

Прибрежная зона моря имеет важнейшее значение для жизнедеятельности людей. Развитие туризма, рыболовства и рыбозахвата, строительство прибрежных и портовых сооружений, добыча полезных ископаемых делают актуальными вопросы экологического мониторинга, охраны и рационального использования природных ресурсов. Решение этих вопросов неразрывно связано с задачами исследования динамики вод в шельфовой области моря, их перемешивания и обмена с открытыми частями моря. В связи с этим изучение динамических процессов в прибрежных районах Черного моря занимает одно из ведущих мест в научных проектах, реализуемых в России и других странах.

В качестве объекта выбрана прибрежная зона Южного берега Крыма, расположенная между параллелями 44,25 и 44,72° с.ш. и меридианами 33,95 и 34,55° в.д., которая имеет важное народнохозяйственное значение. Анализ выполненных ранее измерений и спутниковых наблюдений в выбранной области выявил высокую изменчивость динамических процессов. В частности, были обнаружены, прибрежные вихревые образования, определяющие распределение, аккумуляцию и перенос вод с различными свойствами.

Известно, что вклад мезо- и субмезомасштабных структур (вихревые образования, струйные течения и фронтальные зоны) в суммарные гидрофизические поля существенен. Их изучение возможно на основе численных гидродинамических моделей, использующих высокое пространственное разрешение, детальное представление рельефа дна, обмен через открытые границы и т.д.

В настоящей работе гидродинамическая модель, разработанная в Морском гидрофизическом институте (Демышев, Коротаев, 1992), адаптированная к условиям прибрежной зоны, используется для получения массивов непрерывных по времени и пространству (с точностью до дискретных шагов модели) гидрофизических полей с высоким разрешением с учетом реального атмосферного воздействия в октябре 2006 г. В отличие от предыдущих работ, учитывается уточненный рельеф дна, полученный с помощью эхолотных промеров и оцифровкой навигационных карт.

Основной численный эксперимент проводится с пространственным разрешением 350 м. Шаг по времени 10 с. По вертикали горизонтальные составляющие скорости течений, температура и соленость рассчитываются 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 вычисляется для промежуточных горизонтов.

Система уравнений модели в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости морской воды в форме Громеки-Лэмба, краевые условия на поверхности, на дне и на твердых боковых стенках описаны в работе (Демышев, Коротаев, 1992). Для построения начальных полей u , v , ζ , T и S были использованы поля, рассчитанные по модели для всего моря с шагом 1,64 км для 1 октября 2006 г. Эти поля были линейно проинтерполированы на сетку с высоким разрешением и выбраны значения, попадающие в рассматриваемую область. Далее 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 объему и на горизонтах кинетической энергии было установлено, что

квазигеострофический баланс достигается через два дня. Полученные поля принимались за начальные поля для основного эксперимента.

Рассматриваемая область Черного моря, для которой максимальная глубина составляет 2 км, имеет три открытых границы: западную, южную и восточную. Для задания граничных условий на жидких границах были выбраны следующие условия. Для участков границы, где вода втекала в область, задавались компоненты скорости, температура, соленость; для участков границы, где вода вытекала из области, для u , v ставились условия свободного протекания для определения T и S на открытой границе задавались условия Орланского. Для коэффициентов турбулентной вязкости и диффузии по горизонтали выбраны значения $\nu_H = 35 \cdot 10^4 \text{ см}^2 / \text{с}$, $\kappa_H = 35 \cdot 10^4 \text{ см}^2 / \text{с}$. Коэффициенты турбулентного обмена импульсом и диффузии по вертикали рассчитывались с аппроксимацией Филандера – Пакановского. На поверхности моря каждые сутки задавались поля тангенциального напряжения трения ветра, потоки тепла, осадки и испарение, полученные по данным региональной атмосферной модели “ALADIN”. Общее время интегрирования уравнений модели – 1 месяц (с 1 по 31 октября 2006 г.).

Установлено, что особенности динамики вод определялись интенсивным потоком Основного Черноморского течения (ОЧТ) на запад и юго-запад, неравномерным ветром, скорость которого изменялась от нулевых до высоких значений; влиянием на ОЧТ очертаний береговой линии и неоднородностей рельефа. В течение расчетного периода наблюдалась циклоническая завихренность в полях течений и между береговой линией и ОЧТ формировались и развивались антициклонические вихри различных масштабов.

Получены круговороты с антициклоническим знаком завихренности, возникающие квазипериодически и перемещающиеся по направлению движения ОЧТ, возможным механизмом формирования которых являлась бароклинная неустойчивость. По модельным расчетам данные мезомасштабные динамические структуры вблизи г. Ялта существовали в период с 4 по 6 октября, с 13 по 17 октября и 25 по 27 октября 2006 г. Их диаметр достигал 30 км, глубина, до которой наблюдались вихри, – 95 м, максимальные значения скорости течений внутри вихря составляли 15 – 20 см/с на верхнем горизонте. Существование полученных вихрей не противоречило спутниковым наблюдениям за поверхностной температурой NOAA (разрешение 1 км). При сравнении полей течений, полученных в экспериментах с высоким и грубым разрешением, было получено качественное соответствие, однако вихрь, передвигающийся в юго-западном направлении в расчете с более грубым разрешением не всегда был воспроизведен или воспроизводился со смещением. В слое воды 5–100 м в западной части области динамическая структура с антициклонической завихренностью не была получена по модели с более грубым разрешением.

