

УДК 551.465

РАСЧЕТ ТЕЧЕНИЙ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ПРИБРЕЖНЫХ ВОДАХ БОЛЬШОГО СОЧИ

© 2013 г. Н. А. Дианский*, **, В. В. Фомин*, ***, Н. В. Жохова*, А. Н. Коршенко*

*Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова
119034 Москва, Кропоткинский пер., 6

**Институт вычислительной математики РАН
119991 Москва, ул. Губкина, 8

***Московский физико-технический институт
141700 Долгопрудный, Московская обл. пер. Институтский, 9
E-mail: dinar@inm.ras.ru

Поступила в редакцию 18.02.2013 г., после доработки 03.04.2013 г.

Предложена методика расчета распространения загрязняющих веществ (ЗВ) на прилегающей к Большому Сочи (БС) акватории Черного моря (ЧМ). Она основана на применении гидродинамической модели INMOM (Institute Numerical Mathematics Ocean Model), реализованной для всей акватории ЧМ в двух версиях М1 и М2. В первой используется равномерное пространственное разрешение модели с шагом ~4 км, а в М2 – неравномерное, с уменьшением шага до 50 м в акватории БС. Версия М2 используется только в периоды расчета переноса ЗВ, для которого начальное гидротермодинамическое состояние задается из М1. Обе версии отражают сложный характер циркуляции ЧМ, однако М2 более адекватно воспроизводит вихревую циркуляцию в его восточной части, где горизонтальное разрешение М2 выше. Отсюда сделан вывод, что для воспроизведения вихревой структуры циркуляции ЧМ необходимо разрешение модели порядка 1.5 км, а основной фактор формирования квазистационарного Батумского антициклонального вихря – топографические особенности в этой части моря. Расчет распространения ЗВ из р. Сочи, Хоста и Мзымта и из 18-ти труб глубоководных выпусков сточных вод проводился для периода половодья с 01.04.2007 г. по 30.04.2007 г. Показано, что большой вклад в распространение ЗВ от этих точечных источников осуществляют вихревые мезомасштабные образования, которые формируют сложную трехмерную структуру распространения ЗВ.

Ключевые слова: численная модель, моделирование течений, циркуляция, Черное море, перенос, загрязняющие вещества, морская среда.

DOI: 10.7868/S0002351513060047

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в различных сферах человеческой деятельности приобретают особую важность оценка и прогноз состояния окружающей среды. В представленной работе предложена методика моделирования динамики Черного моря (ЧМ) для расчета распространения загрязняющих веществ (ЗВ) в прибрежной зоне района Адлер–Сочи (Большое Сочи). Актуальность выполненного исследования определяется возрастающей ролью Черного и Азовского морей (ЧАМ) как многоцелевой транспортной акватории, зоны промышленного освоения шельфа, а также рекреационного ресурса. В связи с этим особо следует отметить строительство газопровода “Южный поток”, проведение Олимпийских игр в г. Сочи, стратегическое значение порта Но-

вороссийск и Керченского пролива. Очевидно, что функционирование этих и других морских объектов должно сопровождаться гидрометеорологическим обеспечением с совершенствованием систем контроля состояния морской среды.

На фоне коротко- и долгопериодных естественных флуктуаций состояния морской среды хозяйственная деятельность оказывает сильнейшее воздействие на экосистему ЧМ. Имеются данные о кризисных изменениях функциональных характеристик морских экосистем и трофической структуры биологических сообществ, вызванных антропогенным загрязнением [1–3]. Многочисленные научные исследования и данные мониторинга показали существенную загрязненность нефтепродуктами ЧАМ [4], что подтверждается и спутниковыми наблюдениями [3].

Имеющиеся данные свидетельствуют о значительном хроническом загрязнении, более существенно влияющем на экосистемы морей, чем даже катастрофические аварийные разливы типа Керченского в ноябре 2007 г. [2].

В настоящей работе предложена методика численного расчета распространения загрязняющих веществ (ЗВ) в прибрежных водах Большого Сочи. Она основана на применении сигма-модели морской и океанической циркуляции Института вычислительной математики (ИВМ РАН), получившей в международной практике название INMOM (Institute Numerical Mathematics Ocean Model).

