

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.465

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЦИРКУЛЯЦИИ ЧЕРНОГО МОРЯ С УЛУЧШЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ В РАЙОНЕ ПОЛИГОНА ИО РАН

© 2017 г. А. В. Гусев^{1,2}, В. Б. Залесный¹, В. В. Фомин³

¹Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия

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

³Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Москва, Россия
e-mail: anatoly.v.gusev@gmail.com

Поступила в редакцию 09.10.2015 г., после доработки 25.01.2016 г.

Представлена численная методика расчета гидрофизических полей Черного моря на сетке с переменным шагом, со сгущением в районе полигона ИО РАН. Модельные примитивные уравнения записываются в сферической системе координат с произвольным расположением полюсов. Для улучшения горизонтального разрешения прибрежной зоны в районе полигона ИО РАН в северо-восточной части моря вблизи г. Геленджик один из полюсов помещается в точку суши (38.35° в.д., 44.75° с.ш.). Горизонтальное разрешение модели изменяется от 150 м в районе полигона ИО РАН до 4.6 км в юго-западной части Черного моря. Численная методика позволяет воспроизводить крупномасштабную структуру циркуляции Черного моря, а также мезо- и субмезомасштабную динамику прибрежной зоны. Для расчета атмосферного воздействия используются результаты региональной климатической модели WRF с разрешением порядка 10 км по пространству и 1 час по времени. Для демонстрации методики проведены расчеты гидрофизических полей Черного моря в период 2011–2012 гг. и расчет распространения пассивной примеси, демонстрирующий процесс самоочищения Геленджикской бухты в июле 2012 г.

DOI: 10.7868/S0030157417060120

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных тенденций развития моделирования и гидродинамического прогноза морской циркуляции является повышение пространственного разрешения. Развитие измерительных и вычислительных технологий позволяет изучать все более сложные гидродинамические процессы, анализировать тонкую структуру гидрофизических полей, их мезомасштабную и субмезомасштабную изменчивость. Решение актуальных задач оперативной океанографии стимулирует построение эффективных методов расчета динамики прибрежных течений в широком спектре их пространственно-временной изменчивости [1, 3, 5, 6, 7, 13, 14, 17, 21, 22, 23, 25, 26, 31, 32, 33].

В настоящей работе для расчета циркуляции Черного моря используется модель INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) [2, 4, 35], разработанная в Институте вычислительной математики (ИВМ) РАН. Модель основана на системе примитивных уравнений гидродинамики океана в приближениях несжимаемости, гидростатики и Буссинеска, записанных в изобатических координатах по вертикали. По горизонтали используется ортогональная сетка на сфере

с естественным сгущением, при этом для достижения увеличения пространственного разрешения в области полигона ИО РАН в северо-восточной части моря вблизи г. Геленджик используется алгоритм переноса вычислительного полюса сферической системы в район полигона. Данная методика обладает следующими особенностями:

а) ортогональная сетка позволяет точно воспроизводить геострофический баланс, важный для описания мезомасштабной изменчивости, и обладает, по сравнению с треугольными сетками, лучшими характеристиками (спектральными, аппроксимационными и т.д.);

б) квазиравномерность шагов по горизонтали и естественное аналитическое изменение шага позволяют уменьшить ошибку воспроизведения волновых процессов (отсутствуют районы искусственного сгущения сетки внутри области, приводящего к эффектам отражения волн от “внутренних” границ);

в) расчеты проводятся “сквозным счетом” на единой сетке без открытых границ, с интерактивным учетом взаимного влияния крупномасштабной циркуляции и динамики прибрежных процессов;

г) используется аналитическая сферическая система координат, исключая топологические искажения при расчете полей течений, в отличие от зачастую используемых псевдо-декартовых систем координат, адаптируемых для сферичной поверхности Земли;

д) экономичное распределение вычислительных ресурсов путём сгущения сетки только в исследуемой подобласти.

Задача оценки изменения концентрации консервативного загрязнения описывается уравнением переноса-диффузии пассивной примеси. Возможны два типа постановки задачи – прямая и сопряженная. Сопряженная задача решается в обратном времени. Ее решением является функция чувствительности, которая описывает пространственную структуру влияния “каждой точки” Черного моря на величину интегрального загрязнения контролируемой акватории [34].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Разработанная в ИВМ РАН модель циркуляции океанов и морей INMOM [2, 4, 35] относится к классу σ -моделей океана [19]. В ее основе лежит система примитивных уравнений в приближениях гидростатики и Буссинеска, записанная в обобщенных ортогональных координатах по горизонтали и в σ -системе координат по вертикали. Прогностическими переменными модели служат горизонтальные компоненты вектора скорости, потенциальная температура, соленость и отклонение уровня океана от невозмущенной поверхности. Для расчета плотности используется уравнение состояния, учитывающее сжимаемость морской воды и специально предназначенное для моделей циркуляции океана [18]. В качестве граничных условий на поверхности океана задаются потоки тепла, пресной воды и импульса. Для температуры и солености на боковых границах и дне ставится условие отсутствия потоков. На границах для скорости ставится условие непротекания, дополненное условиями свободного скольжения на боковых границах и квадратичного трения на дне.

При численной реализации INMOM используется метод расщепления [16, 27] по физическим процессам и пространственным координатам, что является ее отличительной особенностью. Уравнения динамики океана записываются в специальной симметризованной форме. Она позволяет представить оператор дифференциальной задачи в виде суммы более простых операторов, каждый из которых является неотрицательным в норме, определяемой законом сохранения полной энергии. Это дает возможность расщепить полную задачу на ряд более простых подзадач и построить их

пространственные аппроксимации, для каждой из которых выполняются законы сохранения, справедливые для исходной дифференциальной задачи. Разностные аппроксимации по пространственным координатам строятся на сетке S [15, 28].

Для оценки распространения загрязнений в модели присутствует блок переноса-диффузии пассивной примеси. Этот блок подобен тому, который используется для расчета полей температуры и солености. Отличие состоит в том, что коэффициент диффузии для пассивной примеси рассчитывается таким образом, чтобы схема была монотонной, обеспечивая неотрицательность решения. Алгоритм расчета пассивной примеси может работать как в прямом режиме, рассчитывая изменение концентрации загрязняющего вещества, так и в “сопряженном” – в обратном времени. Он позволяет рассчитать функцию чувствительности, которая характеризует потенциальное влияние всех точек акватории на некоторую контролируемую подобласть [34]. Симметризованная форма записи уравнений переноса-диффузии пассивной примеси позволяет использовать для решения прямой и сопряженной задач одни и те же вычислительные процедуры.

РАСЧЕТНАЯ ОБЛАСТЬ И ОБОСНОВАНИЕ ЕЕ ВЫБОРА

Основной целью работы является построение численной модели, способной воспроизводить крупномасштабную структуру циркуляции в Черном море и элементы ее мезо- и субмезомасштабной изменчивости в рамках единого вычислительного эксперимента – сквозного расчета на сетке с переменным шагом. Спектр моделируемых процессов включает три семейства движений: крупномасштабную циркуляцию (Основное черноморское течение (ОЧТ), горизонтальный размер ≈ 100 – 1000 км), мезомасштабные процессы (крупные квазигеострофические вихри ≈ 20 – 100 км) и субмезомасштабную изменчивость (нелинейные нестационарные вихри ≈ 1 – 10 км). Субмезомасштабная изменчивость воспроизводится локально, у северо-восточного побережья, где шаг сетки составляет 150 – 200 м.

