

УДК 551.46.09

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СУБМЕЗОМАСШТАБНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ МОРСКИХ ТЕЧЕНИЙ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

© 2015 г. Б. В. Дивинский<sup>1</sup>, С. Б. Куклев<sup>1</sup>, А. Г. Зацепин<sup>2</sup>, Б. В. Чубаренко<sup>3</sup><sup>1</sup>Южное отделение Института океанологии им. П.П. Ширинова РАН, Геленджик<sup>2</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширинова РАН, Москва<sup>3</sup>Атлантическое отделение Института океанологии им. П.П. Ширинова РАН, Калининград

e-mail: divin@ocean.ru, kuklev@ocean.ru, zatsepin@ocean.ru, chuboris@mail.ru

Поступила в редакцию 31.05.2015 г., после доработки 07.08.2015 г.

Основная цель работы – исследование субмезомасштабной пространственно-временной изменчивости (1–10 км по горизонтали, 10–10<sup>2</sup> часов) динамики вод на северо-восточном шельфе Черного моря методами математического моделирования. Полученные предварительные результаты моделирования согласуются с данными натурных измерений.

DOI: 10.7868/S0030157415060039

### ВВЕДЕНИЕ

Анализ данных натурных измерений и спутниковой информации показал, что большую часть времени в шельфово-склоновой зоне Черного и Балтийского морей присутствуют как циклонические, так и антициклонические субмезомасштабные вихревые образования с диаметром, меньшим локального бароклинного радиуса деформации Россби ([4, 6, 7, 12]). Горизонтальный масштаб таких вихрей не превышает 10 км, временной – нескольких суток. Механизмы образования шельфовых вихрей исследовались в лабораторных условиях ([2, 3, 10]). По результатам лабораторного моделирования выделено три основных механизма образования вихрей.

Первый механизм – периодическое образование вихрей за мысами вследствие отрыва прибрежного течения. При этом образуются субмезомасштабные антициклонические шельфовые вихри, причем, только в тормозящемся циклоническом течении [2]. Второй механизм – сдвиговая неустойчивость вдольберегового течения. Следствием этого (в случае течения антициклонического направления) обычно является образование циклонических вихрей [3]. Третий механизм – пространственно-неоднородное ветровое воздействие [10].

Инструментом, позволяющим изучать физическую природу вихреобразования в шельфово-склоновой зоне моря в условиях, более близким к реальным по сравнению с лабораторными, является численное моделирование. Численному моделированию Черного моря посвящено большое количество работ, в том числе, совместному с Азовским морем (см., например, [15]). Однако важной и трудно решаемой проблемой является адекватное моделирование прибрежных районов

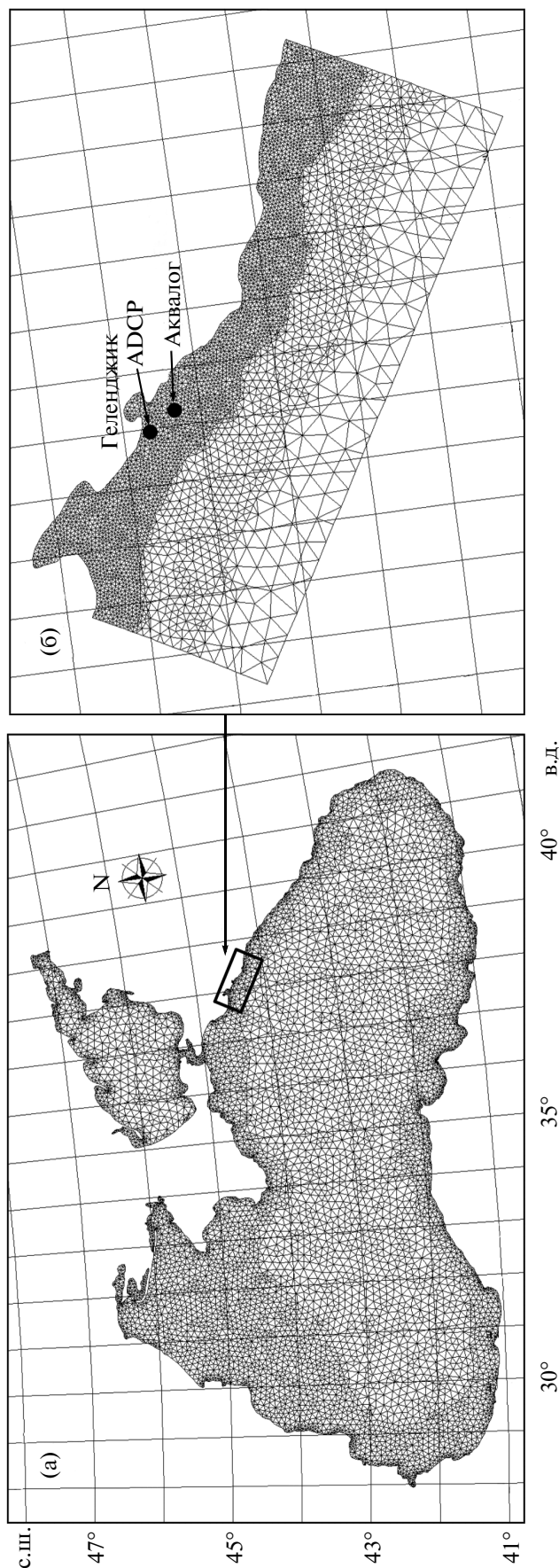
моря, характеризующихся высокой пространственно-временной изменчивостью. С этой целью в последнее время успешно используются модели с высоким пространственным разрешением в исследуемом районе морского побережья [1, 11]. Однако для проверки адекватности моделирования пока еще требуется сопоставление результатов расчетов с данными измерений *in situ*, которые далеко не всегда имеются в наличии.