1. ПРИМЕНЕНИЕ INMOM ДЛЯ РАСЧЕТА ЦИРКУЛЯЦИИ ЧЕРНОГО МОРЯ

В качестве гидродинамической модели для расчета полей течений в акватории БС использовалась сигма-модель морской и океанической циркуляции INMOM [5–8]. В ее основе лежит полная система так наз. примитивных уравнений гидротермодинамики океана в сферических координатах в приближениях гидростатики и Буссинеска. В качестве вертикальной координаты используется безразмерная величина σ , задаваемая как

$$\sigma = (z - \zeta) / (H - \zeta), \quad (1)$$

где z – обычная вертикальная координата; $\zeta = \zeta(\lambda, \varphi, t)$ – отклонение уровня океана от невозмущенной поверхности как функция долготы λ , широты φ и времени t ; $H = H(\lambda, \varphi)$ – невозмущенная глубина моря. Прогностическими переменными модели служат горизонтальные компоненты вектора скорости, потенциальная температура T , соленость S , отклонение уровня океана от невозмущенной поверхности, толщина и сплоченность морского льда. Для расчета плотности используется уравнение состояния, специально предназначенное для численных моделей [9].

Главная особенность INMOM, которая отличает ее от других известных моделей океана, таких как MOM [10], модель ИВМ и ИОРАН [11], использующих z -систему координат, а так же POM [12] и ROMS [13] в σ -системе координат и других заключается в том, что при численной реализации в INMOM используется метод расщепления по физическим процессам и пространственным координатам.

Метод расщепления дает возможность эффективно реализовывать обладающие малой диссипативностью квази-полуявные схемы интегрирования по времени, которые позволяют применять в модели временные шаги в несколько раз большие, чем в моделях общей циркуляции океана, основанных на явных схемах с аналогичными

пространственным разрешением и коэффициентами вязкости и диффузии.

Для более точного описания процессов динамики океана оператор боковой диффузии второго порядка для тепла и соли представлен в форме, эквивалентной горизонтальной диффузии в обычной z -системе координат [6]. В уравнениях движения для описания боковой вязкости, используется оператор 4-го порядка, эффективно подавляющий 2-х шаговую моду численного шума.

Рассматриваемая модель INMOM использовалась в двух версиях – модель 1 (M1) и модель 2 (M2). В M1 использовалось равномерное пространственное разрешение для акватории ЧАМ с шагом ~4 км. M2 реализовывалась для акватории ЧМ, но с неравномерными по пространству шагами, которые у побережья БС уменьшаются до 50 м.

Необходимость использования двух моделей обусловлена тем, что по M1 можно быстро рассчитывать циркуляцию всего ЧМ на любой заданный физический момент времени, поскольку временной шаг этой модели большой, порядка 5 минут. Вторая же модель M2 требует значительных вычислительных ресурсов, поскольку она имеет большую размерность сеточного пространства, а ее временной шаг – 30 с. Предполагается, что M2 будет использоваться только в моменты расчета распространения ЗВ, причем начальное гидрологическое состояние для M2 задается из расчетов по M1 путем интерполяции. Поскольку M2 реализуется на акватории всего ЧМ, то проблема условий на жидких границах, которая неизбежно возникла бы при использовании региональной модели высокого разрешения, исчезает. Ниже дано краткое описание особенностей моделей M1 и M2.

1.1. Модель M1 для расчета динамики Черного и Азовского морей

Более подробно с M1 как версии модели INMOM для ЧАМ можно ознакомиться по работе [5]. Пространственное разрешение модели 3' и 2'24" по долготе и широте соответственно, что составляет ~4 км. Сеточная область в горизонтальной плоскости содержит 287 × 160 узлов. По вертикали задается 40 неравномерно распределенных по глубине σ -уровней.

Для задания глубин использовались данные по топографии Земли GEBCO (<http://www.gebco.net>) с пространственным разрешением 30". Исходные данные высокого разрешения сглажены несколько раз с помощью фильтрации Тьюки и ограничены минимальной глубиной 1 м. Это необходимо для σ -модели, поскольку используется преобразование вертикальной координаты (1), и, следовательно, функция $H = H(\lambda, \varphi)$ должна быть отличной от нуля и обладать достаточной гладкостью

на выбранной пространственной сетке, поскольку она входит во все операторы разностного дифференцирования [5].