В этой связи модель циркуляции и оценки загрязнения Черного моря реализована в модифицированной сферической системе координат. Северный полюс модифицированной системы помещен в точку суши в район Геленджика. Географические координаты нового северного полюса составляют 38.35° в.д. и 44.75° с.ш. Сеточное разрешение в градусах по новой долготе постоянно и равно 0.3° . Разрешение же в градусах по новой широте является переменным и задается так, чтобы метрические

шаги по широте были равны метрическим шагам по долготе на данной широте, которые пропорциональны косинусу широты. На рис. 1 представлена схема расчетной сетки по горизонтали для каждой пятой точки с детализацией в области сгущения. Увеличение разрешения около Геленджика связано с тем, что в этом районе организован подспутниковый полигон ИО РАН, предназначенный для измерения натуральных гидрофизических характеристик с субмезомасштабным пространственным разрешением [10]. Полученные на полигоне данные наблюдений вместе с результатами модельных расчетов предполагается в дальнейшем использовать для изучения короткопериодных и субмезомасштабных процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря. Таким образом, разрешение расчетной сетки меняется от ~ 150 м на геленджикском побережье в районе полигона ИО РАН до ~ 4.6 км в северо-западной части Черного моря.

По вертикали задается 20 неравномерных по глубине сигма-уровней с некоторым сгущением возле поверхности. В условиях решаемой задачи характерный градиент рельефа дна на склонах глубин составляет около 0.1, достигая в отдельных точках значений порядка 0.5. Условие гидростатической согласованности (существование на противоположных боковых гранях ячеек точек, находящихся на одной высоте) в таких районах часто не выполняется, что приводит к значительным ошибкам в расчёте горизонтальных компонентов градиента давления в сигма-координатах. Для уменьшения таких ошибок в модели INMOM применяются два приёма. Первый – вычитание из поля плотности некоторого профиля, зависящего только от глубины и не дающего вклада в горизонтальный градиент давления. Второй – использование для расчёта градиента симметризованной формы [4], дающей нулевой градиент для линейного по глубине профиля плотности, который может вносить существенный вклад в общий профиль.

ПОСТАНОВКА ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Данные по топографии Черного моря были взяты из атласа GEBCO [20], которые доступны на сайте www.gebco.net. Данные переведены из географической системы на модельную, сглажены и ограничены снизу значением 1.5 м.

Для расчета атмосферного воздействия используются данные, рассчитанные по региональной негидростатической модели WRF [30] на сетке с шагом 10 км в проекции Ламберта и переинтерполированные в стандартную географическую систему с разрешением 0.08° по широте и долготе.

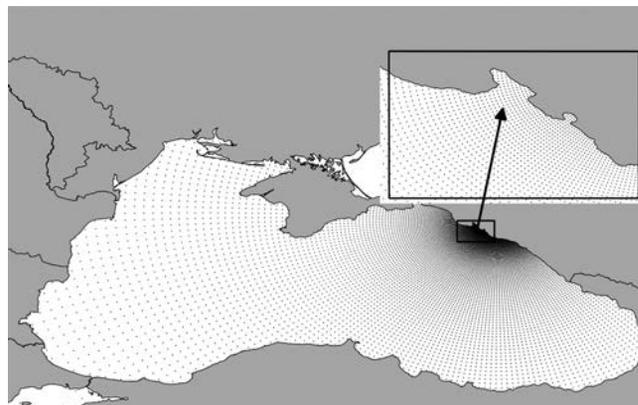


Рис. 1. Расположение узлов расчетной сетки по горизонтали, приведена каждая пятая точка по каждой из координат. В правом верхнем углу детализация для подспутникового полигона ИО РАН.

Дискретность по времени составляет 1 час. Данные включают в себя температуру и влажность воздуха на высоте 2 м, скорость ветра на высоте 10 м, давление на уровне моря, осадки, падающие длинноволновую и коротковолновую радиации. Данные по стоку рек были взяты из базы CORE [24] и имеют разрешение 1° по долготе и широте и дискретность по времени 1 месяц.

Численный эксперимент представляет собой расчет на 2011–2012 г.: 2011 г. используется для разгона модели, а результаты за 2012 г. анализируются. В качестве начальных условий принимались нулевые поля скорости и отклонения уровня моря и среднемесячные январские поля температуры и солёности [12]. В настоящей работе обмен массой через проливы Керченский и Босфор не учитывается. Стоит заметить, что интервала времени в один год может быть недостаточно для выхода циркуляции Черного моря на установившийся режим, а также отметить важность влияния обмена через проливы на формирование общей циркуляции. Тем не менее на качественное воспроизведение мелкомасштабных прибрежных процессов это не должно оказать существенного влияния.

В расчетах использовались следующие коэффициенты: коэффициент релаксации по температуре и солёности поверхности моря задается равным 0.5×10^{-4} см/с, что соответствует “привязке” температуры и солёности в верхнем 10-метровом слое к климатическим значениям с масштабом времени около 230 суток; горизонтальная диффузия и вязкость 2-го порядка (задаются пропорционально шагу пространственной сетки с максимальным значением диффузии, равным 1×10^6 см²/с, а вязкости – 2×10^6 см²/с, при этом значения уменьшаются, по отношению к максимальным, не более чем в 10 раз). Вертикальный турбулентный обмен

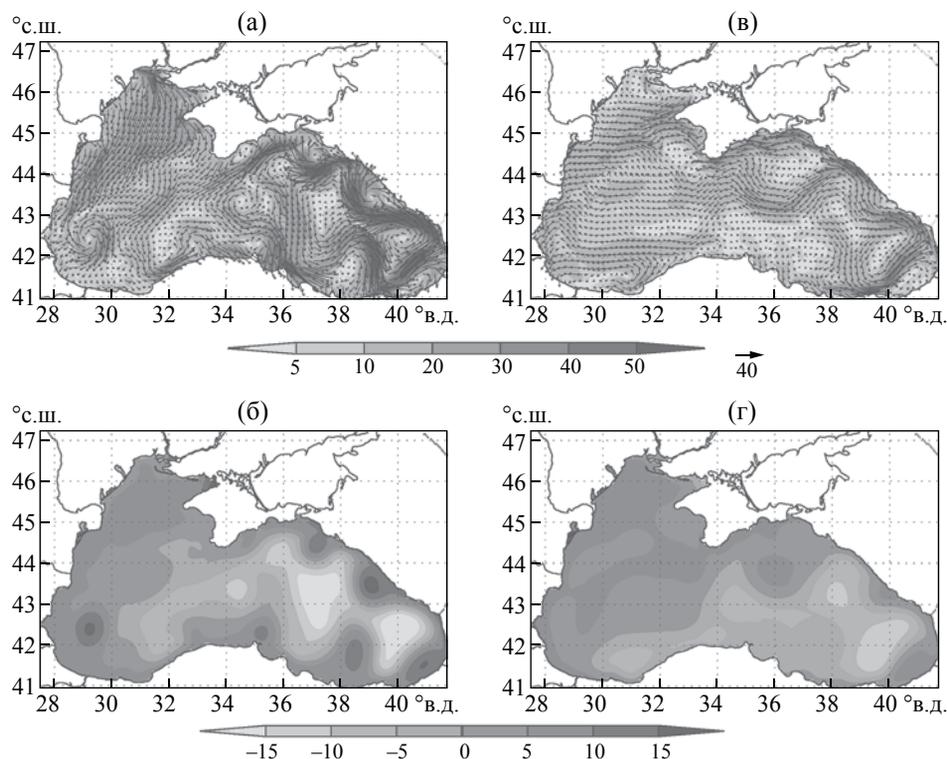


Рис. 2. Вверху – среднемесячная скорость течения на поверхности Черного моря: (а) – в марте. (в) – в июле 2012 г. Под рисунком шкала величины скорости и масштаб стрелок в см/с. Внизу – среднемесячное поле уровня моря: (б) – в марте, (г) – в июле 2012 г. Под рисунком шкала высоты уровня в см.