В настоящей работе описаны предварительные результаты моделирования субмезомасштабной изменчивости и вихреобразования на геленджикском шельфе Черного моря с использованием численной модели высокого пространственного разрешения и сопоставление этих результатов с данными прямых измерений, выполняемых на полигоне ИО РАН [5, 6].

### МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Одной из основных проблем моделирования динамики вод отдельных частей морских акваторий является задание корректных гидродинамических условий на внешних проницаемых границах. При исследовании динамики вод на шельфе необходимо иметь в виду, что на эту область существенно влияют крупномасштабные процессы, происходящие в глубоководной зоне моря. Исходя из этого, задача решается в два этапа:

1. Воспроизведение крупномасштабной циркуляции Черного моря на основе **региональной** модели с относительно невысоким пространственным разрешением с целью получения граничных условий для более подробного исследования особенностей динамики вод прибрежной зоны моря.



2. Численное исследование динамики прибрежных вод в пределах выбранного полигона с помощью **локальной** вычислительной модели высокого пространственного разрешения.

В работе была использована трехмерная гидродинамическая модель, входящая в состав расчетного комплекса DHI MIKE Датского гидравлического института [9]. Данная модель позволяет рассчитывать трехмерные поля течений с учетом влияния вращения Земли, а также распределения температуры и солёности в зависимости от внешнего воздействия (ветровое и приливное воздействие, речной сток, испарение—осадки, солнечный прогрев) и граничных условий.

Кроме того, в расчетный комплекс DHI MIKE входит спектральная волновая модель, описывающая нарастание, затухание и трансформацию ветрового волнения в прибрежной зоне с учетом рефракции волн, но она в данной работе не использовалась. Результаты расчета полей волнения в Черном и Азовском морях за период с 1990 по 2014 гг. содержатся в [13].

На основе батиметрической карты Черного и Азовского морей методом триангуляции для региональной модели построена неравномерная расчетная сетка со сгущением в районе шельфа (рис. 1а). Сетка состоит из 15 тысяч элементов с характерным линейным размером 3 км. Для дискретизации по вертикали используется  $\sigma$ -координата с 20 слоями.

Локальная модель охватывает часть северокавказского шельфа Черного моря в районе г. Геленджик (рис. 1б). Горизонтальная расчетная сетка состоит из 8 тысяч элементов, вертикальная ось разбита  $\sigma$ -координатами на 10 слоев. Для локальной модели характерные размеры расчетных элементов изменяются от 50 м для шельфовой зоны до 500 м в мористой части. Модель охватывала область с глубинами до 1000 м.

В **региональной** модели учитывались: бароклинность (для расчета использовались сезонные климатические поля температуры и солёности согласно [8]), реальные поля ветра, горизонтальный турбулентный обмен (в формулировке Смагоринского), вертикальный обмен (как функция диссипации турбулентной кинетической энергии). Не учитывались: влаго- и теплообмен на границе море—атмосфера, сток рек, водообмен через Босфор.

