зоне Черного моря в июле 2000 г. В период с 11 по 15 июля 2000 г. проводилась гидрологическая съемка прибрежной области Черного моря (см. рис. 1) на НИС «Нептун», принадлежащем морской гидрометеостанции Ялты, с использованием CTD-комплекса (*Conductivity, Temperature and Depth* – измеритель электропроводности, температуры и глубины) [6]. В задачи экспедиции входило изучение вертикальной и горизонтальной термохалинной структуры вод прибрежной зоны ЮБК в летний сезон. В ходе экспедиции была получена информация о пространственно-временной изменчивости гидрологических полей, исследовано влияние вдольбереговых ветров на эволюцию апвеллинга.

Опишем метеорологические условия, в которых проводилась данная экспедиция. В период времени 11 – 15 июля 2000 г. поля напряжения трения ветра характеризовались высокой изменчивостью и неравномерностью, скорость изменялась от нулевых значений до штормовых [6].

11 июля и в первой половине дня 12 июля преобладали южные и юго-западные ветры со скоростью 3 – 6 м/с, во второй половине дня 12 июля – юго-восточные и восточные ветры с максимальной скоростью 6 м/с, действие которых в течение 13 июля усиливалось и достигало значения 15 м/с на западе области. В ночь на 14 июля, направление ветра изменилось на запад-

ное и юго-западное, и, как указано в [6], над центральными районами Черного моря наблюдалось прохождение холодного участка фронта, который вызвал усиление ветра до 20 м/с на востоке области и штормовое волнение до 5 баллов днем 14 июля. В связи с этим работы экспедиции были приостановлены. В ночь с 14 на 15 июля шторм прекратился; в течение 15 июля при северо-восточном ветре 2 – 5 м/с съемка была продолжена.

Приведем краткую характеристику данных измерений температуры и солёности в июле 2000 г., имеющихся в банке данных МГИ НАН Украины [1]. Всего в ходе экспедиции на НИС «Нептун» [6, 7] для выбранной области было выполнено 52 станции (см. рис. 1). Глубина, до которой проводились зондирования, изменялась от 13 до 70 м. Выделялось два этапа выполнения работ – у Симеиза и Алупки (11 – 12 июля, до шторма) и от Ялтинского залива до мыса Аю-Даг (13 июля и после шторма 15 июля).

По данным измерений поверхностная температура изменялась от 21 до 24 °С, поверхностная солёность – от 17,6 до 17,9 ‰. На всех рассматриваемых станциях наблюдался слой скачка на глубине 11 – 27 м в зависимости от расположения станции: в прибрежных областях пикноклин заглублен до 22 – 27 м, в мористых районах съемки – максимально приподнят до 11 – 18 м. Средний перепад в значениях температуры в слое скачка составлял 8 – 10 °С, в значениях солёности – 0,7 – 1 ‰.

Анализ выполненных измерений в [6, 7] выявил высокую изменчивость динамических процессов в прибрежной зоне ЮБК, обнаружены, в частности, прибрежные вихревые образования и зоны апвеллинга, определяющие распределение, аккумуляцию и перенос вод с различными свойствами. Установлено, что циркуляция прибрежного антициклонического вихря является одной из внутренних причин, создающей условия для развития апвеллинга у берегов Крыма.

Условия проведения численного эксперимента. Рассматривалась область Черного моря, расположенная между параллелями 44,25° с.ш. и 44,72° с.ш. и меридианами 33,95° в.д. и 34,55° в.д.

Система уравнений модели в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости морской воды представлена в [5]. В уравнениях движения и переноса тепла и соли использовалось гармоническое представление турбулентных слагаемых. Краевые условия на поверхности, на дне и на твердых боковых стенках также описаны в [5]. Численная схема модели подробно описана в [5, 11] с указанием проведенных преобразований, учитывающих задание скоростей, температуры и солёности на открытых границах.

Так как для выбранного периода времени отсутствуют данные расчетов для всего Черного моря с шагом 5 км, для задания граничных условий на жидких границах были выбраны следующие условия для компонент скорости: $\partial u/\partial n = 0$, $\partial v/\partial n = 0$. Для температуры и солёности на участках, где вода втекает, использовались условия $\partial T/\partial n = 0$, $\partial S/\partial n = 0$; для определения температуры и солёности на открытых границах, где вода вытекает, задавались условия излучения с использованием центральной явной схемы для расчета скорости переноса возмущений.

Для получения начальных полей u , v , ζ , T и S для численного эксперимента были проведены следующие вспомогательные расчеты.

1. Полагали $u = v = 0$, $\zeta = 0$. В качестве исходных полей температуры и солёности использовались климатические поля, рассчитанные по модели для всего моря с шагом 5 км в работе [10] для 11 июля. Эти поля были линейно проинтерполированы на сетку с высоким разрешением и выбраны значения, попадающие в рассматриваемую область.

2. Для всех горизонтов, где имелись данные измерений, была проведена процедура оптимальной интерполяции данных натурных наблюдений 11 – 13 июля 2000 г. (до шторма), отнесенных к одному моменту времени. Сформированные поля T и S далее использовались на втором этапе построения начальных полей.

