

С.Г.Демышев, Н.А.Евстигнеева

*Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь*

**АНАЛИЗ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ  
В РАЙОНЕ ЮЖНОГО БЕРЕГА КРЫМА НА ОСНОВЕ РАСЧЕТА  
С ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ**

На основе гидродинамической модели, разработанной в Морском гидрофизическом институте, с учетом реального атмосферного воздействия рассчитаны поля течений, температуры, солёности в осенний период в прибрежной зоне Южного берега Крыма. При расчете использовалось высокое разрешение (350 м по горизонтали и 38 горизонтов по вертикали) и учитывалось более детальное представление рельефа дна с разрешением ~500 м. Получены мезо- и субмезомасштабные особенности циркуляции, которые ранее не наблюдались либо были слабо заметны в других экспериментах. На основе анализа энергетических характеристик предложены возможные физические механизмы их формирования.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *численное моделирование, прибрежная зона, высокое пространственное разрешение, гидрофизические поля, энергетические потоки, мезомасштабная и субмезомасштабная изменчивость*

Качественные характеристики термохалинной структуры и динамики вод прибрежной зоны Черного моря на крупных и синоптических масштабах известны достаточно подробно [1 – 3], однако пространственно-временная изменчивость гидрофизических полей на шельфе на масштабах 1 – 10 км и 1 – 100 ч остается недостаточно изученной. В результате анализа спутниковых наблюдений и гидрологических измерений в зоне Южного берега Крыма обнаружены мезо- и субмезомасштабные прибрежные вихревые образования, струи, зоны апвеллинга [2, 4].

Исследованию этих особенностей прибрежной циркуляции посвящена настоящая работа, в которой для воспроизведения гидрофизических полей используется гидродинамическая модель, разработанная в Морском гидрофизическом институте (МГИ) [5] и адаптированная к условиям прибрежной зоны [6]. Численный расчет проводился для октября 2006 г. с учетом реального атмосферного воздействия и уточненного рельефа дна, полученного с помощью эхолотных промеров и оцифровкой навигационных карт [2]. На основе конечно-разностных аналогов уравнений изменения кинетической и потенциальной энергии рассчитываются энергетические характеристики циркуляции.

Численный эксперимент проводился с разрешением 350 м по горизонтали. Шаг по времени 10 с. Общее время интегрирования уравнений модели – 1 месяц (с 1 по 31 октября 2006 г.). 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 вычислялась 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 [5]. Приведенный уровень моря  $\zeta$  рассчитывался из дискретного аналога уравнения неразрывности с учетом задания скоростей на открытых границах. Для построения начальных полей  $u$ ,  $v$ ,  $\zeta$ ,  $T$  и  $S$  были использованы поля, рассчитанные по модели для всего моря с шагом 1,64 км для 1 октября 2006 г. [7]. Для задания граничных условий на трех жидких границах были выбраны условия смешанного типа, описанные в [6], с применением данных [7].

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, предоставленные отделом морских прогнозов МГИ и линейно интерполированные на расчетную сетку.

По результатам эксперимента в течение расчетного периода наблюдалась циклоническая завихренность в полях течений и между береговой линией и Основным Черноморским течением (ОЧТ) формировались и развивались антициклонические вихри различных масштабов. В период с 4 по 6 октября, с 13 по 16 октября (рис. 1) и с 25 по 27 октября 2006 г. получены круговороты с антициклоническим знаком завихренности вблизи г.Ялта, перемещающиеся по направлению движения ОЧТ. 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.

На рис.1 представлены поля модельных течений, полученных 13 – 17 октября 2006 г. (изображается каждая четвертая стрелка), и энергетические потоки  $\Pi \leftrightarrow E = gw\rho$  (работа силы плавучести) на горизонте 5 м.