**Локальная** вычислительная модель для упрощения была принята баротропной. Влияние бароклинности на поля течений учитывалось на уровне региональной модели. При этом региональная модель использовалась лишь как инструмент получения граничных условий для локальной модели, между ними нет прямого интерфейса и отсутствует необходимость **сопряжения** границ

Рис. 1. Используемые расчетные сетки для системы Черное—Азовское моря (а) и локального участка Черного моря в районе Геленджика (б).

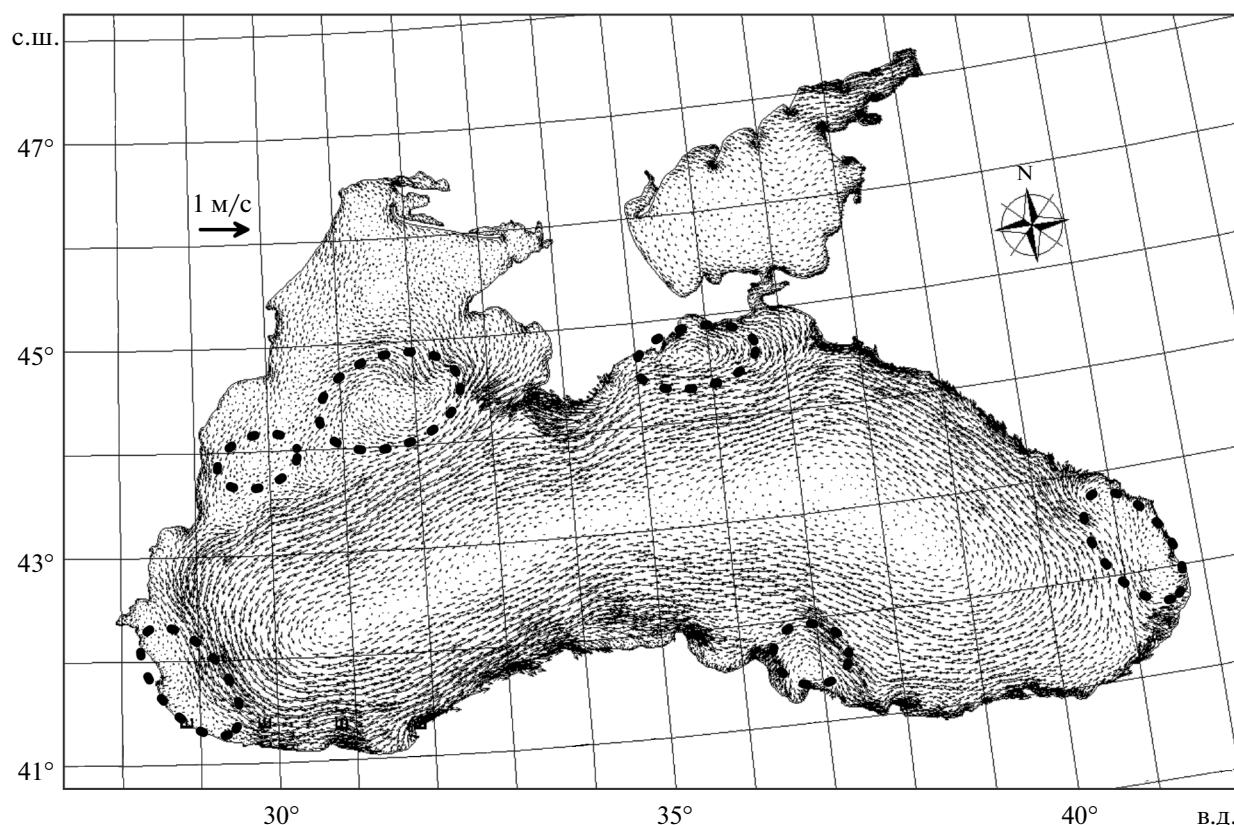


Рис. 2. Поверхностные течения в Черном море по состоянию на 24.01.2011 г. (после 24 дней расчета по региональной модели). Пунктиром отмечены антициклонические вихревые образования.

по расчетным элементам. Поскольку локальная модель баротропная, в качестве граничных условий используются только гидродинамические параметры, рассчитанные по региональной модели. Сопряжения гидрологических параметров в этом случае не требуется.