3. Система уравнений модели с указанными начальными условиями интегрировалась в течение 5 суток с краевыми условиями, которые не изменялись по времени. Из анализа графиков средней по объёму и на горизонтах кинетической энергии было установлено, что квазигеострофический баланс достигается через два дня. Полученные поля u , v , ζ , T и S принимались за начальные поля для основного эксперимента.

Численные эксперименты проводились с разрешением 350 м по осям x и y . Шаг по времени 10 с. Общее время интегрирования уравнений модели – 105 час (с 11 июля 13 час по 15 июля 22 час 2000 г.). По вертикали горизонтальные составляющие скорости течений, температура и солёность рассчитывались для 38 горизонтов: 1; 3; 5; 7; 10; 13; 16; 20; 25; 30; 36; 42; 48; 55; 65; 80; 95; 120; 150; 200; 300; ... 2000 м. Вертикальная компонента скорости высчитывалась для промежуточных горизонтов.

Для коэффициентов турбулентной вязкости и диффузии по горизонтали выбраны значения $\nu_H = 15 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{с}$, $\kappa_H = 35 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{с}$. Коэффициенты турбулентного обмена импульсом и диффузии по вертикали до глубины 100 м рассчитывались с аппроксимацией Филандера-Пакановского [12] с параметрами $R_0 = 1$, $\nu_0^V = 5 \text{ см}^2/\text{с}$, $\nu_0^S = 5 \text{ см}^2/\text{с}$, $\nu_0^T = 5 \text{ см}^2/\text{с}$, $\nu_1 = 5 \text{ см}^2/\text{с}$, $\kappa_1^S = 2 \text{ см}^2/\text{с}$, $\kappa_1^T = 2 \text{ см}^2/\text{с}$. Для горизонтов ниже 100 м полагали $\nu_V = 1 \text{ см}^2/\text{с}$, $\kappa^S = 1 \text{ см}^2/\text{с}$, $\kappa^T = 1 \text{ см}^2/\text{с}$.

На поверхности моря каждый час задавались поля тангенциального напряжения трения ветра, потоки тепла, коротковолновой радиации, осадки и испарение, полученные с разрешением $0,01^\circ$ сотрудниками отдела взаимодействия атмосферы и океана МГИ НАН Украины и линейно проинтерполированные на выбранную сетку.

Для реализации процедуры усвоения данных натурных наблюдений использовалась упрощенная процедура четырехмерного анализа [13, 14], в которой ковариационные функции полей температуры и солёности рассчитывались в предположении однородности и изотропности.

По результатам предварительных экспериментов было установлено, что если проводить ассимиляцию данных в момент измерения, их влияние на гидрофизические поля будет несущественно, поэтому все данные гидрологической съемки были сгруппированы следующим образом: 11 июля в 16 час (4 стан-

ции), 12 июля в 12 час (6 станций), 12 июля в 16 час (7 станций), 13 июля в 9 час (5 станций), 13 июля в 14 час (5 станций), 15 июля в 7 час (10 станций), 15 июля в 12 час (8 станций), 15 июля в 15 час (7 станций). Таким образом, в выбранные моменты ассимиляции осуществлялась коррекция полей температуры и солености. После каждого усвоения данных гидрологической съемки проводилась процедура согласования гидрофизических полей. Она заключалась в интегрировании уравнений модели с краевыми условиями, которые не изменялись, до времени достижения квазипериодического режима интегральной характеристики: средней по объему и по горизонтам кинетической энергии (для каждого момента усвоения данных это время не превышало 1 сутки).

Поля приведенного уровня. Проанализируем изменения в полях уровня в зависимости от направления действующего ветра. На рис. 2 представлены поля уровня, полученные 11 июля в 16 час, 12 июля в 07 час, 12 июля в 13 час, 13 июля в 16 час, 14 июля в 13 час и 15 июля в 13 час.

11 июля под действием южного ветра, действующего с 13 до 16 час с максимальной скоростью 5,6 м/с, максимальные значения нагонов сформировались вблизи г. Ялта (до 1,46 см) (рис. 2, *a*), максимальные отрицательные значения ζ – у юго-восточной границы (до -1,35 см).