Для построения начальных условий по T и S использованы данные Морского гидрофизического института Национальной академии наук Украины (МГИ НАНУ) [14], представляющие собой 3-х мерные среднемесячные климатические поля для акватории ЧМ с пространственным разрешением порядка 25–50 км, которые интерполировались на сеточную область модели.

Параметризация крупномасштабной горизонтальной турбулентной диффузии для температуры и солёности осуществлялась с помощью оператора 2-го порядка с коэффициентом $50 \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$. В качестве горизонтальной вязкости использовался оператор 4-го порядка с коэффициентом $10^9 \text{ м}^4/\text{с}$.

Коэффициенты вертикальной вязкости и диффузии выбирались согласно параметризации Филандера–Пакановского [15]. Коэффициент вертикальной вязкости изменялся от 10^{-4} до $10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$, а диффузии – от 0.5×10^{-5} до $0.5 \times 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ для T и от 0.1×10^{-5} до $0.1 \times 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ для S . В случае неустойчивой стратификации для параметризации конвективного перемешивания коэффициент вертикальной диффузии задавался равным значению $2 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$. Чтобы избежать возможных для σ -модели ситуаций “выклинивания” вертикальных профилей T , S и скорости в приповерхностном 2.5-метровом слое океана для более интенсивного перемешивания коэффициенты диффузии и вязкости задавались тому же значению $2 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$. Для T и S 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 [5].

Для верификации М1 и расчета начального состояния гидрофизических полей ЧАМ для М2 был произведен расчет по М1 за период с 01.01.2007 г. по 31.12.2008 г. Расчет атмосферного воздействия осуществлялся по балк-формулам (см., например, [16]) по приводным синоптическим характеристикам атмосферы из базы данных Европейского центра среднесрочного прогноза погоды (ЕЦСПП) Era-Interim (http://data-portal.ecmwf.int/data/d/interim_full_daily/) с пространственным разрешением 0.75° . Сток рек задавался по данным климатического года CORE [17] в виде псевдоосадков, сосредоточенных в акваториях, примыкающих к устьям рек.

Отличие от серии экспериментов из [5], проведенных для 2006–2008 гг., заключалось в использовании так наз. наджинга [18] с коэффициентом релаксации $1/120 \text{ сут}^{-1}$ для “притяжки” модельной солёности на глубинах ниже 300 м к климати-

ческим значениям. Осуществлялась также притяжка поверхностной солёности к климатическим данным путем введения в поток соли на поверхности моря, рассчитываемый через поток пресной воды, релаксационной добавки, представляющей собой разность модельной и климатической приповерхностной солёности умноженной на коэффициент $\alpha_S = 10 \text{ м}/120 \text{ сут}$. Выбранное значение коэффициента α_S можно интерпретировать как релаксацию модельной солёности, осредненной по 10-ти метровому верхнему слою, к климатическим значениям с 120-ти суточным временным масштабом.

Необходимость использования наджинга и коррекции потока пресной воды на поверхности моря диктуется тем, что точность задания осадков и стока рек недостаточно высока. С помощью такой методологии проведения экспериментов модельная солёность не отклоняется сильно от климатического состояния, что необходимо при проведении экспериментов на длительные времена. С помощью этого корректируется также и солёностный режим в области Босфора, несмотря на то, что поток массы через него не задавался.

По рассчитанным по М1 полям уровня и приповерхностных течений ЧАМ на момент 14.04.2007 г. хорошо выделяется Основное черноморское течение (ОЧТ), которое образует так наз. “очки Книповича” в виде крупномасштабных полузамкнутых круговоротов, занимающих почти всю акваторию Черного моря (рис. 1). На этом рисунке хорошо просматривается вихревая структура циркуляции Черного моря. Вихри сопровождают ОЧТ, поскольку они формируются за счет его бароклинной неустойчивости под влиянием комплекса гидрометеорологических процессов. При этом на прибрежной периферии ОЧТ во многих районах моря регулярно возникают вихри-круговороты диаметром до 50–100 км с антициклоническим вращением вод, которые зачастую имеют собственные названия – Батумский, Сочинский, Керченский, Крымский, Болгарский и Синопский круговороты.

