

УДК 551.465

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОБЫТИЯ ПОЛНОГО АПВЕЛЛИНГА В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ НА ГИДРОФИЗИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ ИО РАН

© 2017 г. Б. В. Дивинский¹, С. Б. Куклев¹, А. Г. Зацепин²

¹Южное отделение Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Геленджик, Россия

²Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

e-mail: divin@ocean.ru

Поступила в редакцию 01.11.2016 г., после доработки 06.12.2016 г.

В настоящей работе приведена попытка математического моделирования полного прибрежного апвеллинга, наблюдавшегося в северо-восточной части Черного моря на акватории гидрофизического полигона ИО РАН в сентябре 2013 г. Моделирование выполнялось с использованием объединенной гидродинамической модели Датского гидравлического института (DHI) MIKE21/3 Coupled Model FM. Результаты вычислений сравниваются с данными прямых инструментальных наблюдений, выполненных на гидрофизическом полигоне ИО РАН. Продемонстрирована существенная роль поверхностного ветрового волнения в формировании наблюдаемых профилей температуры, а также необходимость его учета при рассмотрении особенностей вертикальной циркуляции прибрежных вод.

DOI: 10.7868/S0030157417050021

ВВЕДЕНИЕ (ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ)

Создание и успешное функционирование гидрофизического полигона ИО РАН позволило на качественно новом уровне проанализировать разнообразные гидродинамические процессы, протекающие в прибрежной зоне Черного моря и характеризующиеся широким диапазоном пространственной и временной изменчивости (см., например, [2], [3], [6]). К числу экспериментально зафиксированных явлений относятся события полного апвеллинга, реализовавшегося, в частности, во второй половине сентября 2013 г. Детальное описание метео- и гидрологических условий апвеллинга подробно изложено в работе [3]. Основная цель настоящего исследования заключается в численном моделировании гидродинамической и гидрологической структуры, процессов подъема и опускания стратифицированных вод на шельфе Черного моря в районе гидрофизического полигона ИО РАН в сентябре 2013 г., а также в выяснении роли ветрового волнения в формировании термической структуры вод в этот период.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Участок побережья Черного моря в районе Геленджика–Новороссийска характеризуется достаточно широким пологим шельфом и резким свалом глубин (рис. 1).

К свалу глубин приурочен стрежень основного черноморского течения, определяющего, в немалой степени, основные особенности гидродинамики прибрежных вод.

Важными элементами гидрофизического полигона являются донная станция с акустическим профилографом скорости течения (ADCP) и заякоренная буйковая станция с термокосой ([3]). Оба устройства расположены рядом друг с другом на изобате 22 м (см. рис. 1). Приборы функционируют синхронно, что позволяет получать согласованные вертикальные профили модуля скорости и направления течения, а также температуры воды за интересующий нас временной период.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МОДЕЛИ

Модель DHI MIKE21/3 Coupled Model FM ([5]) является многокомпонентной вычислительной системой, направленной на исследование широкого круга задач прибрежной гидродинамики. В состав системы входят несколько взаимосвязанных модулей, из которых отметим собственно гидродинамический (модель течений) и волновой модули.

Дадим краткую характеристику используемых моделей.

1. Трехмерная модель течений базируется на численном решении уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеска. Модель состоит из