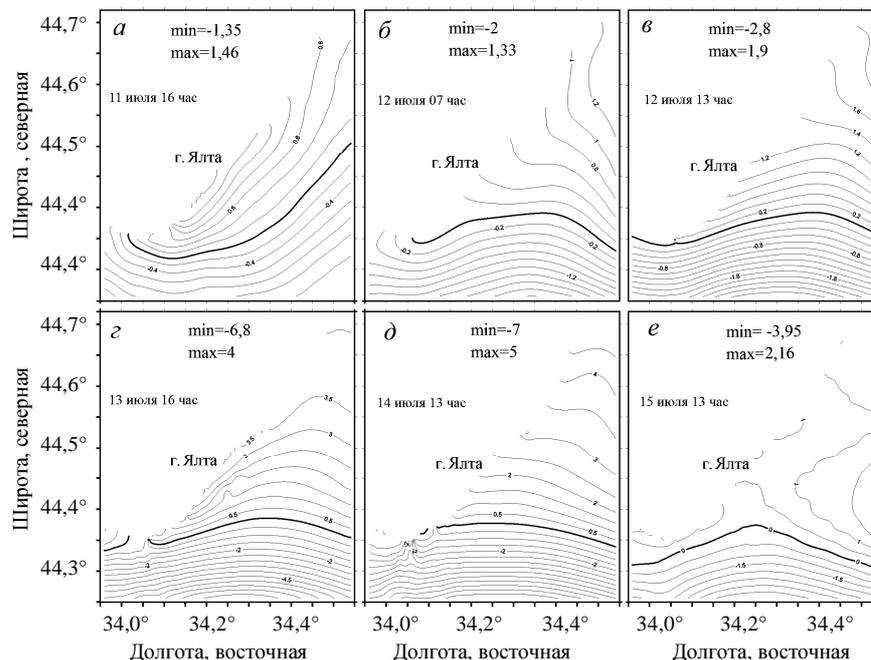


Рис. 2. Поля уровня (см), сформировавшиеся 11 июля в 16 час (*a*), 12 июля в 07 час (*б*), 12 июля в 13 час (*в*), 13 июля в 16 час (*г*), 14 июля в 13 час (*д*) и 15 июля в 13 час (*е*) 2000 г.

С 11 июля 16 час по 12 июля 07 час над поверхностью моря преобладал юго-западный ветер с максимальной скоростью 4 м/с. Поле уровня, сформировавшееся под его действием, представлено на рис. 2, *б* (максимальные положительные значения ζ отмечались у восточной границы области, мак-

симальные отрицательные – у южной границы). 12 июля с 08 до 13 час направление ветра изменилось на южное и юго-восточное, и указанные ветры действовали с максимальной скоростью 3,7 м/с. Качественные изменения в поле уровня для 12 июля 13 час по сравнению с полем, представленным на рис. 2, б, заметны севернее $44,4^\circ$ (см. рис. 2, в).

В период с 12 июля 13 час по 14 июля 01 час господствовали юго-восточные, северо-восточные и восточные ветры, максимальная скорость действия которых 13 июля 16 час увеличилась до 15 м/с. В поле уровня (см. рис. 2, г) максимальные по модулю значения ζ достигали 6,8 см (вблизи южной границы).

14 июля с 07 час действовали западные и юго-западные ветры, скорость которых в 13 час увеличилась до 20 м/с. В поле уровня, сформировавшемся в это время (см. рис. 2, д), заметны качественные отличия по сравнению с полем, показанном на рис. 2, г, в частности: вблизи меридиана $34,05^\circ$ в.д. происходило более интенсивное сгущение изолиний при приближении к береговой линии. Максимальные положительные значения ζ (5 см) отмечались на северо-востоке области, максимальные отрицательные (-7 см) – у южной границы.

15 июля с 07 до 22 час над поверхностью моря преобладал северо-восточный ветер, сила действия которого максимальна в 13 час – 7 м/с. Поле уровня, рассчитанное для этого времени, представлено на рис. 2, е. Максимальные по модулю значения ζ не превышали 4 см (вблизи южной границы). Отметим качественные изменения в структуре поля уровенной поверхности севернее параллели $44,4^\circ$ с.ш. по сравнению с полями, рассчитанными до действия штормового ветра (см. рис. 2, а – д).

Поля течений. Согласно [6], в прибрежной зоне ЮБК, между мысами Кикинеиз и Аю-Даг, в июле 2000 г. особенности динамики вод определялись следующими факторами:

- интенсивным потоком ОЧТ на запад и юго-запад, который непосредственно приближался к берегу в районе свала глубин у мыса Аю-Даг;
- неравномерным ветром, скорость которого изменялась от нулевых до экстремальных значений (при действии штормового вдольберегового юго-западного ветра);
- влиянием на ОЧТ очертаний береговой линии ЮБК и неоднородностей рельефа.

В рассматриваемый период времени над поверхностью моря действовали южный, юго-западный, юго-восточный, северо-восточный и западный ветры. Изучим изменения в полях течений, сформировавшихся под их влиянием. На рис. 3 представлены поля поверхностных течений, полученные 11 июля в 16 час, 12 июля в 07 час, 12 июля в 13 час, 13 июля в 16 час, 14 июля в 13 час и 15 июля в 13 час (изображается каждая четвертая стрелка).

При южном ветре, действующем 11 июля с 13 до 16 час (максимальное значение 5,6 м/с), направление движения течений (см. рис. 3, а) на севере совпадало с действующим ветром, в остальной части области течения ориентированы на северо-запад и запад. Максимальные значения скорости достигались в районе Симеиза – Алупки (до 17 см/с). Ниже горизонта 10 м ос-

новное направление течений – юго-западное, максимумы значений скорости на горизонте 10 м 11 июля в 16 час (вблизи Симеиза – Алупки) – 18 см/с, на горизонте 65 м – 9 см/с, на горизонте 300 м – 3 см/с.