Принципиальная схема моделирования может быть проиллюстрирована на примере расчета за один календарный месяц:

1. По региональной 3D модели производится расчет полей скорости течения за текущий месяц. Начальные поля скорости – нулевые. Открытые границы в данном случае отсутствуют. Поскольку Азовское море – часть системы, водообмен через Керченский пролив рассчитывается, а не задается автоматически. Выходная информация – трехмерный файл гидрологических характеристик с дискретностью 3 часа.

2. Для каждой из жидких границ локальной модели формируется файл с переменными по времени граничными условиями, взятыми из региональной модели. Файл содержит информацию об уровне моря, расходе и скорости течения с дискретностью в 3 часа. Реализована процедура наложения (“mapping”) граничных условий, позволяющая интерполировать входные данные в расчетные узлы локальной сетки. “Mapping” яв-

ляется встроенным инструментом комплекса ДНИ МИКЕ.

Использование баротропной модели на локальном участке моря накладывает определенные ограничения на результаты моделирования. Но, во-первых, бароклинность учитывается в региональной модели Черного моря, результаты которой используются для задания условий на жидких открытых границах локальной модели. Во-вторых, на данном этапе исследований не ставилась задача учета всех физических механизмов, участвующих в формировании полей течений прибрежной зоны. Важно было убедиться в общей работоспособности модели, что позволило бы в дальнейшем изменять условия моделирования и ставить корректные с физической точки зрения численные эксперименты. Кроме того, результаты лабораторных экспериментов по моделированию вихреобразования в прибрежной зоне моря [2, 3, 10], показали, что описанные выше физические механизмы порождения вихрей хорошо воспроизводятся в однородной по плотности жидкости.

Для задания полей ветра в региональной модели использованы карты приземного атмосферного давления, предоставляемые Европейским центром среднесрочных прогнозов (<http://apps.ecmwf.int>) в виде данных глобального атмосферного реанализа ERA-Interim. Эти карты доступны с

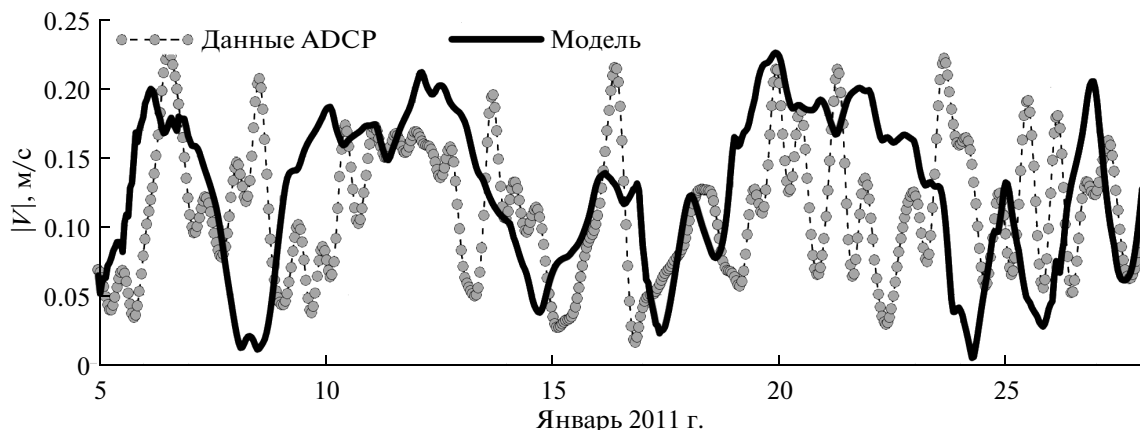


Рис. 3. Модули горизонтальных скоростей течений (м/с) по результатам измерений ADCP (на глубине 3.2 м) и расчетам по локальной модели для января 2011 г.