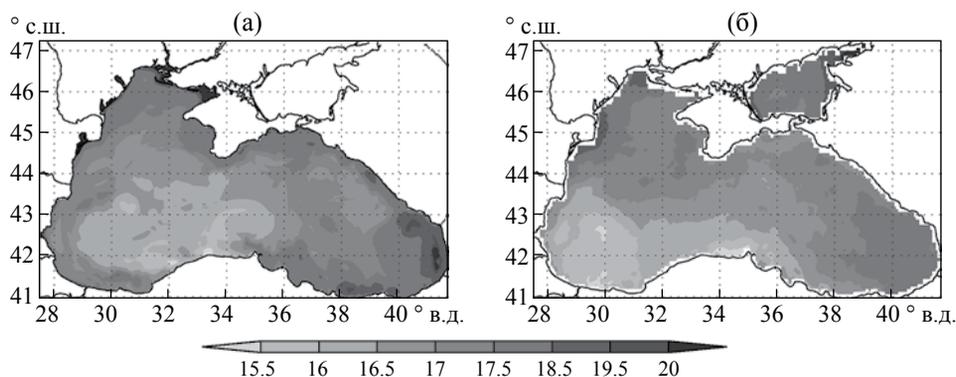


Рис. 3. Среднемесячная температура поверхности Черного моря в мае 2012 г.: (а) – результаты расчетов, (б) – данные спутниковых измерений. Под рисунком – шкала температуры в °С.

параметризуется согласно [29]: в зависимости от числа Ричардсона, коэффициенты вертикальной диффузии изменяются от 0.005 до 0.5 см²/с, а вязкости – от 0.05 до 5 см²/с.

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

Результаты численного расчета показывают, что модель качественно верно воспроизводит основные особенности крупномасштабной циркуляции

и мезомасштабные крупные вихри. На рис. 2 представлены рассчитанные скорости течений и уровень моря, переинтерполированные на равномерную географическую сетку с шагом около 4 × 4 км. Среди характерных элементов циркуляции можно выделить ОЧТ, квазистационарные Батумский и Синопский антициклоны. Некоторые особенности не сильно выражены, например, Севастопольский антициклон. Вероятно, это может быть связано с тем, что представленные поля – среднемесячные. В целом, результаты соответствуют прогностическим расчетам, выполненным ранее на такой сетке [7, 33].

Однако имеются и заметные отличия. Это, прежде всего, изменения крупномасштабной структуры течений в северо-восточной части моря, примыкающей к зоне высокого горизонтального разрешения. Во-первых, это отклонение ОЧТ от берега в определенные периоды времени, например, в марте (рис. 2а и 2б) в окрестности точки (38° в.д., 43.5° с.ш.). Оно хорошо видно и в проекции модельного решения на грубую сетку. Отклонение ОЧТ вызвано его меандрированием, а именно — антициклоническим меандром, в области которого находится мезомасштабный антициклонический вихрь. Он, в свою очередь, формирует вдольбереговое течение юго-восточного направления. Во-вторых, от зимнего к летнему сезону наблюдается постепенное изменение общей структуры ОЧТ, выражающееся в его значительном ослаблении (рис. 2в и 2г). Результаты расчетов хорошо согласуются с данными, полученными на основе спутниковых измерений и доступными на ftp-сервере ftp.avisio.altimetry.fr. Они подтверждают разницу в структуре ОЧТ в зимний и летний периоды [9].

На рис. 3 приведено поле среднемесячной температуры поверхности моря за май 2012 г. по результатам расчетов (а) и по данным спутниковых измерений (б). Данные измерений получены с помощью спутниковых инфракрасных радиометров и статистической интерполяции и доступны на сайте <http://marine.copernicus.eu/web/69->

myocean-interactive-catalogue.php?option=com_csw&view=details&product_id=SST_BS_SST_L4_NRT_OBSERVATIONS_010_006. Можно видеть характерную пониженную температуру в юго-западной части моря и повышенную — в восточной. Нюансы могут быть вызваны использованием конкретных данных атмосферного воздействия. Отдельные мелкомасштабные особенности в северо-восточной части, вероятно, связаны с повышенным разрешением.

Таким образом, основные крупномасштабные особенности циркуляции Черного моря воспроизводятся адекватно. Ниже будут рассмотрены региональные особенности циркуляции в зоне повышенного разрешения.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Рассмотрим несколько эпизодов, демонстрирующих значительную активность и изменчивость прибрежной динамики в зоне высокого пространственного разрешения.

Одним из ярких примеров пространственно-временной изменчивости течений в зоне высокого разрешения является процесс изменения направления прибрежного потока и разрушение прибрежного