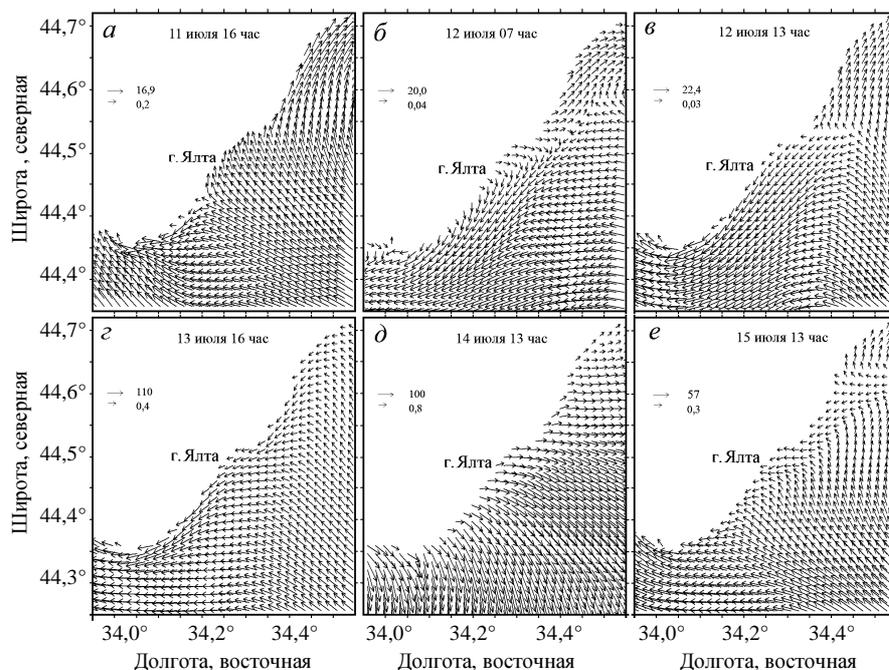


Рис. 3. Поля поверхностных течений (см/с), сформировавшиеся 11 июля в 16 час (а), 12 июля в 07 час (б), 12 июля в 13 час (в), 13 июля в 16 час (г), 14 июля в 13 час (д) и 15 июля в 13 час (е) 2000 г.

Поле течений на верхнем горизонте, сформировавшееся под действием юго-западного ветра 12 июля в 07 час (максимальная скорость 3 м/с), представлено на рис. 3, б. Основное направление течений – юго-западное, максимальные значения скорости до 20 см/с наблюдались вблизи открытой южной границы. Как указано в [6], разнонаправленные потоки вдольберегового дрейфового течения под влиянием юго-западного ветра и ОЧТ, распространяющегося с северо-востока, являлись причиной формирования динамической структуры с антициклонической завихренностью в Ялтинском заливе (расположенном между 44,4 и 44,52° с.ш.). По модельным расчетам указанное динамическое образование вблизи г. Ялта существовало в верхнем пятиметровом слое в период с 11 июля 19 час по 12 июля 10 час при действии юго-западного ветра. На западе области (район Симеиза) отчетливо прослеживалась на верхнем горизонте и до глубины 25 м динамическая структура с антициклонической завихренностью.

12 июля в период с 08 час до 13 час действующие южный и юго-восточный ветры (максимальная скорость 3,7 м/с) и поток ОЧТ направляли течения на юго-запад (см. рис. 3, в), севернее 44,55° с.ш. течения ориентированы по ветру), максимальные значения скорости 22 см/с отмечались вблизи западной границы. Ниже горизонта 10 м течения направлены на юго-запад.

Однонаправленный поток ОЧТ и северо-восточный ветер, действующий с максимальной скоростью 15 м/с, 13 июля 16 час привели к увеличению скорости течений на западе области на верхнем горизонте до 110 см/с (см. рис. 3, *з*), на горизонте 10 м до 70 см/с, на горизонте 30 м до 60 см/с, основное направление течений – юго-западное. В слое воды 10 – 65 м на западе сформировалась структура с антициклонической завихренностью.

Поле течений на верхнем горизонте, сформировавшееся под действием западных ветров с максимальной скоростью 20 м/с, для 14 июля 13 час представлено на рис. 3, *д*. Отметим, что в выбранный период времени ветер оказывал преобладающее влияние на формирование циркуляции на верхних горизонтах. Максимальные значения скорости поверхностных течений достигали 100 см/с вблизи открытых южной и восточной границ. Ниже горизонта 10 м течения направлены на юго-запад. Максимум скорости течений на горизонте 10 м – 80 см/с, на горизонте 30 м – 70 см/с.

Поле течений на верхнем горизонте, сформировавшееся под действием северо-восточного ветра с максимальной скоростью 7 м/с, 15 июля 13 час представлено на рис. 3, *е*. Под действием потока ОЧТ и северо-восточного ветра, поверхностные течения направлены на запад, где скорость течений достигала 57 см/с. Севернее параллели 44,63° с.ш. течения направлены на северо-восток.

Оценим вклад слагаемых $(v_V u_z)_z$ и $(v_V v_z)_z$, в которых учитываются касательные напряжения трения ветра, а также вклад слагаемых $-g\zeta_x - (P')_x / \rho_0$ и $-g\zeta_y - (P')_y / \rho_0$, в которых учитываются градиенты плотности, при расчете u_t и v_t .