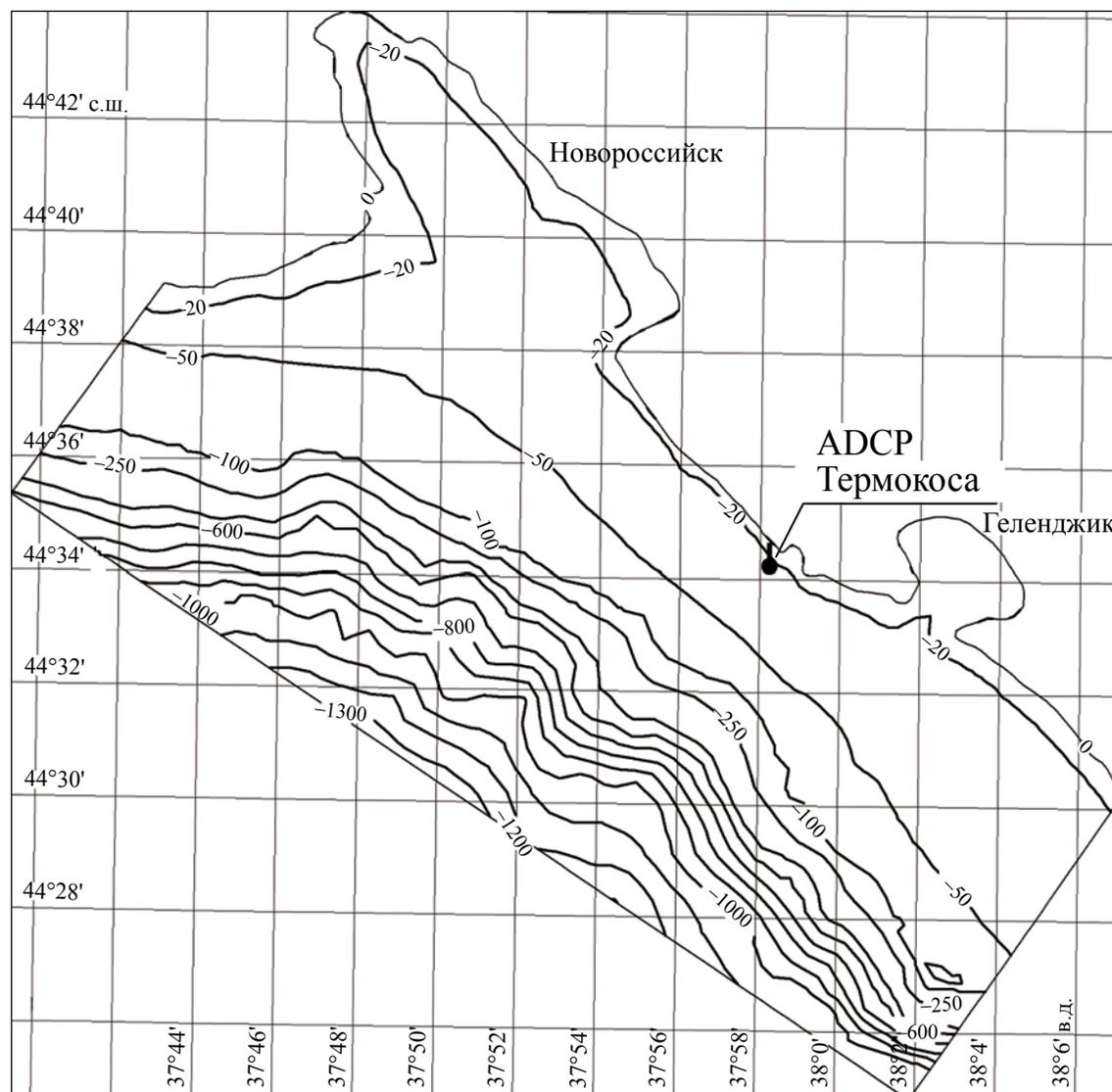


Рис. 1. Батиметрическая карта рассматриваемого участка (м), а также расположение измерительных устройств (черный круг), входящих в состав гидрофизического полигона, чьи данные использовались для сопоставления с данными численных расчетов.

уравнений движения, неразрывности, а также диффузии тепла и соли (плотности) с использованием турбулентной схемы замыкания. Расчетная сетка (рис. 2) по горизонтали состоит из 4300 элементов. По вертикали используется гибридная σ/ζ сетка, позволяющая комбинировать σ и ζ слои.

Преимущество гибридной сетки заключается в возможности более корректного задания начальных и граничных условий в условиях резких перепадов глубин. В нашем случае до глубины 50 м используем 10 σ -слоев, далее – 20 ζ -слоев. Расчетная область состоит из одной твердой и трех жидких границ.