Выявленная картина рассчитанных течений хорошо согласуется с картами течений, которые можно найти в многочисленных публикациях МГИ НАНУ (см. например, [19]), а также они неплохо согласуются с данными, представленными на сайте MYOCEAN (<http://www.myocean.eu>). При этом следует отметить, что в рассчитанной по М1 циркуляции квазистационарный Батумский антициклонический вихрь (БАВ) выражен недостаточно отчетливо. По-видимому, для более адекватного воспроизведения реальной циркуляции Черного моря с помощью М1 необходимо развивать систему усвоения данных наблюдений, и в первую очередь, спутниковых данных о температуре поверхности моря.

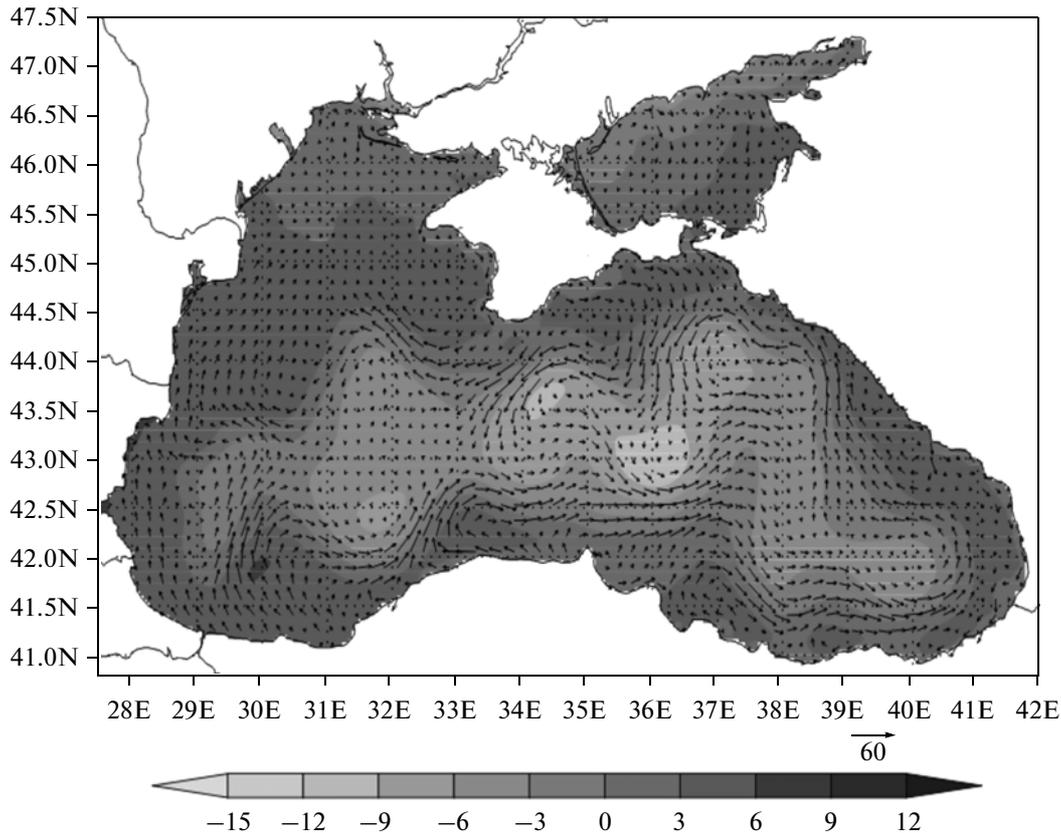


Рис. 1. Рассчитанные по М1 поле отклонений уровня моря (градации серого) и приповерхностные течения (векторы скоростей) Черного и Азовского морей на 14 апреля 2007 г. Шкала серого цвета отклонений уровня в см и масштаб стрелок векторов скоростей течений в см/с, показанных для каждой 3-й точки по широте и долготе, помещены под рисунком.

Черное море включено в программу ныряющих буев АРГО (<http://www-argo.ucsd.edu>), используемых для проведения океанографических измерений в верхнем слое морей и океанов в реальном масштабе времени. Рисунок 2 показывает, что в модели хорошо воспроизводятся реальные профили T и S , в которых отчетливо прослеживается холодный промежуточный слой (ХПС), являющийся неотъемлемой особенностью ЧМ.