На рис. 4, *а* и *б* представлены графики изменения со временем экстремальных значений проекций касательного напряжения трения ветра на ось x и y соответственно. На рис. 4, *в* и *г* представлены графики изменения со временем осредненных по площади слагаемых $(v_V u_z)_z$ и $(v_V v_z)_z$ (штриховые линии), $-g\zeta_x - (P')_x / \rho_0$ и $-g\zeta_y - (P')_y / \rho_0$ (сплошные тонкие линии), u_t и v_t (сплошные толстые линии) на горизонте 1 м.

Из анализа графиков, построенных для верхнего горизонта (см. рис. 4, *в* и *г*) и остальных горизонтов, отметим, что при расчете u_t в верхнем слое (см. рис. 4, *в*) учет напряжений трения ветра вносил существенный вклад 13 и 14 июля (когда сила ветра максимальна), на горизонтах ниже 10 м вклад слагаемых $(v_V u_z)_z$ и $(v_V v_z)_z$ незначителен. При расчете v_t значительный вклад вносили слагаемые $-g\zeta_y - (P')_y / \rho_0$ (см. рис. 4, *г*).

Согласно данным спутниковой съемки, выполненной в инфракрасном (ИК-) диапазоне, после шторма в ночь с 14 на 15 июля у западной части ЮБК наблюдалась зона апвеллинга с выходом на поверхность вод с температурой ниже 20°C, что подтверждается результатами численного расчета. На рис. 5 представлены поля температуры на горизонте 1 м, полученные с периодом с 14 июля 16 час по 15 июля 07 час с дискретностью 3 часа. Отметим, что 14 июля в 13 час значения температуры ниже 20°C достигались лишь в нескольких точках области, с течением времени область пониженных значений T увеличивалась (см. рис. 5, *а – д*), и в 15 июля 04 час достигалось минимальное значение поверхностной температуры – 15,9°C (рис. 5, *е*).

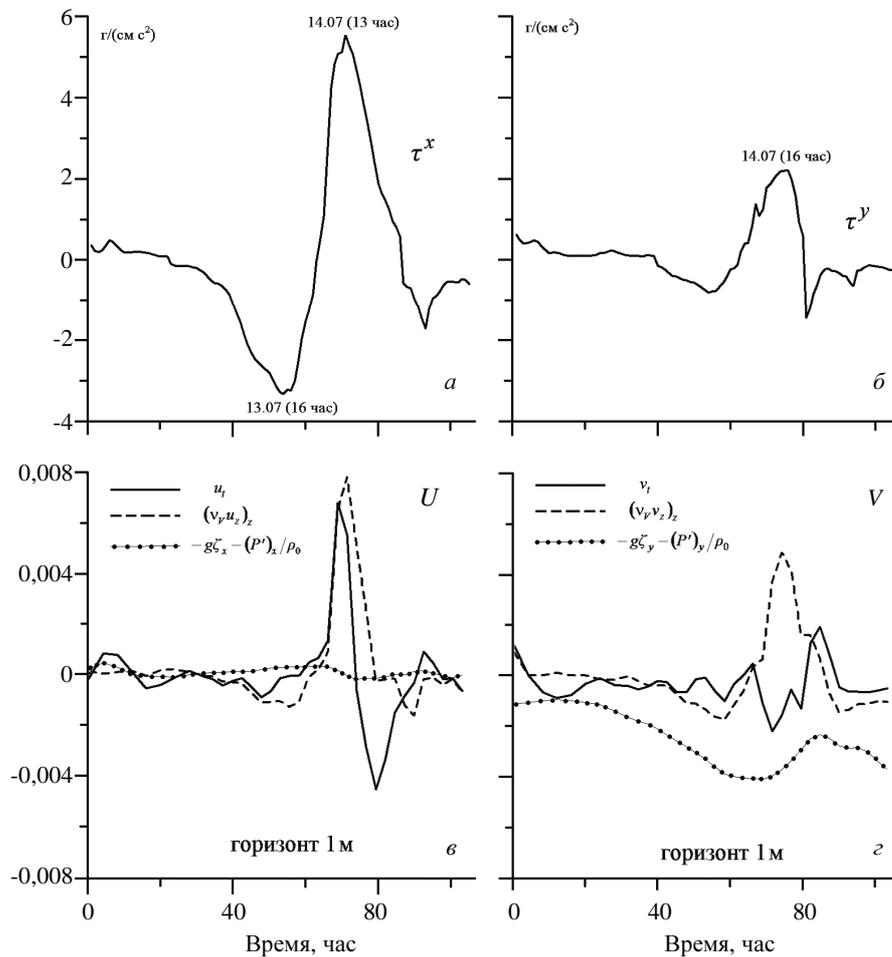


Рис. 4. Графики изменения со временем: *a* – экстремальных значений τ_x , *б* – экстремальных значений τ_y , *в* – осредненных по площади слагаемых $(v_v u_z)_z$, $-g\zeta_x - (P')_x / \rho_0$, u_t на верхнем горизонте, *г* – осредненных по площади слагаемых $(v_v v_z)_z$, $-g\zeta_y - (P')_y / \rho_0$, v_t на верхнем горизонте.