2. Спектральная волновая модель. В модели в полной мере реализованы этапы зарождения, затухания и трансформации полей ветровых волн

с учетом следующих физических механизмов: рефракция волновых лучей в поле переменной батиметрии и течений; блокирование и отражение волн на встречном течении; диссипация волновой энергии за счет донного трения, обрушения и забурунивания; трех- и четырехволновые взаимодействия.

3. Динамическое объединение моделей осуществляется учетом на каждом заданном временном шаге:

- в гидродинамической модели – радиационных волновых напряжений, получаемых из спектральной модели;
- в спектральном волновом блоке – актуального уровня моря и течений, рассчитываемых по гидродинамической модели.

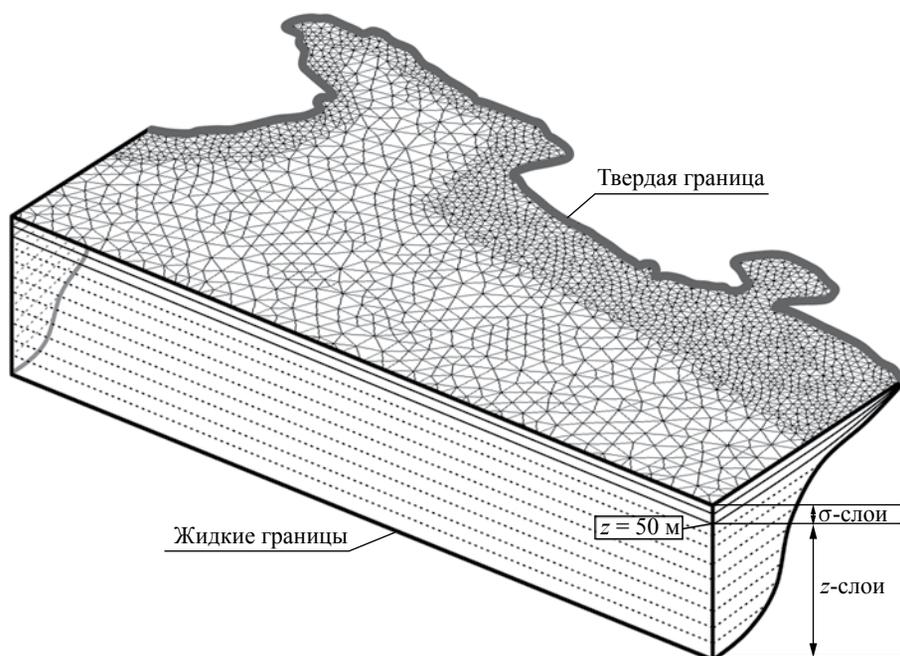


Рис. 2. Используемая расчетная сетка.

Объединение моделей, с одной стороны, приводит к существенному увеличению общего времени счета, с другой – позволяет в более полной форме описывать гидродинамику вод.

МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Принципиальный вопрос численного моделирования динамики морских вод в области с открытыми (жидкими) границами – корректное задание граничных условий. Безусловно, оптимальным является использование данных прямых инструментальных наблюдений. К сожалению, в настоящее время гидрофизический полигон ИО РАН не обладает возможностями для экспериментальных исследований по всей акватории. Данное положение будет улучшаться со временем, поскольку работы по развитию материальной базы полигона интенсивно продолжаются.

В сложившейся ситуации единственным методом получения граничных условий является математическое моделирование динамики вод всего Черного моря с дальнейшим извлечением из расчетных полей необходимых гидродинамических параметров.

Выделим два этапа моделирования:

1. Для акватории Черного моря с использованием бароклинной гидродинамической и спектральной волновой моделей рассчитываются поля течений и ветрового волнения. В нашем случае

расчетный период составляет два месяца (август–сентябрь 2013 г.) Входными параметрами модели являются:

- данные глобального реанализа ERA-Interim, представленного Европейским центром среднесрочных прогнозов (<http://apps.ecmwf.int>), с пространственной дискретностью в 0.25° и временной в 3 часа (приземный ветер, коротко- и длинноволновая радиация, температура воздуха, относительная влажность, облачность, испарение, осадки);
- средние расходы основных рек бассейна Черного моря ([1]);
- климатические поля температуры и солёности за август по горизонтам 0, 50, 100, 200, 300, 400, 500 м ([7]).