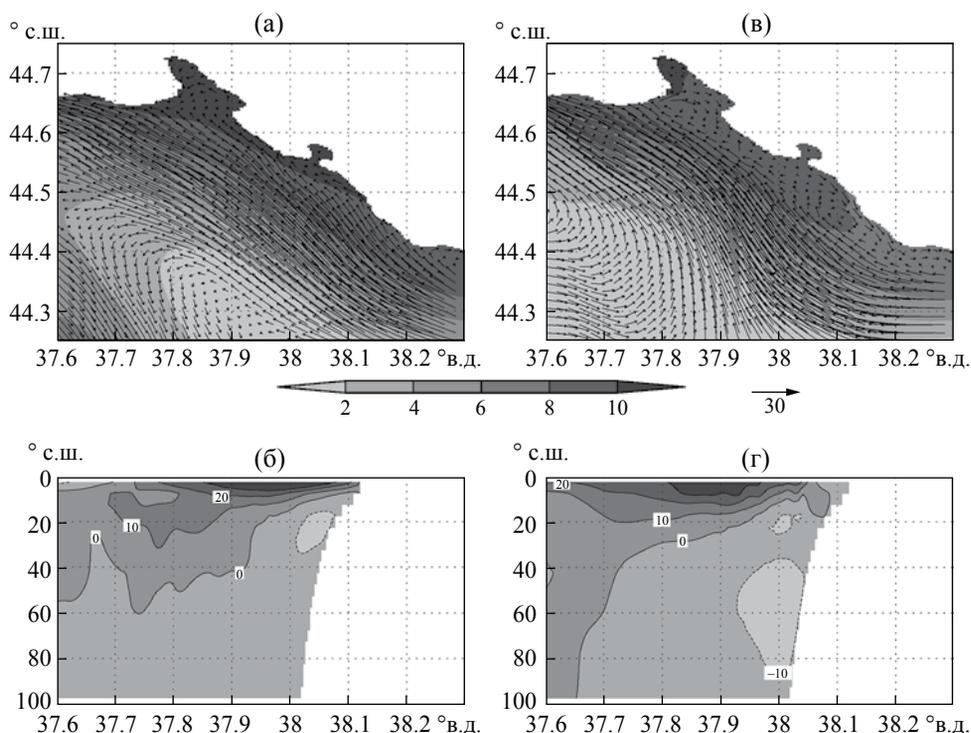


Рис. 4. Вверху — поле горизонтальной скорости течений, усредненное в верхнем 20-метровом слое (векторы), см/с, и уровень моря (заливка), см: (а) — на момент 00:00 07.07, (в) — на момент 00:00 08.07.2012 г. Внизу — зональный разрез меридиональной скорости течений вдоль 44.5° с.ш.: (б) — на момент 00:00 07.07, (г) — на момент 00:00 08.07.2012 г.

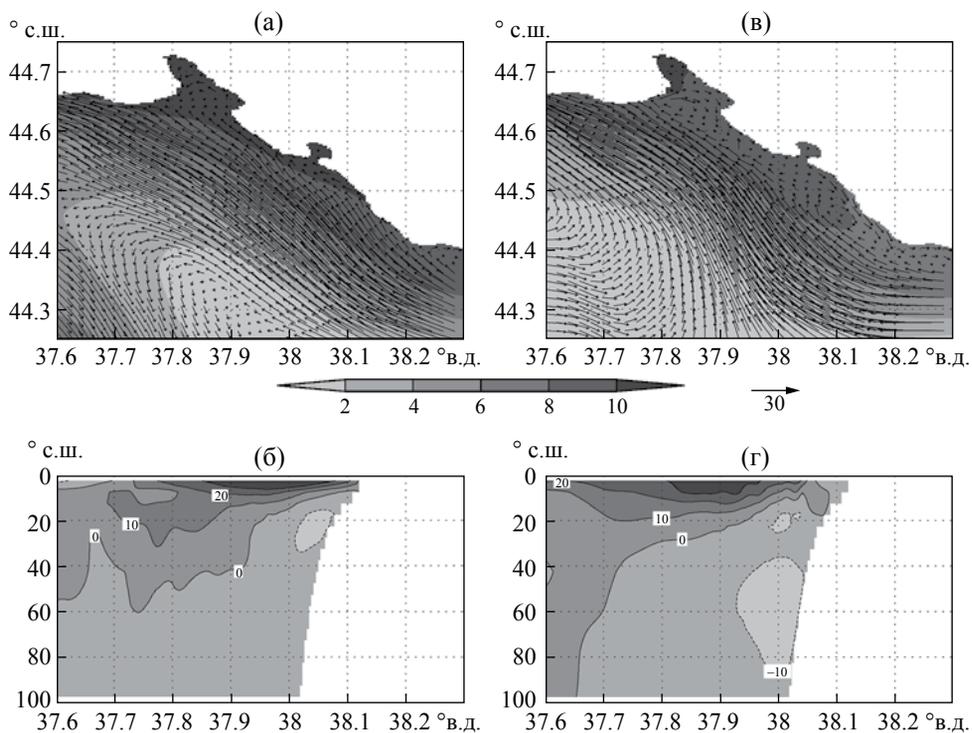


Рис. 5. То же, что на рис. 4, но для моментов времени 09:00 09.07 и 18:00 11.07.2012 г.

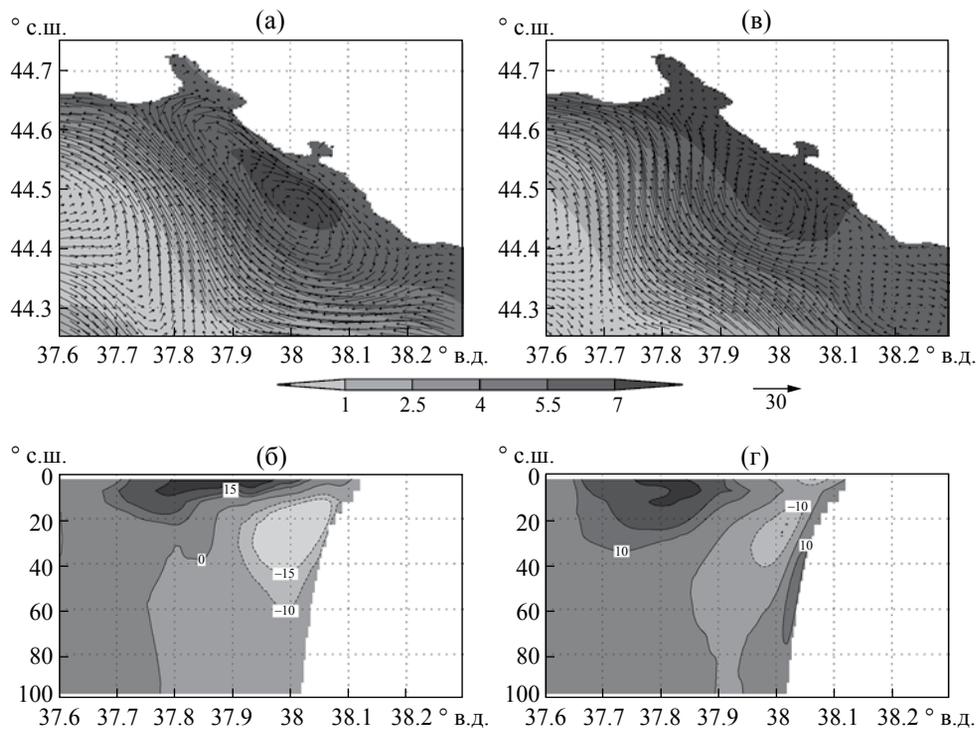


Рис. 6. То же, что на рис. 4, но для моментов времени 12:00 15.07 и 03:00 18.07.2012 г.

противотечения. Основной поток ОЧТ в северо-восточной подбласти направлен на север, северо-запад. Он располагается над свалом глубин вдоль побережья и в моделях умеренного горизонтального разрешения

с шагом сетки ~4 км воспроизводится в виде единого потока. Численные расчеты с более высоким разрешением показывают, что течения в восточной части моря могут иметь более сложную структуру [3, 4]. Это

демонстрируют и наши расчеты: наряду со средним потоком ОЧТ на северо-запад, в разные моменты времени возникают локализованные течения в прибрежной зоне: как совпадающие по направлению с ОЧТ – направленные на север, так и прибрежные противотечения, направленные на юго-восток. Они вызываются различными причинами и часто имеют бароклинный характер, с ярко выраженным динамически активным верхним слоем порядка 10–20 м.