Особое внимание уделяется исследованию мезо- и субмезомасштабных структур в поле течений, не противоречащих данным наблюдений, которые ранее не наблюдались, либо были слабо заметны в других экспериментах. Определяются их кинематические характеристики и время существования, указываются возможные механизмы их формирования. Проводится сравнение полученных результатов с полями, рассчитанными по модели Черного моря с шагом 1,64 км для выбранной прибрежной области. С помощью специализированных численных расчетов оценивается влияние рельефа дна и использования высокого пространственного разрешения на точность моделирования гидрофизических полей.

Показано, что за счет мелкого шага сетки и уточненного рельефа дна описанная модель, адаптированная к условиям открытого моря, позволяет детально анализировать течения, температуру и соленость в мелководных районах и глубинных слоях, а также более точно

описать количественные и качественные характеристики вихрей по сравнению с проведенными ранее прогностическими расчетами.

Показано, что влияние орорафии берега на структуру течений может быть существенно. Выявлены области квазипериодического формирования мезомасштабных вихрей и получены новые элементы циркуляции, отсутствующие в ранее выполненных расчетах.

В полях течений в районе п. Симеиз генерировались мезомасштабные антициклонические образования с радиусами около 8 км в слое воды 1 – 65 м (рис. 1а), отмеченные по данным наблюдений. Эти явления являлись причиной того, что вдольбереговое течение у берега могло менять направление с юго-западного на юго-восточное и восточное. Были восстановлены также антициклонические вихри с диаметром около 8 км в Ялтинском заливе (рис. 1а и б) и антициклонические вихри с диаметром около 10 км в восточной части области (рис. 1б). Перечисленные особенности были получены только в эксперименте с высоким разрешением и уточненной батиметрией дна.

В рассматриваемый период времени в восточной части реконструированы субмезомасштабные особенности циркуляции с диаметрами менее 8 км в слое 1 – 95 м. Возможный механизм формирования – влияние на ОЧТ неоднородностей рельефа дна и береговой орорафии. Эти структуры малых размеров расположены в непосредственной близости от береговой черты и отличались непродолжительными временами жизни.

В полях течений в слое воды 300 – 600 м генерировались мезомасштабные особенности с диаметром около 10 км. В результатах других экспериментов такие структуры были получены в довольно сглаженном виде.

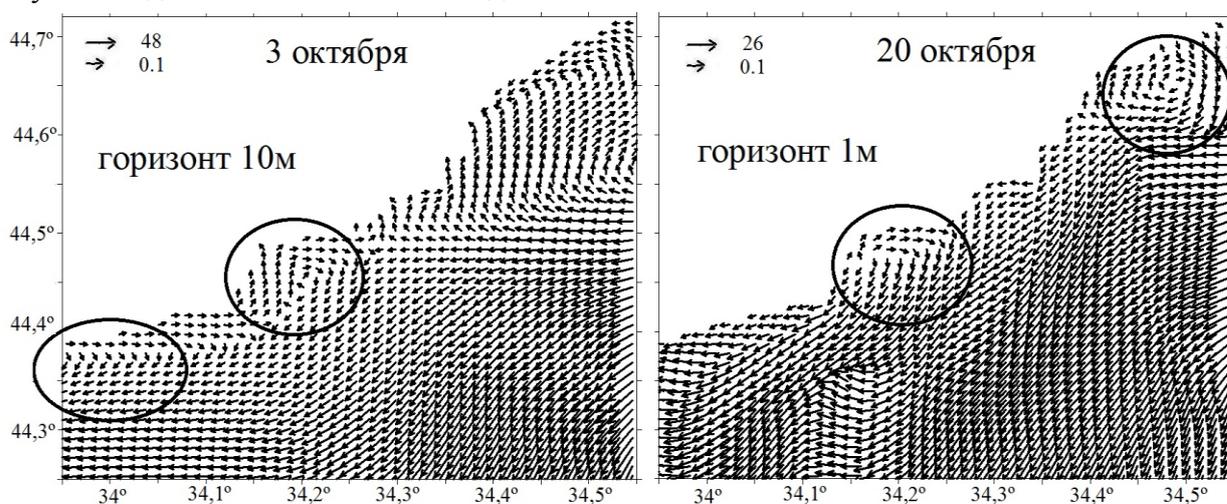


Рис. 1. Поля течений (см/с), рассчитанные 3 октября на горизонте 10 м и 20 октября на горизонте 1 м

При сравнении полей температуры и солености, рассчитанных в экспериментах с различными пространственными шагами, было получено качественное соответствие, однако в результатах расчета с более высоким разрешением более подробно воспроизводится структура термохалинных полей вдоль побережья. В частности, были более четко воспроизведены погранслои вдоль береговой черты и получена более сложная мезомасштабная структура полей.

Реконструированные поля течений в прибрежном районе Южного берега Крыма могут быть использованы при решении задач, связанных с гидротехническим проектированием, навигацией, добычей полезных ископаемых, а также при прогнозировании воздействия на морскую среду аварийных выбросов загрязняющих веществ и состояния морской экосистемы. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-05-05423 А“.