1.2. Модель М2 для расчета динамики вод Черного моря и переноса загрязняющих веществ в районе Большого Сочи

Для М2 была построена сеточная область для ЧМ со сгущением в прибрежной области БС. Для этого используется сферическая система координат с положением одного из полюсов в точке с географическими координатами 40.0052° E и 43.5913° N в районе населенного пункта Красная скала. Неравномерность сеточной области задавалась так, что шаги по пространству составляют порядка 50 м в акватории БС и доходят до 5–9 км в западной части ЧМ. По вертикали задается 20 неравномерно распределенных по глубине

σ -уровней. Общий размер сеточной области, показанной на рис. 3а, составляет в плане 759×600 точек по модельной долготе и широте соответственно, что приблизительно в 10 раз больше, чем в М1. С учетом уменьшения шага по времени скорость расчета М2 приблизительно в 30–40 раз медленнее скорости расчета М1. Наша методология позволяет наиболее качественно описать циркуляцию в нужном районе и устраняет проблему задания условий на его жидких границах. При этом расчет циркуляции в остальной части ЧМ практически не оказывает влияние на быстрое действие модели М2, так как основная вычислительная нагрузка ложится именно на расчетную область вблизи БС (рис. 3б).

Для задания глубин данные GEBCO переводились на сеточную область М2 по такой же методологии, как и для М1. За счет сгущения сеточной области в акватории, непосредственно примыкающей к побережью Большого Сочи, описывается сложный характер батиметрии, проявляющийся при высоком пространственном разрешении (рис. 4).

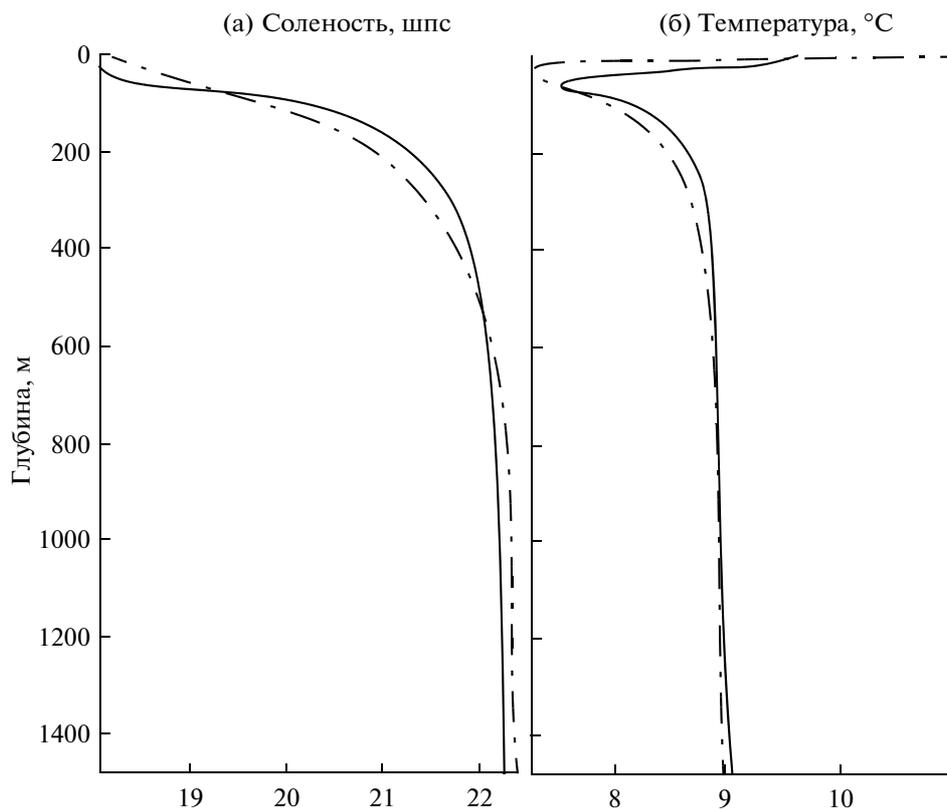


Рис. 2. Профили солености (слева) и температуры (справа) Черного моря по результатам моделирования (прерывистая) и буя АРГО № 4900489 (сплошная) на 14 апреля 2007 г.