Выходные расчетные параметры (с дискретностью 0.5 часа):

- трехмерные поля скоростей и направлений течений;
- уровенная поверхность моря;
- пространственные поля значительных высот ветровых волн, периодов максимума спектра, направлений распространения волн.

Полученные характеристики используются в дальнейшем на втором этапе моделирования.

2. Период моделирования прибрежной зоны моря – 15–30 сентября 2013 г. Расчетная сетка представлена на рис. 2. Начальные условия:

трехмерные поля скоростей течений, уровень моря, а также поля параметров ветрового волнения по состоянию на 15 сентября 2013 г. Начальные трехмерные поля температуры и солености скорректированы с учетом экспериментальных данных, полученных 11 сентября с борта НИС “Аашамба” [4]. В качестве условий на жидких границах задаются компоненты скорости течения, уровня моря, значительных высот и периодов волн, а также направление распространения поверхностного волнения. Граничные условия являются функцией времени и действуют весь период моделирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ

К настоящему времени слабо исследованным является вопрос о влиянии ветрового волнения на формирование стратификации вод в моменты интенсивной вертикальной циркуляции в ходе прибрежного апвеллинга-даунвеллинга. Для оценки подобного влияния выполнены отдельные расчеты по двум моделям: чисто гидродинамической (без учета волнения) и объединенной (с динамической взаимосвязью блоков течения и ветрового волнения).

Результаты расчетов сравним с данными ADCP (модули скоростей и направления течений на глубине 5 м) и термоксы (вертикальные профили температуры).

На рис. 3 за период с 22 по 26 сентября 2013 г. приведены:

(а) – направление ветра (реанализ ERA-Interim); результаты расчетов по спектральной волновой модели;

(б) – средние направления ветровых волн;

(в) – значительные высоты волн;

экспериментальные данные и результаты расчетов по гидродинамической и объединенной моделям;

(г) – модули горизонтальных скоростей течений на глубине 5 м;

(д) – направление течений на той же глубине.

Сравним возможности гидродинамической и объединенной моделей в воспроизводстве реально наблюдаемых особенностей течений:

1. В период развития полного апвеллинга (23–25 сентября) результаты по объединенной модели лучше соответствуют экспериментальным данным. Это касается как модулей течений, так и их направлений. Обратим внимание на факт развития апвеллинга в условиях доминирования ветров западных и северо-западных румбов. В этот период развилось ветровое волнение с высотами значительных волн порядка 2 м. Во второй половине дня 24-го сентября произошел поворот ветра

в сторону северных направлений с сохранением значительного волнения на море. В этот период в спектре ветрового волнения преобладали волны зыби с периодами в 10–11 с и длинами порядка 100–120 м. При таких параметрах волновыми колебаниями охватывается толща моря до глубин 50–60 м, что способствует более активному перемешиванию вод.

2. При ветрах северных направлений гидродинамическая модель недооценивает, а объединенная переоценивает модули горизонтальных скоростей течений. Очевидно, в этом случае имеем дело с некорректностью задания исходного поля ветра для прибрежных районов в рамках глобального реанализа.

Особенности термической структуры вод в период полного апвеллинга-даунвеллинга, безусловно, качественней воспроизводятся объединенной моделью (рис. 4). Отметим некоторые особенности модельных результатов:

1. Явное несоответствие экспериментальных и модельных профилей 23-го и в первой половине 24-го сентября (предыстория апвеллинга) в принципе ожидаемо, поскольку начальные пространственные карты распределения температур определены экспертным путем на основании климатических данных и одного поперечного к берегу судового вертикального разреза.

2. В период активной вертикальной циркуляции, вызванной как подъемом глубинных вод, так и их дальнейшим перемешиванием в верхней толще моря, профили температуры, рассчитанные по объединенной модели, хорошо согласуются с экспериментальными кривыми. Отметим также более быстрое “модельное” охлаждение самого верхнего (0–10 м) слоя моря (рис. 4, 25 сентября 00 ч и 06 ч) в начале апвеллинга и более медленное его прогревание (рис. 4, 26 сентября 18) в начале даунвеллинга.