Для анализа процессов неустойчивости, как возможного механизма

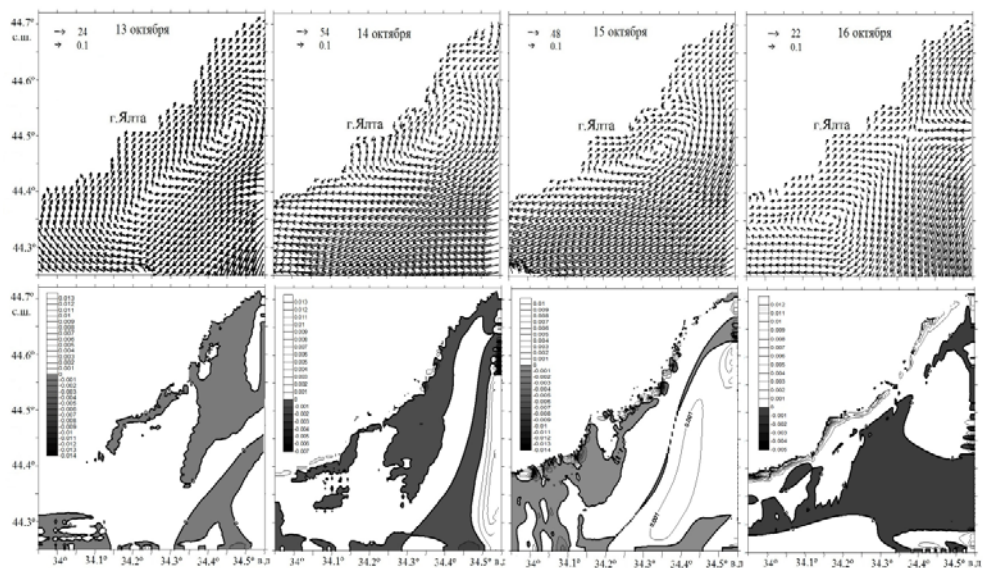


Рис. 1. Поля скорости течений (см/с) и поля работы силы плавучести  $\Pi \leftrightarrow E$  (эрг/с) на горизонте 5 м для 13, 14, 15 и 16 октября 2006 г.

формирования вихрей в прибрежной зоне, анализировалась работа силы плавучести. Как известно, те области, где она отрицательна и, как следствие, происходит переход из кинетической энергии в потенциальную, могут быть зонами бароклинной неустойчивости ОЧТ. Из анализа полей, представленных на рис.1, видно, что вихри вблизи г.Ялты находились в зонах отрицательных величин  $\Pi \leftrightarrow E$ . Существование полученных вихрей не противоречило спутниковым наблюдениям за поверхностной температурой NOAA (разрешение 1 км).

В полях течений в районе п.Симеиз (западная часть области) генерировались мезомасштабные антициклонические образования с радиусами ~8 км в слое воды 1 – 65м, отмеченные по данным наблюдений. В верхнем слое воды также были восстановлены антициклонические вихри с диаметром ~8 км в Ялтинском заливе и антициклонические вихри с диаметром ~10 км в восточной части области. Эти структуры малых размеров расположены в непосредственной близости от береговой черты и отличались непродолжительными временами жизни. В качестве примера приведем рис.2, на котором представлены поля течений 3 октября на горизонте 10 м, 9 октября на горизонте 65 м, 20 октября на горизонте 1 м (изображается каждая вторая стрелка), на которых отчетливо прослеживаются указанные элементы циркуляции.

Как известно, при действии слабых ветров преобладающим механизмом формирования мезо- и субмезомасштабных особенностей циркуляции в верхнем слое моря является обтекание ОЧТ береговой линии и неоднородностей рельефа дна. На рис.2 представлены пространственные распределе-