Анализ рассчитанных модельных полей течений 14 июля подтвердил наличие в районе Симеиза – Алупки интенсивного вдольберегового потока (см., например, рис. 3, д), который стимулировал апвеллинг в результате экмановского эффекта. Воздействие штормового юго-западного ветра 14 июля усилило этот эффект, и утром 15 июля сформировался интенсивный апвеллинг.

Завершая анализ циркуляции в период с 11 по 15 июля 2000 г., отметим, что сформировалась и поддерживалась в течение расчетного периода циклоническая завихренность в полях течений, и только воздействие интенсивных юго-западных и западных ветров (в период с 14 июля 10 час по 14 июля 22 час) привело к качественным изменениям в структуре полей в верхнем 10-метровом слое (см. рис. 4, e) – циркуляция стала антициклонической.

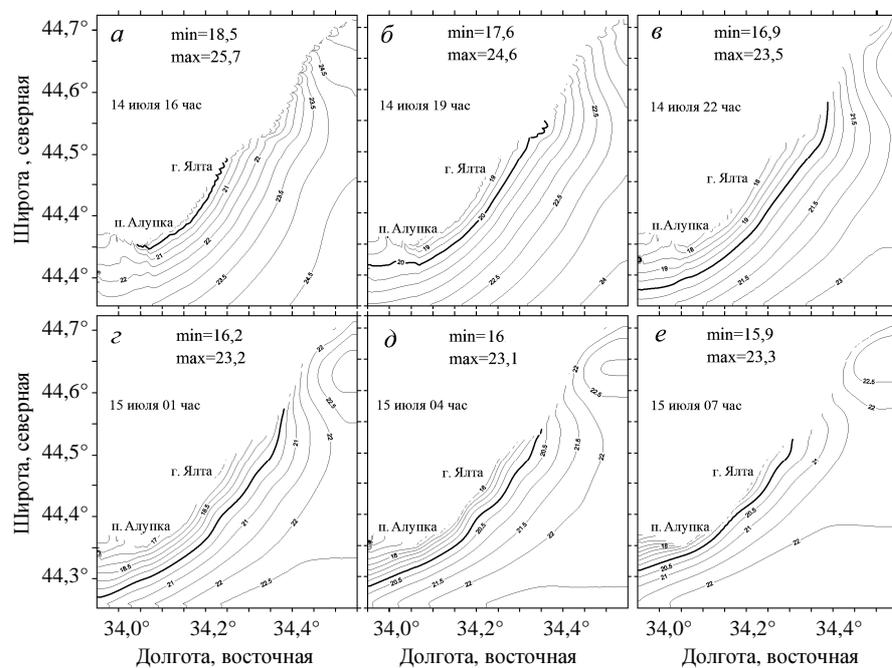


Рис. 5. Поля поверхностной температуры (в °С), сформировавшиеся 14 июля в 16 час (а), 14 июля в 19 час (б), 14 июля в 22 час (в), 15 июля в 01 час (г), 15 июля в 04 час (д) и 15 июля в 07 час (е) 2000 г.

Отметим основные особенности, обнаруженные в полях течений. Кроме упомянутой динамической структуры с антициклонической завихренностью в Ялтинском заливе (см. рис. 3, г), в полях течений у западного берега сформировались мезомасштабные антициклонические образования, отмеченные по данным наблюдениям в [6, 7]. В [6] отмечено, что генерация таких мезомасштабных образований может быть следствием влияния на ОЧТ выступов берегов. Эти явления являлись причиной того, что вдольбереговое течение у западного берега могло менять направление с юго-западного на юго-восточное и восточное. По результатам численного расчета эти структуры сформировались в периоды времени с 01 час 12 июля по 07 час 12 июля и с 07 час 13 июля по 10 час 15 июля в слое воды 1 – 65 м. В качестве иллюстрации приведем фрагменты полей течений, рассчитанные для 04 час 12 июля на разных горизонтах (на рис. 6 изображена каждая вторая стрелка).

В [13] упомянутые антициклонические динамические структуры выделялись как области максимального заглубления изопикнической поверхности, пониженным солезапасом и максимальным теплозапасом, а также делается вывод, что указанные антициклонические динамические образования создали необходимые условия для формирования апвеллинга (приподнятый к поверхности тонкий термоклин и интенсивный вертикальный обмен, ослабивший устойчивость вод в слое пикноклина).

Как известно, между стрежнем ОЧТ и берегом существует зона антициклонической завихренности поля течений.