ВЫВОДЫ

1. Формирование прибрежных апвеллингов связано с целым рядом воздействующих факторов: соответствующий ветер, течения (в том числе глобальные), особенности рельефа дна, поверхностное ветровое волнение. Отметим комплексный характер взаимодействия в тройке факторов “Топография донной поверхности”–“течения”–“волнение”. Батиметрия в терминах глубины напрямую определяет параметры волнения и, в значительной степени, характеристики течения. Течения и ветровое волнение формируют наклонные уровенной поверхности моря, т.е. изменяют глубину. Угол между генеральным направлением волнения и поверхностным течением определяет

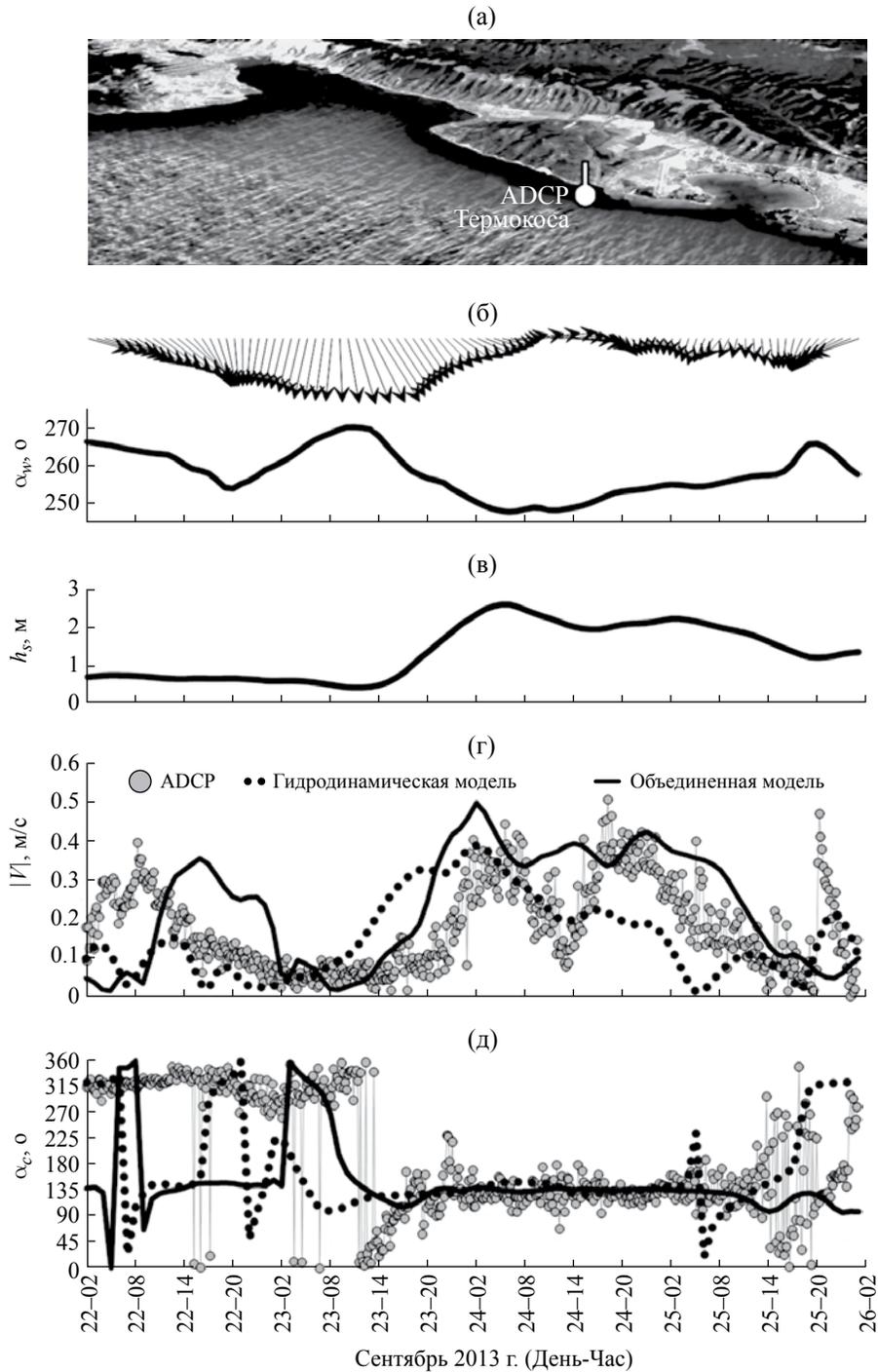


Рис. 3. Исходный ветер, а также экспериментальные данные ADCP и результаты моделирования по спектральной, гидродинамической и объединенной моделям: (б) – направления ветрового волнения; (в) – значительные высоты волн, м; (г) – модули горизонтальных скоростей течений на глубине 5 м, м/с; (д) – направления горизонтальных скоростей течений на глубине 5 м.

степень взаимодействия волн и течений (блокировку). Таким образом, численная модель, динамически объединяющая перечисленные факторы воздействия, способна более точно воспроизводить особенности формирования структуры морских вод.

2. Совершенствование модели с целью получения действенного инструмента исследований, позволяющего проверять научные гипотезы и предположения, возможно лишь при наличии развернутой базы натуральных наблюдений, предоставляющей репрезентативные данные