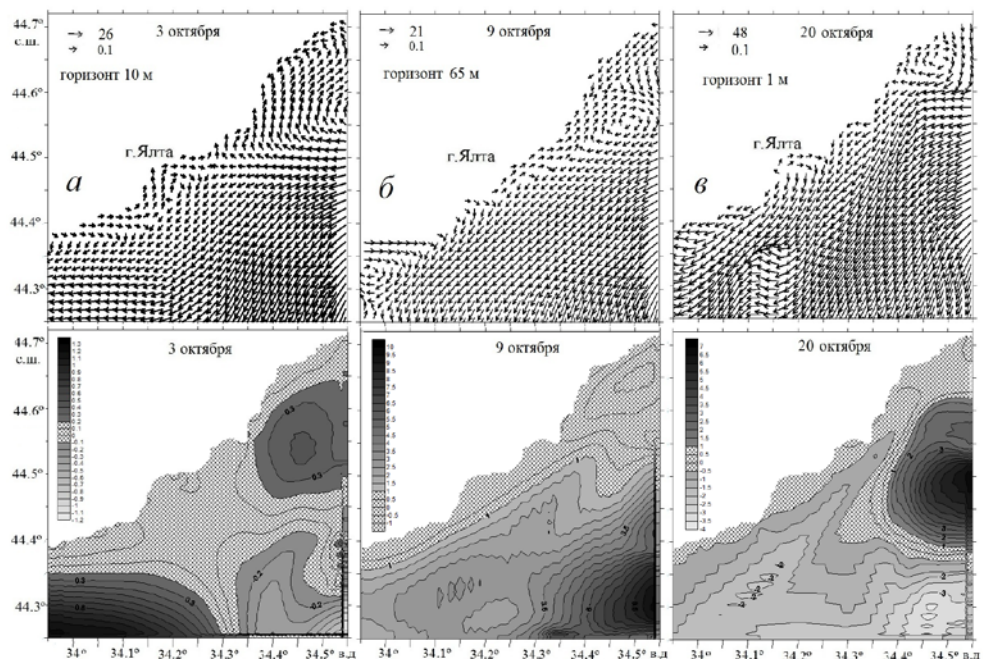


Рис. 2. Поля течений (см/с), рассчитанные 3 октября на горизонте 10 м (а), 9 октября на горизонте 65 м (б), 20 октября на горизонте 1 м (сверху) и поля  $\tau \rightarrow E$  (эрг/с) на поверхности для 3, 9 и 20 октября 2006 г. (снизу).

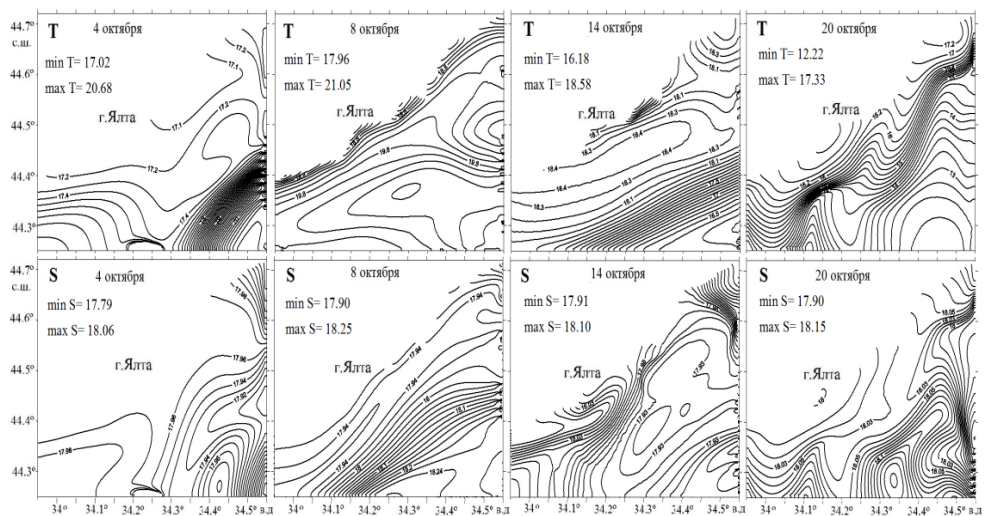
ния слагаемого  $\tau \rightarrow E = u_0 \tau^x + u_0 \tau^y$ , определяющего вклад кинетической энергии от ветра. Отметим, что вихри в Ялтинском заливе, в западной и восточной части сформировались в зонах, соответствующих минимальным значениям  $\tau \rightarrow E$  (обозначены штриховкой).

Перейдем к анализу полей температуры и солености, полученных в эксперименте. В рассматриваемый период времени происходило охлаждение поверхностных вод, которое быстрее всего охватывало районы, для которых максимальная глубина не превышает 100 м. Минимальные значения температуры в течение месяца уменьшились от 17 до 12 °С (наблюдались вдоль западного побережья). Максимальные значения в течение месяца уменьшились от 20 до 17 °С (достигались у восточной и южной открытых границ). На рис.3 приведены поля температуры и солености, рассчитанные 4, 8, 14 и 20 октября 2006 г. на верхнем горизонте.