Типичным примером изменчивости прибрежной динамики является формирование противотечения и антициклона у Геленджика в июле 2012 г. На рис. 4–6 представлено поле горизонтальных скоростей, средних в верхнем 20-метровом слое, и зональный разрез меридиональной скорости течений в верхнем 100-метровом слое на широте 44.5°. 7 июля в 00:00 в модельном решении наблюдается прибрежный поток на север, вихрей нет (рис. 4а и 4б). 8 июля в 00:00 формируется прибрежный антициклон (рис. 4в и 4г), который существует в течение 3–4 суток. Он увеличивается в размере и оттесняет основной поток ОЧТ в мористую часть (рис. 5а и 5б). Такого рода явление и вызывающие его причины описано в [8]. 11 июля в 18:00 видно начало формирования прибрежного течения на северо-запад (рис. 5в и 5г).

Интересный процесс, иллюстрирующий быструю смену направления прибрежного течения, происходит в летний период. 15 июля в 12:00

наблюдается прибрежное течение на юго-восток (рис. 6а и 6б). ОЧТ смещено в мористую зону, между разнонаправленными потоками располагается мезомасштабный антициклон. В течение 2.5 суток прибрежное течение слабеет, разрушается и меняет направление на северное (рис. 6в и 6г). Следует отметить, что в реальности 6–7 июля 2012 г. имел место катастрофический ливень, оказавший сильное влияние на динамику и термохалинную структуру вод на некоторый период (1–2 недели). В расчетах это событие (образование прибрежного опресненного пояса вод) не воспроизводится. Наиболее вероятная причина состоит в том, что значительная часть пресной воды поступила в море в виде стока с континента. Однако в модели полагается, что осадки в море попадают только над областью воды, а речной сток использовался климатический и грубого разрешения. Тем не менее, поскольку точный учёт влияния речного стока на циркуляцию в цели настоящего исследования не входит, данные недочёты можно условно считать приемлемыми.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА САМООЧИЩЕНИЯ ГЕЛЕНДЖИКСКОЙ БУХТЫ

Для моделирования процесса самоочищения Геленджикской бухты был проведен расчет пассивной примеси сроком на 1 месяц. На 1 июля 2012 г.

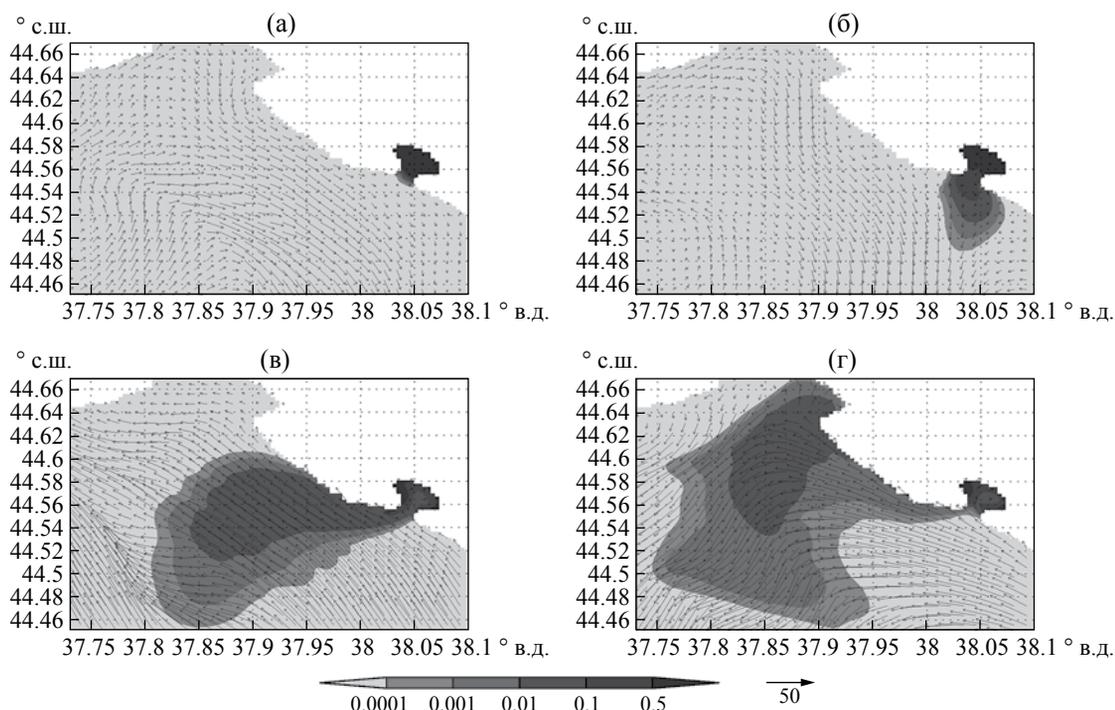


Рис. 7. Концентрация загрязняющего вещества (заливка) в безразмерных единицах и поле скорости течений (векторы), см/с, на глубине 2.5 м: (а) – на 03:00 01.07, (б) – на 13:00 01.07, (в) – на 02:00 02.07, (г) – на 12:00 02.07.2012 г.

концентрация примеси задавалась равной единице в пределах бухты и нулю в остальной акватории Черного моря. В течение месяца рассчитывалось свободное распространение примеси в Черном море. Источники загрязняющего вещества (ЗВ) задавались равными нулю. Для переноса-диффузии ЗВ использовалось поле скоростей, рассчитанное в модели на текущий момент времени, а коэффициенты диффузии в каждом направлении задавались равными половине произведения модуля компонента скорости в соответствующем направлении на шаг пространственной сетки в этом направлении, чтобы обеспечить монотонность схемы и, следовательно, неотрицательность концентрации ЗВ. К коэффициенту диффузии по вертикали было также добавлено значение, рассчитанное для температуры и солености по параметризации [29] для учета процессов вертикального перемешивания водных масс.

На рис. 7–10 представлены карты распространения загрязнений на некоторые характерные моменты времени. Заливка на рисунках соответствует концентрации ЗВ, а векторы – полю скорости течений на глубине 2.5 м. При этом на рис. 8 представлены также зональные разрезы, на которых заливкой представлена концентрация ЗВ, изолиниями нанесено значение поперечной (меридиональной) скорости течений на широте 44.555° с.ш.

В качестве градаций концентрации выбраны несколько значений: 0.0001, 0.001, 0.01, 0.1, 0.5, соответствующих разбавлению загрязнения по отношению к первоначальному состоянию. Концентрации меньше 0.0001 рассматриваются как отсутствие ЗВ.

Для прибрежной циркуляции в северо-восточной части Черного моря (ЧМ) характерно наличие инерционных колебаний с масштабом времени порядка суток (точнее, период равен примерно 17.6 ч). В частности, присутствуют короткопериодные изменения динамики моря [11]. Изучение картины распространения ЗВ позволяет наблюдать эти изменения и их влияние на перенос массы в море. На практике очень низкие значения концентрации ЗВ могут быть не зафиксированы измерительными приборами, но в численных расчетах такие значения (на несколько порядков ниже исходной величины) присутствуют и помогают понять некоторые механизмы формирования циркуляции и переноса массы. Рассмотрим некоторые, на наш взгляд, характерные моменты циркуляции и соответствующие им картины распространения ЗВ.