По вертикали коэффициенты физических параметризаций для М2 выбирались точно такими же, как и для М1. Коэффициент горизонтальной диффузии брался пропорциональным пространственному шагу сеточной области, а коэффициент вязкости 4-го порядка — пропорциональным его квадрату. Поэтому, когда шаги в М1 и М2 совпадали, то совпадали и значения коэффициентов.

Эксперимент с версией М2 проводился для периода половодья с 01.04.2007 г. по 30.04.2007 г. Атмосферный форсинг для М2 брался тем же, что и для М1. Начальные условия получены из модели М1 на 01.04.2007 г. сначала путем билинейной интерполяции на сетку М2 по горизонтали, а затем путем линейной интерполяции по вертикали. Граничные условия в М2 задавались такими же, что и для М1, за исключением стока рек Мзымта, Сочи и Хоста. Для этих рек задавались реальные климатические расходы стоков весеннего половодья [20], которые составляли для р. Сочи — $42 \text{ м}^3/\text{с}$, р. Хоста — $17 \text{ м}^3/\text{с}$ и р. Мзымта — $144 \text{ м}^3/\text{с}$. Эти расходы пересчитывались в изменение уровня моря в устьях этих рек. Такой способ позволяет учитывать как влияние речного стока на соленость [12, 21, 22], так и динамический фактор формирования скоростей стока рек за счет градиента уровня моря.

На рис. 5 показаны отклонения уровня и приповерхностные скорости течений рассчитанные по М2 на тот же момент времени 14.04.2007 г., что и рассчитанные по М1 (рис. 1). Рассчитанные по версии М2 карты уровня моря и векторов скоростей течений (рис. 5) более адекватно по сравнению с версией М1 (рис. 1) отражают вихревую циркуляцию в восточной части ЧМ с наличием Батумского, Кавказского и Крымского антициклонических вихревых образований (см., например, [23]). Эти вихри существенным образом влияют на динамику прибрежных вод и, следовательно, на распространение ЗВ. Особенно улучшение заметно в воспроизведении квазистационарного БАВ, который является самым интенсивным вихревым образованием в восточной части ЧМ [24, 25]. Модели М1 и М2 имеют полностью идентичный программный код и для них используется один и тот же, довольно грубый атмосферный форсинг. Поскольку основное отличие между М1 и М2 заключается в горизонтальном пространственном разрешении моделей, то можно сделать вывод, что для хорошего воспроизведения БАВ необходимо пространственное разрешение порядка 1.5 км , которое достигается в М2 для юго-восточной части ЧМ. Более того, грубость пространственного разрешения используемого атмосферного форсин-

га позволяет сделать заключение, что основной фактор формирования БАВ — топографические особенности донного рельефа в этой части моря.

2. РАСЧЕТ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В АКВАТОРИИ БОЛЬШОГО СОЧИ

Для расчета распространения загрязняющих веществ решается уравнение переноса-диффузии концентрации ЗВ как консервативной пассивной примеси. По горизонтали в INMOM используется монотонная схема переноса-диффузии, представляющая собой ту же полудивергентную схему, которая используется для T и S , но с коэффициентом боковой диффузией равным произведению модуля скорости и половине шага пространственной сетки. По вертикали используется та же схема переноса и параметризации турбулентной диффузии, что и для T и S . Такая же методика расчета переноса ЗВ использовалась при моделировании распространения радиоактивного загрязнения от АЭС “Фукусима 1” и показала хорошие результаты [26].