4 октября температура поверхностного слоя в центральной части области и вдоль побережья составляла изменялась от 17,1 до 17,4 °С, у юго-восточной границы увеличивалась до 20,8 °С. В центральной части области у открытой границы втекала вода с температурой более 18 °С. Отметим также в поле температуры в восточной части области характерную структуру, соответствующую вихревому образованию. Соленость поверхностного слоя воды вдоль побережья и в центральной части области изменялась от 17,95 до 18 ‰, у восточной границы уменьшалась до 17,8 ‰.

8 октября более теплые воды с температурой > 20 °С располагались в центральной части полигона, воды с более низкой температурой (< 19 °С) – вдоль побережья. Значения солености увеличивались от побережья к глубоководной части от 17,92 до 18,25 ‰.

14 октября в максимальное значение не превышало 18,5 °С (достигалось в центральной части области), у юго-восточной границы в область втекали воды с более низкой температурой (менее 17 °С). Отметим характерную структуру в термохалинных полях, ограниченную изотермой 18,3 °С



Р и с . 3 . Поля температуры (°С) и солености (‰), рассчитанные на верхнем горизонте 4, 8, 14 и 20 октября 2006 г.

(изохалиной 17,93 ‰), соответствующую вихревому образованию на рис.1.

20 октября в термохалинных полях сформировались пограничные слои, разделяющие воды с более теплой (менее соленой) и более холодной соленой водой, траектория движения вод интенсивного течения (рис.2, в) соответствовала изотерме 15 °С (изохалине 18,03 ‰). Максимальное значение температуры 17,2 °С достигалось на востоке в области, соответствующей вихревому образованию, восстановленному на рис.2, в. У восточной границы в область втекали воды с более низкой температурой (менее 15 °С) и более низкой соленостью (менее 18 ‰).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-05-05423 А.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блатов А.С., Иванов В.А. Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря.– Киев: Наукова думка, 1992.– 244 с.
2. Иванов В.А., Белокопытов В.Н. Океанография Черного моря.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011.– 212 с.
3. Иванов В.А., Дулов В.А. Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014.– 517 с.
4. Дорофеев В.Л., Коротаев Г.К., Ратнер Ю.Б. Система мониторинга гидрофизических полей Черного моря в квазиоперативном режиме // Системы контроля окружающей среды.– 2006.– С.150-158
5. Демьшев С.Г., Коротаев Г.К. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана на сетке C // Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане.– М.: ИВМ РАН, 1992.– С.163-231.
6. Демьшев С.Г., Евстигнеева Н.А. Анализ гидрофизических полей на северо-западном шельфе Черного моря // Океанология.– 2013.– т.53, № 5.– С.585-595.
7. Дымова О.А. Численный анализ динамики и энергетики мезомасштабных особенностей циркуляции Черного моря: Дис. к.ф.-м. н.: 04.00.22. – Севастополь, 2014.– 151 с.

Материал поступил в редакцию 12.02.2016 г.

S.G.Demyshev, N.A.Evstigneeva

#### **ANALYSIS OF FIELDS OF CURRENTS AND THERMOHALINE FIELDS IN THE SOUTHERN COAST OF CRIMEA IN AUTUMN ON THE BASIS OF NUMERICAL CALCULATION WITH HIGH SPATIAL RESOLUTION**

On the basis of hydrodynamic model developed in Marine Hydrophysical Institute, fields of currents, temperature, salinity were calculated in fall in the coastal zone of the Southern coast of Crimea with real atmospheric forcing data. A high-spatial resolution (horizontal resolution 350 × 350 m and vertical resolution 38 layers) and detailed bathymetry with resolution ~500 m was used in the calculations. Meso- and submesoscale structures in hydrophysical fields, that have not been observed, or were slightly visible in previous experiments, were obtained. On the basis of analysis of energy characteristics possible physical mechanisms of formation were suggested.

**KEYWORDS:** *numerical modeling, coastal zone, high spatial resolution, hydrophysical fields, energy flows, mesoscale and submesoscale variability*