Рис. 7а демонстрирует момент времени 03:00 01 июля, фактически начальное распределение ЗВ, при этом у берега наблюдается небольшое течение на юго-восток. На момент времени 13:00 01 июля (рис. 7б) в районе Геленджикской бухты

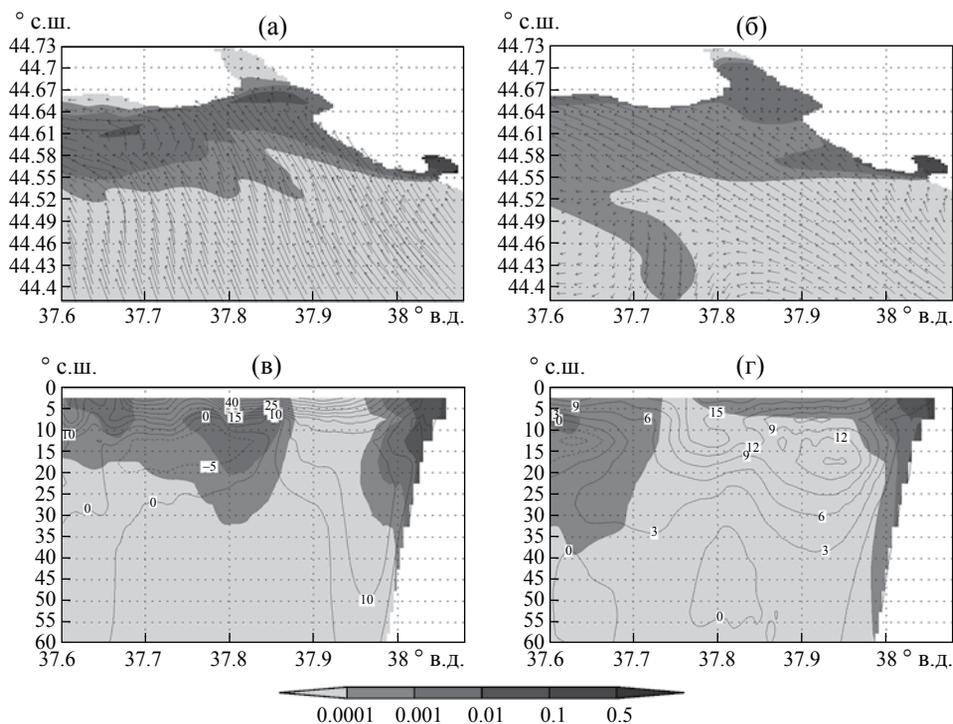


Рис. 8. Вверху – концентрация загрязняющего вещества (заливка) в безразмерных единицах и поле скорости течений, см/с, на глубине 2.5 м: (а) на 00:00 03.07, (б) на 06:00 04.07.2012 г. Внизу – зональный разрез концентрации загрязняющего вещества (заливка) в безразмерных единицах и меридиональная скорость течений (изолинии), см/с, на разрезе 44.555° с.ш.: (в) – на 00:00 03.07, (г) – на 06:00 04.07.2012 г.

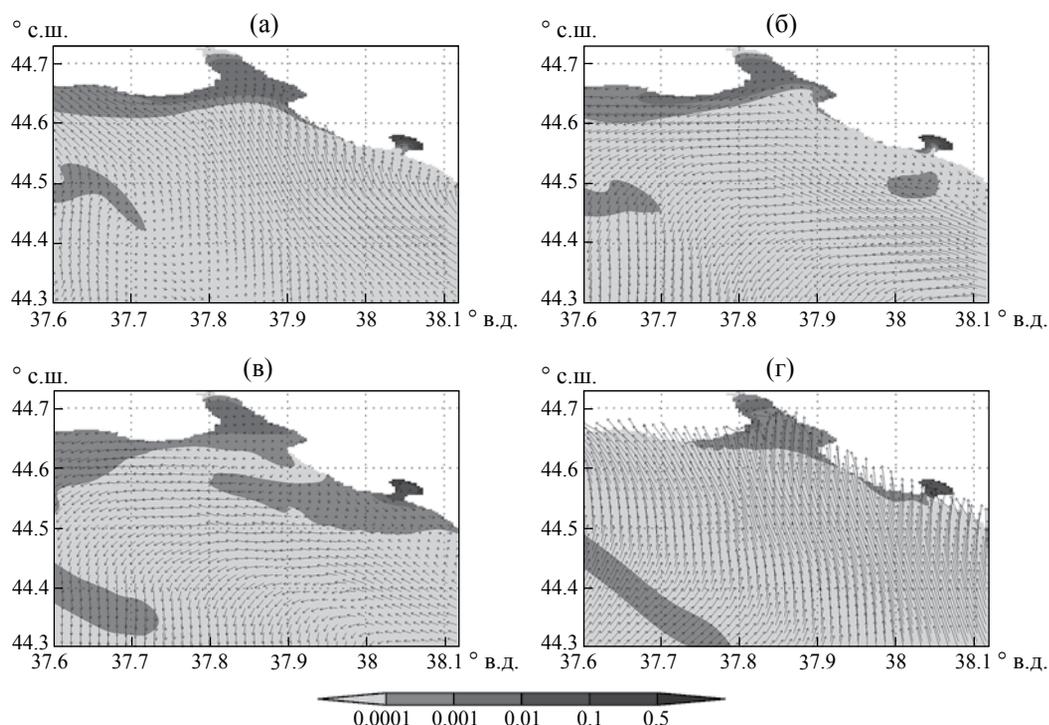


Рис. 9. То же, что на рис. 7, но для моментов времени 06:00 05.07, 15:00 05.07, 12:00 06.07 и 06:00 07.07.2012 г.

наблюдается течение от берега, за которым и следует ЗВ. К моменту 02:00 02 июля (рис. 7в) течение вдоль берега соответствует направлению ОЧТ, ЗВ перемещается вместе с течением на северо-запад. На 12:00 02 июля (рис. 7г) вдольбереговое течение в районе Цемесской бухты поворачивается в сторону моря, унося за собой ЗВ. Однако на 00:00 03 июля (рис. 8а и 8в) течение снова идет вдоль берега и переносит ЗВ к северо-восточному побережью ЧМ. При этом распространение ЗВ по глубине происходит до 35–40 м.

На момент времени 06:00 04 июля (рис. 8в и 8г) в картине распространения ЗВ появляется “язык”, связанный с очередным перераспределением структуры течений в море, и опускания вдоль берегового склона до глубины 60 м. За последующие сутки поле скорости течений постепенно разворачивается в сторону берега, и на 06:00 05 июля 2012 г. (рис. 9а) можно наблюдать смещение ЗВ в сторону берега. Глубинное распространение ЗВ, которое не видно в картинах поверхностной циркуляции, проявляется на момент времени 15:00 05 июля (рис. 9б) в том, что на поверхности появляется концентрация ЗВ ненулевого значения за счет подъема из глубинных слоев, в которых, из-за сложной трехмерной структуры течений, распространение ЗВ может происходить в иных направлениях, нежели на поверхности, и с большими по величине скоростями.