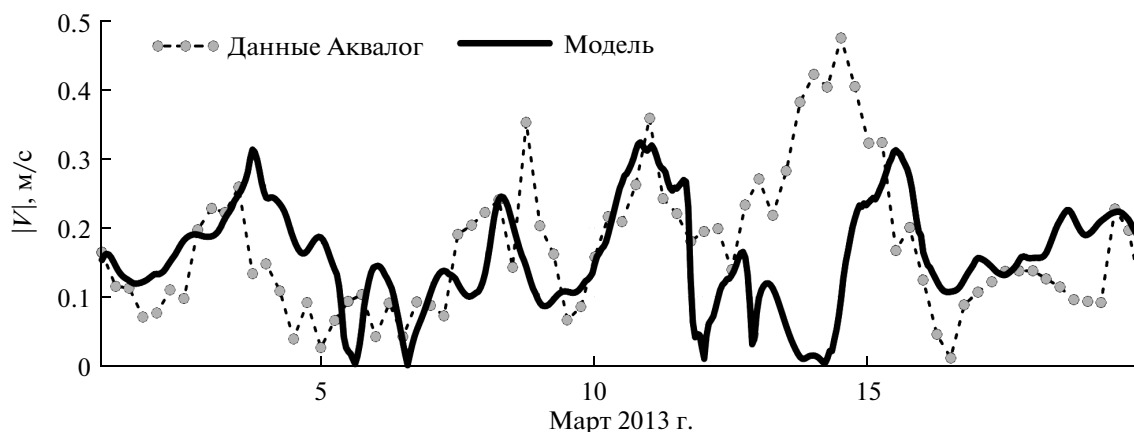


Рис. 4. Модули горизонтальных скоростей течений (м/с) по результатам измерений “Аквалог” (на глубине 35 м) и расчетам по локальной модели для марта 2013 г.

1979 года по текущее время и содержат более ста параметров, характеризующих состояние атмосферы и океана. По массивам данных приземного давления для региона Черного и Азовского морей в 61 точках по долготе и 29 точках по широте (пространственное разрешение данных ERA-Interim составляет 0.25 градуса), рассчитывался геострофический ветер над всем регионом. Горизонтальные компоненты стандартного ветра ( $U_{10}$ ,  $V_{10}$ ) на высоте 10 м над уровнем моря рассчитывались с использованием встроенной утилиты DHI MIKE.

Верификация локальной гидродинамической модели производилась по данным измерений, выполненных зондом-профилографом “Аквалог” и акустическим доплеровским измерителем скорости течения ADCP WH-600, входящими в состав измерительных станций подспутникового полигона и функционирующего на шельфе и континентальном склоне Черного моря (рис. 16) в районе г. Геленджик [5]. Зонд-профилограф “Аквалог” расположен в створе Толстого мыса Геленджикской бухты на расстоянии 9 км от берега (глубина 270 м). ADCP WH-600 входит в состав

донной станции, расположенной на траверзе Голубой бухты на расстоянии 900 м от берега на глубине 22 м. За время их работы получены длительные ряды наблюдений горизонтальных составляющих скорости течения в слое воды 30–220 м для “Аквалога” и 3–20 м для ADCP WH-600. Кроме того, использовались данные съемки поля скорости буксируемым ADCP RDI 300 на полигоне ИО РАН в сентябре 2008 г.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Моделирование гидродинамики прибрежной зоны Черного моря было выполнено для трех различных периодов: сентябрь 2008, январь 2011 и март 2013 г. Пример расчетов по региональной модели приведен на рис. 2, на котором отображена структура поверхностных течений для всего Черного моря по состоянию на 24 января 2011 г. Карта достаточно корректно воспроизводит основные черты циркуляции: общая циклоническая завихренность поверхностных вод, а также антициклонические вихревые образования меж-

ду стрежнем основного течения и берегом (помечены пунктирными линиями).

Результаты расчетов по локальной модели и сравнение их с данными натуральных измерений представлены на рисунках 3 и 4 для точек постановки станций ADCP WH-600 и “Аквалог” соответственно, для верхних репрезентативных горизонтов измерения (3.2 м для ADCP WH-600 и 35 м для “Аквалага”). Полученные по локальной модели результаты показывают неплохое соответствие данным измерений. Совпадают не только значения рассчитанных и измеренных значений модуля скорости течения, но и характерный период его изменчивости, составляющий несколько суток. Присутствие пиков, не воспроизводимых моделью, например, 8 и 23 января 2011 г. (рис. 3), говорит о том, что физическая постановка задачи не охватывает всех возможных эффектов (аналогичная ситуация наблюдалась при использовании модели DHI MIKE для условий Балтийского моря [14]).

В рамках локальной гидродинамической модели выполнен также численный эксперимент по реконструкции динамики шельфовой зоны моря в районе полигона, на котором 27–28 сентября 2008 г. был зарегистрирован антициклонический субмезомасштабный вихрь [4]. По принятой схеме для сентября 2008 г. были выполнены расчеты бассейновой динамики Черного моря, использовавшиеся для постановки граничных условий локальной модели.