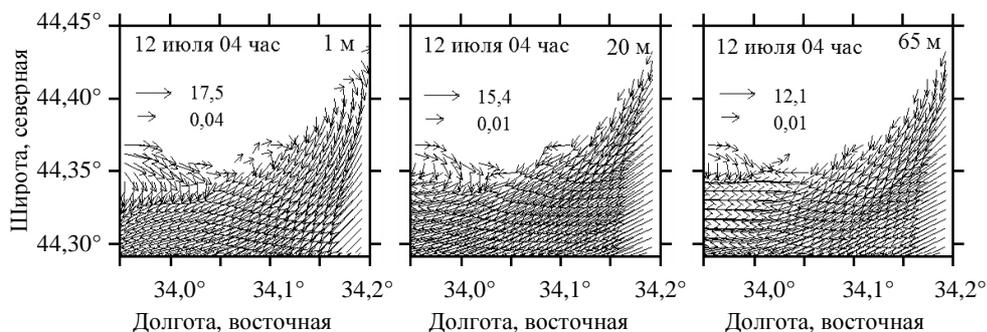


Рис. 6. Фрагменты полей течений (в см/с), наблюдавшиеся в 04 час 12 июля 2000 г. на горизонтах 1, 20 и 65 м.

В рассматриваемый период времени сформировались прибрежные вихревые образования и антициклонические вихри в открытом море с диаметром около 8 км на разных горизонтах ниже глубины 40 м как результат влияния на ОЧТ неоднородностей рельефа дна и береговой орографии. В качестве примера на рис. 7 приведем фрагменты полей течений (на рис. 7 изображена каждая вторая стрелка), на которых отчетливо прослеживались указанные элементы циркуляции на горизонтах 42, 65, 95, 150, 400 и 700 м, полученные 11 июля в 16 час и 19 час, 13 июля в 13 час и 19 час и 15 июля в 04 час.

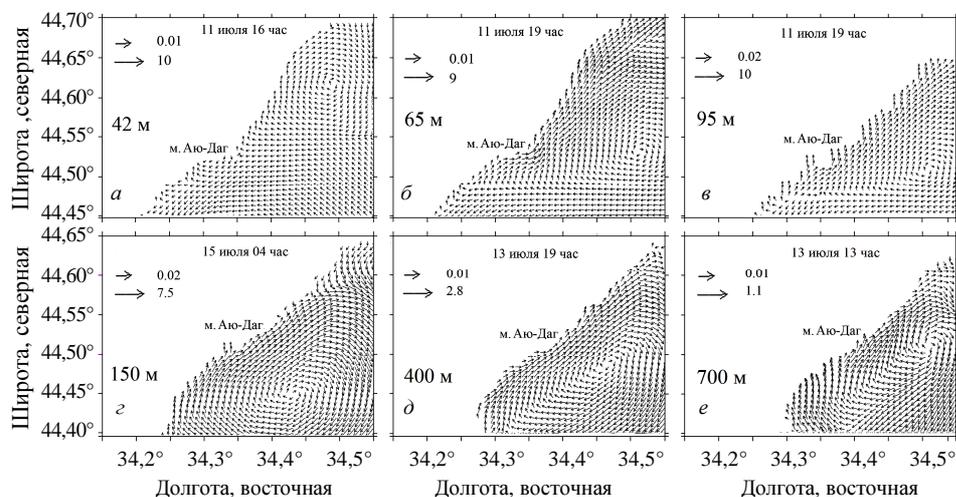


Рис. 7. Поля течений (в см/с): а – 11 июля в 16 час на горизонте 42 м, б – 11 июля в 19 час на горизонте 65 м, в – 11 июля в 19 час на горизонте 95 м, г – 15 июля в 04 час на горизонте 150 м, д – 13 июля в 19 час на горизонте 400 м, е – 13 июля в 13 час на горизонте 700 м.

В слое воды, охватывающем глубины 42 – 95 м, (см. рис. 7, а, б, в) вихревые образования существовали 11 июля с 16 до 22 час, в слое с глубинами от 100 до 200 м в центральной части области антициклонического вихря сформировались 15 июля с 04 по 13 час (см. рис. 7, г), а в слое воды с глубинами от 300 до 700 м (см. рис. 7, д, е) – в период с 16 час 13 июля по 13 час 14 июля.

Заключение. На основе гидродинамической модели с усвоением данных наблюдений при учете реального атмосферного воздействия в прибрежном районе ЮБК рассчитаны гидрофизические поля с пространственным разрешением 350×350 м по горизонтали и 38 горизонтов по вертикали в период с 11 по 15 июля 2000 г. Полученные результаты согласуются с результатами, представленными в работах [4, 6, 7].

Результаты численного расчета подтвердили формирование в западной части ЮБК зоны апвеллинга (с выходом на поверхность вод вдоль всего побережья с температурой ниже 20°C в ночь на 15 июля 2000 г.), которая наблюдалась по спутниковым наблюдениям, и позволили проанализировать распространение холодных вод на поверхности моря.

Показано, что изменение метеоусловий привело к качественным изменениям в структуре полей приведенного уровня, в частности, при действии штормового ветра – к сгущению изолиний при приближении к берегу. Максимальные по модулю значения ζ достигали 7 см вблизи южной открытой границы.

Получено, что в рассматриваемый период ОЧТ оказывало преобладающее влияние на формирование циркуляции вод, и только воздействие интенсивных юго-западных и западных ветров (с максимальной скоростью до 20 м/с) привело к качественным изменениям в структуре полей течений в верхнем 10-метровом слое. Действие этих ветров привело к увеличению скорости течений на верхнем горизонте до 1 м/с. Ниже горизонта 10 м основное направление течений – юго-западное и западное.