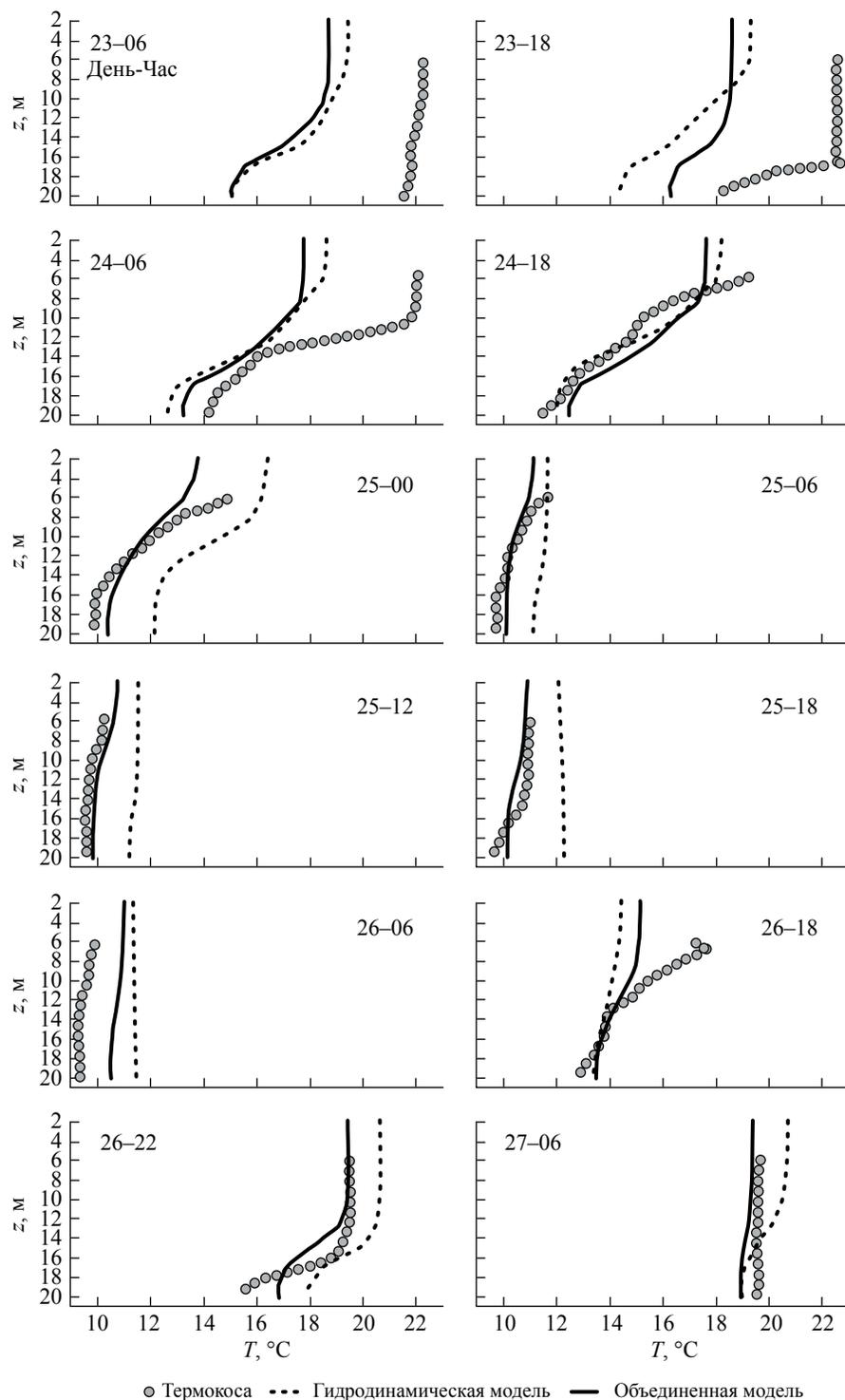


Рис. 4. Экспериментальные и модельные профили температуры ($^{\circ}\text{C}$) за период 23–27.09.2013 г.

для сопоставления с результатами моделирования.

3. Основная роль ветрового волнения в формировании термической структуры апвеллинга заключается, как представляется, в более активном перемешивании верхнего слоя моря. В этой

связи отметим моменты, которые еще предстоит прояснить: каков именно вклад волнения в формирование локальной уровневой поверхности (т.к. уклон в немалой степени определяет интенсивность апвеллинга), а также характер взаимодействия с основным течением.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-50-00095 в части проведения численных расчетов, гранта РФФИ 15-05-08659 в части разработки численной модели, а также Всероссийской общественной организации “Русское географическое общество”, договор № 10/2015/РГО-РФФИ в части проведения измерений написания и подготовки статьи к публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Джаошвили Ш.* Реки Черного моря. Технический отчет № 71.
2. *Зацепин А.Г., Островский А.Г., Кременецкий В.В.* Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря. Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2014. Т. 50. № 1. С. 16–29.
3. *Зацепин А.Г., Сильвестрова К.П., Куклев С.Б. и др.* Наблюдение цикла интенсивного прибрежного апвеллинга и даунвеллинга на гидрофизическом полигоне ИО РАН в Черном море. Океанология. 2016. Т. 56. № 2. С. 203–214.