Далее, на 12:00 06 июля (рис. 9в), можно заметить очередную перестройку схемы течений. Вдоль

побережья в районе Геленджика появляется противотечение, направленное на юго-восток. Это приводит к тому, что ЗВ, до этого распространявшееся в северо-западном направлении, теперь переносится на юго-восток. На момент 06:00 07 июля (рис. 9г) поверхностные скорости течения снова разворачиваются в сторону берега, смещая ЗВ к берегу. К моменту 15:00 08 июля (рис. 10а) за счет вертикального переноса ЗВ снова появляется на поверхности и, в силу возникновения антициклона на траверсе Геленджика – Новороссийска, движется на юго-восток. Концентрация ЗВ в Геленджикской бухте к этому моменту уменьшилась, как минимум, в 10 раз по сравнению с первоначальной.

Рассмотрим еще несколько моментов распространения ЗВ без детального анализа суточной изменчивости циркуляции. На момент 00:00 15 июля (рис. 10б) в исследуемом регионе можно наблюдать обширный антициклонический круговорот, в котором концентрация ЗВ меньше, как минимум, в 1000 раз по сравнению с первоначальной. Самая высокая концентрация наблюдается вдоль берегов Геленджикской бухты и составляет до 0.1 от первоначальной. К 25 июля (рис. 10в) значительные (согласно выбранной шкале) концентрации ЗВ можно наблюдать в Цемесской и Геленджикской бухтах. Концентрация в этих районах не превышает 0.001 от первоначального значения. И, наконец, к концу расчета, на 01 августа (рис. 10г) можно наблюдать ЗВ с концентрацией не выше 0.001 от

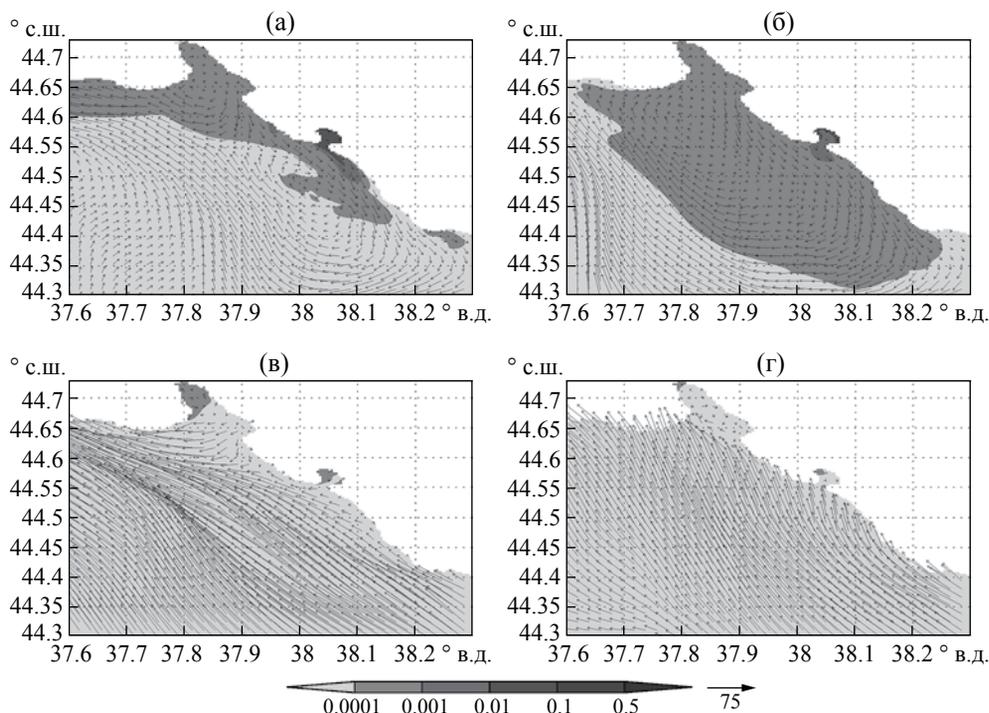


Рис. 10. То же, что на рис. 7, но для моментов времени 15:00 08.07, 00:00 15.07, 00:00 25.07 и 00:00 01.08.2012 г.

исходной лишь в небольших участках Геленджикской и Цемесской бухт. При таких концентрациях Геленджикскую бухту можно считать практически очищенной от загрязнений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Представлена методика расчета циркуляции и распространения консервативного загрязняющего вещества в Черном море с улучшенным пространственным разрешением в районе полигона ИО РАН у геленджикского побережья. Численная модель основана на примитивных уравнениях крупномасштабной гидродинамики, которые формулируются в ортогональной системе координат с произвольным расположением полюсов по горизонтали и изобатической σ -системе по вертикали. Алгоритм решения задачи основан на методе многокомпонентного расщепления. Повышение горизонтального разрешения достигается за счет смещения полюса в окрестность выделяемой подобласти. Это позволяет вместе с крупномасштабной морской циркуляцией моделировать вихревые режимы прибрежной динамики в рамках “сквозного счета”.

2. Проведены численные расчеты полей течений, уровня моря, температуры и солености в локально вихревом режиме на сетке с переменным шагом. Северный координатный полюс смещен в окрестность г. Геленджик, шаг сетки изменяется

от 150 м в прибрежной зоне до 4.6 км в основной акватории. Расчеты проведены при синоптическом атмосферном воздействии за 2011–2012 гг. Модель успешно воспроизводит крупномасштабную циркуляцию Черного моря, а также мезо- и субмезомасштабную изменчивость прибрежных течений. Расчеты демонстрируют активность и изменчивость бароклинной динамики в зоне высокого пространственного разрешения. Наблюдаются значительные изменения структуры струйных прибрежных течений: отход ОЧТ от берега, разбиение его на отдельные струи, формирование прибрежных противотечений, циклонических и антициклонических мезомасштабных и субмезомасштабных вихревых образований.

3. Проведены расчеты распространения консервативного загрязнения, демонстрирующие процесс самоочистки Геленджикской бухты в июле 2012 г. Расчеты позволяют не только оценить концентрацию загрязняющего вещества в море, но и изучить процессы формирования и изменчивости циркуляции в Черном море. Так, короткопериодные изменения (1–2 суток) поля прибрежных течений ярко проявляются в процессе распространения загрязнения. В течение месяца Геленджикская бухта почти полностью очищается.

Работа выполнена при поддержке РФФИ в части совершенствования численной методики расчета гидрофизических полей Черного моря (гранты № 16-05-00534, № 15-05-00557