Результаты расчетов поля скорости течения по локальной модели и по данным измерений буксируемым за судном доплеровским профилографом течения представлены на рис. 5а и 5б соответственно. Сравнение результатов показывает, что локальная численная модель достаточно достоверно описывает реально наблюдаемую динамику прибрежной зоны района исследований. На рис. 5а воспроизводится антициклонический вихрь, зарегистрированный экспериментально (рис. 5б). При почти одинаковых размерах, модельный вихрь более асимметричен, вытянут вдоль берега сильнее, чем по данным наблюдений. “Вытянутость” вдоль берега модельного вихря относительно натурального может объясняться условиями проведения измерений. Судовые галсы разнесены по времени (порядка 8 часов между первым и последним пройденными галсами) и выполнялись против генерального направления перемещения вихря на северо-запад. Можно предположить, что визуально сжат измеренный вихрь, а не вытянут модельный.

На основе вышеизложенного можно сделать заключение, что крупномасштабные особенности циркуляции (Основное черноморское течение, антициклонические образования между стрежнем основного течения и берегом) хорошо воспроизводятся без учета тепло- и массообмена между морем и атмосферой, а некоторые механизмы образования субмезомасштабных вихрей

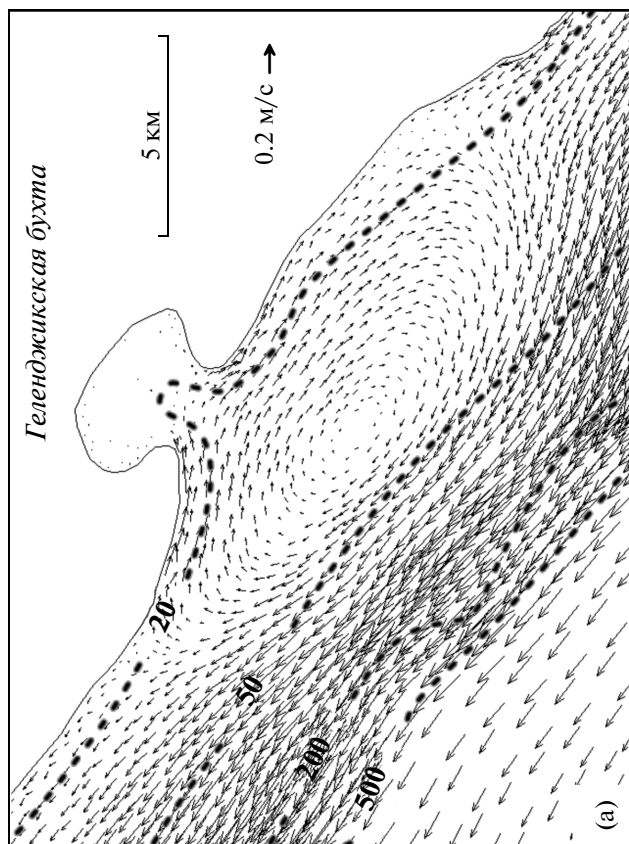
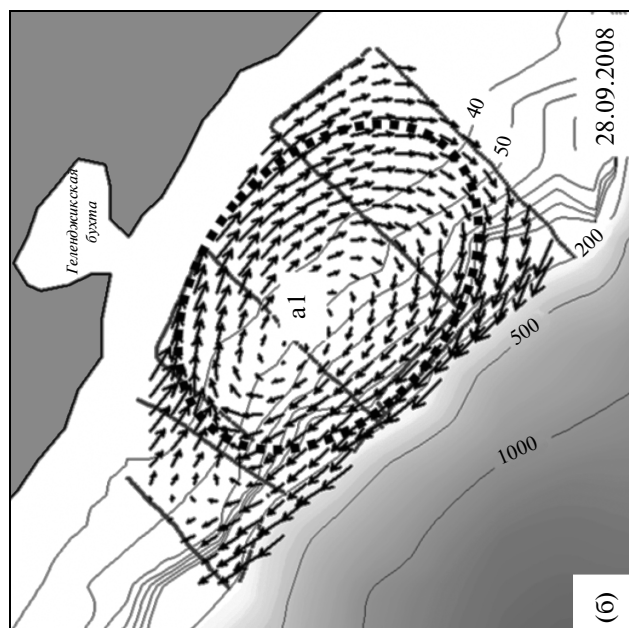


Рис. 5. Структура осредненных по глубине течений на 28.09.2008 г. (а) – По результатам моделирования; (б) – по данным измерений [5].