4. *Подымов О.И., Зацепин А.Г.* Сезонные изменения солености воды в Геленджикском районе Черного моря по данным судового мониторинга. Океанология. 2016. Т. 56. № 3. С. 370–383.
5. DHI Water&Environment. MIKE21/3 Coupled Model FM, 2007.
6. *Ostrovskii A.G., Zatsepin A.G.* Intense ventilation of the Black Sea pycnocline due to vertical turbulent exchange in the Rim Current area // Deep-Sea Res. Part I: Oceanographic Research Papers, V. 116, October 2016, Pages 1–13.
7. Physical oceanography of the Black Sea. Marine Hydrophysical Institute, NOAA ESDIM Project № 01-411R, 2004.

Numerical Simulation of the Intensive Upwelling event in the North-Eastern Part of the Black Sea at the IO RAS Hydrophysical Testing Site

B. V. Divinsky, S. B. Kuklev, A. G. Zatsepin

In the present work the attempt of mathematical simulation of a intensive coastal upwelling noticed in the North-Eastern part of the Black sea at the IO RAS hydrophysical testing site in September 2013 is given. The simulation was performed using the coupled hydrodynamic model of Danish Hydraulic Institute (DHI) MIKE21/3 Coupled Model FM. The calculation results are compared with the data of direct instrumental observations, made at the IO RAS hydrophysical testing site. The significant role of surface wind waves in temperature profiles formation and the need to take it into account when considering the features of coastal waters vertical circulation are demonstrated.