и № 15-05-07539) и Минобрнауки РФ (Соглашение № 14.604.21.0044, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60414X0044) в части расчетов гидрофизических полей Черного моря в период 2011–2012 гг. и распространения пассивной примеси, демонстрирующий процесс самоочищения Геленджикской бухты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агошков В.И., Пармузин Е.И., Шутяев В.П. Ассимиляция данных наблюдений в задаче циркуляции Черного моря и анализ чувствительности ее решения // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2013. Т. 49. № 6. С. 643–654.
2. Гусев А.В., Дианский Н.А. Воспроизведение циркуляции Мирового океана и ее климатической изменчивости в 1948–2007 гг. с помощью модели INMOM // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2014. Т. 50. № 1. С. 3–15.
3. Демьяшев С.Г., Дымова О.А. Численный анализ мезомасштабных особенностей циркуляции в прибрежной зоне Черного моря // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2013. Т. 49. № 6. С. 655–663.
4. Дианский Н.А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. М.: Физматлит, 2013. 272 с.
5. Дианский Н.А., Фомин В.В., Жохова Н.В., Коршенко А.Н. Расчет течений и распространения загрязнения в прибрежных водах Большого Сочи // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2013. Т. 49. № 6. С. 664–675.
6. Залесный В.Б., Гусев А.В., Агошков В.И. Моделирование циркуляции Черного моря с высоким разрешением прибрежной зоны // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2016. Т. 52. № 3. С. 316–333.
7. Залесный В.Б., Гусев А.В., Мошонкин С.Н. Численная модель гидродинамики Черного и Азовского морей с вариационной инициализацией температуры и солености // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2013. Т. 49. № 6. С. 699–716.
8. Зацепин А.Г., Кондрашов А.А., Корж А.О. и др. Субмезомасштабные вихри на кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы // Океанология. 2011. Т. 51. № 4. С. 592–605.
9. Зацепин А.Г., Кременецкий В.В., Станичный С.В., Бурдюгов В.М. Бассейновая циркуляция и мезомасштабная динамика Черного моря под ветровым воздействием // Современные проблемы динамики океана и атмосферы. Сборник статей, посвященный 100-летию со дня рождения П.С. Линейкина / Ред. Фролов А.В., Реснянский Ю.Д. М.: ТРИАДА ЛТД, 2010. С. 347–368.
10. 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.
11. 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.
12. Иванов В.А., Белокопытов В.Н. Океанография Черного моря. Севастополь: НАН Украины, Морск. гидрофиз. ин-т, 2011. 212 с.
13. Кордзадзе А.А., Деметрашвили Д.И. Краткосрочный прогноз гидрофизических полей в восточной части Черного моря // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2013. Т. 49. № 6. С. 733–745.
14. Коротаев Г.К., Кныш В.В., Кубряков А.И. Исследование процессов формирования холодного промежуточного слоя по результатам реанализа гидрофизических полей Черного моря за 1971–1993 гг. // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2014. Т. 50. № 1. С. 41–56.
15. Лебедев В.И. Разностные аналоги ортогональных разложений, основных дифференциальных операторов и некоторых краевых задач математической физики // Журн. вычисл. матем. и матем. физ. 1964. Т. 4. № 3. С. 449–465.
16. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. СПб.: Лань, 2009. 608 с.
17. Марчук Г.И., Патон Б.Е., Коротаев Г.К., Залесный В.Б. Информационно-вычислительные технологии – новый этап развития оперативной океанографии // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2013. Т. 49. № 6. С. 629–642.
18. Brydon D., San S., Bleck R. A new approximation of the equation of state for seawater, suitable for numerical ocean models // J. Geoph. Res. 1999. V. 104. № C1. P. 1537–1540.
19. Griffies S.M. Some ocean model fundamentals. In: Ocean Weather Forecasting: an integrated view of Oceanography / Eds. Chassignet E.P., Verron J. Berlin, Germany: Springer, 2005. P. 19–74.
20. IOC, IHO and BODC. Centenary Edition of the GEBCO Digital Atlas, published on CD-ROM on behalf of the Intergovernmental Oceanographic Commission and the International Hydrographic Organization as part of the General Bathymetric Chart of the Oceans, British Oceanographic Data Centre, Liverpool, U.K. 2003.
21. Kordzadze A.A., Demetrasvili D.I. Operative forecast of hydrophysical fields in the Georgian Black Sea coastal zone within the ECOOP // Ocean Sci. 2011. V. 7. № 6. P. 793–803.
22. Korotaev G.K., Oguz T., Dorofeev V.L. et al. Development of Black Sea nowcasting and forecasting system // Ocean Sci. 2011. V. 7. № 5. P. 629–649.
23. Korotaev G.K., Saenko O.A., Koblinsky C.R. Satellite altimetry observations of the Black Sea level // J. Geoph. Res. 2001. V. 106. № C1. P. 917–933.

24. *Large W., Yeager S.* The global climatology of an interannually varying air–sea flux data set // *Clim Dyn.* 2009. V. 33. P. 341–364.
25. *Lyubartseva S.P., Ivanov V.A., Bagaev A.V. et al.* Three-dimensional numerical model of polychlorobiphenyls dynamics in the Black Sea // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling.* 2012. V. 27. № 1. P. 53–68.
26. *Marchuk G.I., Paton B.E.* The Black Sea as a simulation ocean model // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling.* 2012. V. 27. № 1. P. 1–4.
27. *Marchuk G.I., Rusakov A.S., Zalesny V.B., Diansky N.A.* Splitting Numerical Technique with Application to the High Resolution Simulation of the Indian Ocean Circulation // *Pure appl. geophys.* 2005. V. 162. № 8. P. 1407–1429.
28. *Mesinger F. and Arakawa A.* Numerical methods used in atmospheric models. WMO/ISCU Joint Organising Committee, GARP Publications Series № 17. V. I. 64 p.
29. *Pacanowski R.C., Philander S.G.H.* Parameterization of vertical mixing in numerical models of the tropical ocean // *J. Phys. Oceanogr.* 1981. V. 11. № 11. P. 1442–1451.
30. *Scamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J. et al.* A description of the Advances Research WRF Version 3. 2008. NCAR Technical Note. 113 p.
31. *Stanev E.V.* Understanding Black Sea dynamics // *Oceanography.* 2005. V. 18. № 2. P. 56–75.
32. *Stanev E.V., Le Traon P.Y., Peneva E.L.* Sea level variations and their dependency on meteorological and hydrological forcing: Analysis of altimeter and surface data for the Black Sea // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. № C7. P. 17203–17216.
33. *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 // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling.* 2012. V. 27. № 1. P. 95–111.
34. *Zalesny V.B., Gusev A.V., Chernobay S. Yu. et al.* The Baltic Sea circulation modelling and assessment of marine pollution // *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling.* 2014. V. 29. № 2. P. 129–138.
35. *Zalesny V.B., Marchuk G.I., Agoshkov V.I. et al.* Numerical simulation of large-scale ocean circulation based on the multicomponent splitting method // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling.* 2010. V. 2. № 6. P. 581–609.

The Technique for Simulation of the Black Sea Circulation with Increased Resolution Near the IO RAS Polygon

A. V. Gusev, V. B. Zalesny, V. V. Fomin

The numerical technique is proposed for simulation of the Black Sea hydrophysical fields on the grid with variable step, with refinement near the IO RAS polygon. The primitive equation of the model are written in spherical coordinates with arbitrary position of the poles. To increase the horizontal resolution of the coastal zone in the region of the IO RAS polygon in the northwest part of the sea, near town Gelendzhik, one pole is placed to the land point (38.35° E, 44.75° N). The model horizontal resolution varies from 150 m near the IO RAS polygon to 4.6 km in the southwest of the Black Sea. The numerical technique makes it possible to simulate large-scale structure of the Black Sea circulation, as well as meso- and submesoscale dynamics of the coastal zone. To compute the atmospheric forcing, we use the results of the regional climate model WRF with resolution about 10 km in space and 1 hour in time. For demonstration of the technique, we simulated the Black Sea hydrophysical fields for 2011–2012 and the passive tracer transport representing the process of self-cleaning of the Gelendzhik Bay in July 2012.