В районе г. Ялта в верхнем пятиметровом слое сформировалась динамическая структура с антициклонической завихренностью как результат взаимодействия разнонаправленных потоков дрейфового течения под влиянием юго-западного ветра и ОЧТ, распространяющегося с северо-востока, определено время ее существования.

В слое воды 1 – 65 м в районе Симеиза – Алупки при влиянии на ОЧТ выступов берега могли генерироваться мезомасштабные антициклонические образования. Ниже глубины 40 м влияние на ОЧТ неоднородностей рельефа дна и конфигурации побережья привело к формированию прибрежных вихревых образований и антициклонических вихрей в открытом море.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суворов А.М., Андрющенко Е.Г., Годин Е.А. и др. Банк океанологических данных МГИ НАНУ: содержание и структура баз данных, система управления базами данных // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2003. – С. 130-137.
2. Зац В.И., Лукьяненко О.Я., Яцевич Г.В. Гидрометеорологический режим Южного берега Крыма. – Л.: Гидрометеоздат, 1966. – 124 с.
3. Блатов А.С., Иванов В.А. Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря. – Киев: Наукова думка, 1992. – 244 с.
4. Иванов В.А., Новичихина А.Н., Хмара Т.В. Численное моделирование динамики наносов в прибрежной зоне Южного берега Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2000. – Вып. 2. – С. 283-292.
5. Демьшев С.Г., Кортаев Г.К. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана на сетке S // Численные модели и результаты

- калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. – М.: Изд. ИВМ. – 1992. – С. 163-231.
6. Ильин Ю.П., Репетин Л.Н., Романов А.С., Губарь Г.А. Океанографические исследования прибрежной зоны Южного Берега Крыма с применением современных технологий судовых и спутниковых измерений // Научные труды УкрНИГМИ. – 2000. – Вып. 248. – С. 228-241.
 7. Репетин Л.Н., Романов А.С., Чурилова Т.Я. Апвеллинг в зоне антициклонической завихренности на шельфе Южного Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2010. – Вып. 22. – С. 205-227.
 8. Демьшев С.Г., Коротаев Г.К., Кныш В.В. Моделирование сезонной изменчивости температурного режима верхнего деятельного слоя Черного моря // Известия РАН, серия: Физика атмосферы и океана. – 2004. – Том 40, № 2. – С. 259-270.
 9. Яковлев Н.Г. Численная модель и предварительные результаты расчетов по воспроизведению летней циркуляции вод Карского моря // Известия РАН, серия: Физика атмосферы и океана. – 1996. – Том 32, № 5. – С. 714-723.
 10. Демьшев С.Г., Иванов В.А., Маркова Н.В., Черкесов Л.В. Построение поля течений в Черном море на основе вихреразрешающей модели с ассимиляцией климатических полей температуры и солёности // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2007. – Вып. 15. – С. 215-226.
 11. Демьшев С.Г., Евстигнеева Н.А. Численная баротропная модель течений на шельфе Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2009. – Вып. 19. – С. 78-86.
 12. Pacanowski R.C., Philander S.G.H. Parameterization of vertical mixing in numerical models of tropical oceans // J. Phys. Oceanogr. – 1981. – Vol. 11, № 11. – P. 1443-1451.
 13. Кныш В.В., Моисеенко В.А., Саркисян А.С. и др. Комплексное использование измерений на гидрофизических полигонах океана в четырехмерном анализе // Докл. АН СССР. – 1970. – Том 4. – С. 832-836.
 14. Саркисян А.С., Кныш В.В., Демьшев С.Г. и др. Многоэлементный четырехмерный анализ гидрофизических полей на основе динамико-стохастических моделей // Итоги науки и техники. Атмосфера, океан, космос. – 1987. – Том 9. – С. 5-64.

Материал поступил в редакцию 16.11.2012 г.

АНОТАЦІЯ На основі гідродинамічної моделі, що включає нелінійні рівняння руху, рівняння адвекції тепла і солі і процедури асиміляції, проведений чисельний експеримент з високим дозволом (350 м по горизонталі і 38 горизонтів по вертикалі) із засвоєнням даних спостережень гідрологічної зйомки, проведеної в липні 2000 р. в прибережній зоні Південного берега Криму. Вивчена структура полів рівня і течій залежно від вітру, що діє. У полі течій виявлені і досліджені мезомасштабні структури, які відповідають спостереженням і відсутні в експериментах з грубішим розрізненням.

ABSTRACT On the basis of hydrodynamic model, including nonlinear equations of motion, equations of warm advection and salt and assimilation procedure, a numeral experiment with high resolution (horizontal resolution 350 m and vertical resolution 38 horizons) with assimilation of data observations of hydrological survey, which was held in July, 2000 in the coastal zone of the South bank of the Crimea, is conducted. The structure of the fields of level and currents is studied depending on acting wind. Mesoscale structures, which correspond to the supervisions and are absent in experiments with more rough resolution, are discovered and investigated in the field of currents.