на шельфе могут быть реализованы в рамках баротропной локальной модели динамики вод.

Обработка и анализ экспериментальных данных выполнены при поддержке РФФ (проект

№ 14-50-00095). Теоретическая часть (модельные расчеты) выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (Соглашение № 14.604.21.0044, уникальный идентификатор проекта – RFMEFI60414X0044) и РФФИ (грант № 15-05-08659). Модель MIKE DHI была внедрена частично при поддержке проекта Seagull RC и темы 01201177526.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дианский Н.А., Фомин В.В., Жохова Н.В., Коршенко А.В. Расчет течений и распространения загрязнения в прибрежных водах Большого Сочи на основе численного моделирования // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2013. Т. 49. № 6. С. 664–675.
2. Елкин Д.Н., Зацепин А.Г. Лабораторное исследование механизма периодического вихреобразования за мысами в прибрежной зоне моря // Океанология. 2013. Т. 53. № 1. С. 259–268.
3. Елкин Д.Н., Зацепин А.Г. Лабораторное исследование механизма сдвиговой неустойчивости в прибрежной зоне моря // Океанология. 2014. Т. 54. № 5. С. 614–621.
4. Зацепин А.Г., Баранов В.И., Кондрашов А.А. и др. Субмезомасштабные вихри на кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы // Океанология. 2011. Т. 51. № 4. С. 592–605.
5. Зацепин А.Г., Островский А.Г., Кременецкий В.В. и др. 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.
6. Зацепин А.Г., Пиотух В.Б., Корж А.О. и др. Изменчивость поля течений в прибрежной зоне Черного моря по измерениям донной станции ADCP // Океанология. 2012. Т. 52. № 5. С. 629–642.
7. Каримова С.С. Сезонная и межгодовая изменчивость субмезомасштабной вихревой активности в Балтийском, Черном и Каспийском морях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 173–185.
8. Кубряков А.И. Моделирование циркуляции и процессов массопереноса в Черном море в приложении к задачам оперативной океанографии. Дис. на соиск. уч. ст. доктора физ.-мат. наук. Севастополь: МГИ, 2014. 399 с.
9. DHI Water&Environment. MIKE 3, Spectral Wave Module, 2007.
10. Elkin D.N., Zatssepina A.G., Kremenetskiy V.V., Nizov S.S. Laboratory Study of the Generation Mechanism of Coastal Eddies in the Black Sea due to the Spatially Non-Uniform Wind Impact // Fluxes and structures in fluids. Selected Conference Papers. 2010. P. 117–121.
11. Grigoriev A.V., Zatssepina A.G. Numerical modeling of water dynamics of Russian zone of the Black Sea within the framework of operational oceanography tasks // J. Coast Dev. 2014. V. 17. № 1. 387. doi: 10.4172/1410-5217.1000387.
12. Gurova E., Chubarenko B. Remote-sensing observations of coastal sub-mesoscale eddies in the South-Eastern Baltic // Oceanologia. 2012. V. 54. № 4. P. 631–654.
13. Kos'yan R., Divinsky B. Wave climate of the Black Sea: analysis of the observed trends // Proc. of the Conference OCEAN15. Genova, Italy, May 18–21, 2015. P. 1–5. doi: 10.1109/OCEANS-Genova. 2015.7271343.
14. Sokolov A., Chubarenko B. Wind Influence on the Formation of Nearshore Currents in the Southern Baltic: Numerical Modelling Results // Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics. 2012. V. 59. № 1–2. P. 37–48.
15. Zalesny V.B., Diansky N.A., Fomin V.V. et al. Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov. Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2012. V. 27. № 1. P. 95–111.

## Simulation of Submesoscale Variability of Currents in the Black Sea Coastal Zone

B. V. Divinsky, S. B. Kuklev, A. G. Zatssepina, B. V. Chubarenko

Setting and adjustment of the three-dimensional hydrodynamic models (regional and local) for simulation of the Black Sea dynamics and submesoscale variability (1–10 km, 10–10<sup>2</sup> hours) of currents at the north-eastern shelf are the main goal of the presented work. Preliminary simulation results are in good agreement with the observations.