При расчетах распространения ЗВ полагалось, что они поступают в прибрежные воды БС из рек Сочи, Хоста и Мзымта и из 18-ти труб глубоководных выпусков сточных вод (рис. 4). Положение выходов труб было любезно предоставлено Сочинским специализированным центром по гидрометеорологии и мониторингу Черного и Азовского морей (СЦГМС ЧАМ). Поскольку эти стоки имеют различную природу, то в М2 они рассчитываются по отдельности. Причем при вытоке из труб учитывалось также, что сточные воды пресные и влияют на распределение солёности. Для выполнения расчетов объёмная концентрация условного загрязнителя, согласно оценкам ГОИН, в воде рек принималась $C_{\text{рек}} = 0.03 \text{ м}^3/\text{м}^3$, а сточные воды из труб полагаются полностью загрязненными — $C_{\text{труб}} = 1 \text{ м}^3/\text{м}^3$. На каждом модельном шаге по времени поступление ЗВ в ближайшие ячейки модели рассчитывается согласно поступившим за этот модельный шаг объёмным стокам рек и труб, умноженным на соответствующие концентрации, и мгновенным разбавлением ЗВ по объёмам соответствующих ячеек. Суммарное поступление ЗВ от всех рек составляло $\sim 6 \text{ м}^3/\text{с}$, а суммарное поступление ЗВ от всех труб $\sim 2 \text{ м}^3/\text{с}$.

На рис. 6 представлены карты распространения ЗВ на поверхности моря от труб и рек для 15 и 30 апреля 2007 г. Эти карты построены в обычной географической системе координат путем интерполяции результатов расчетов на сеточную область с шагом около 2.5 км.

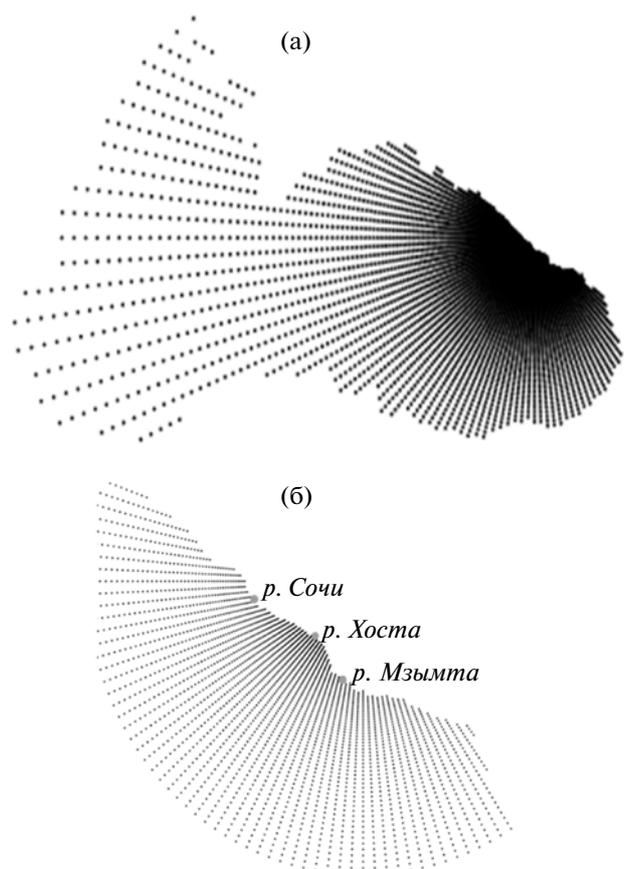


Рис. 3. Сеточная область М1 со сгущением сетки в районе Большого Сочи. Вверху — для всего Черного моря (а), внизу — детализация для акватории у Большого Сочи с отметками устьев рек Сочи, Хоста и Мзымта (б). Показаны каждая 10-я точка по модельной долготе и каждая 3-я по модельной широте.

Минимальный рассматриваемый уровень безразмерной концентрации ЗВ принимался равным 10^{-7} объёмных долей ЗВ в воде, что вполне сопоставимо с уровнем ПДК для основных загрязнителей в морской воде. Для наглядности того, что перенос вещества горизонтальными течениями играет основную роль в распространении ЗВ, на карты нанесены векторы приповерхностных соответствующих им скоростей течений. Расчеты подтвердили ожидаемый результат, что на поверхности моря наблюдается значительно большее поступление ЗВ от рек, чем от сточных труб, так как в принятом сценарии общее поступление ЗВ от рек в 3 раза больше.

Следует отметить, что у кавказского побережья ЧМ наблюдается сложная вихревая структура течений, которая переносит ЗВ вдоль побережья как на северо-запад, так и на юго-восток. Подобная вихревая структура отмечается в ряде работ как по наблюдениям [27, 28], так и по результатам

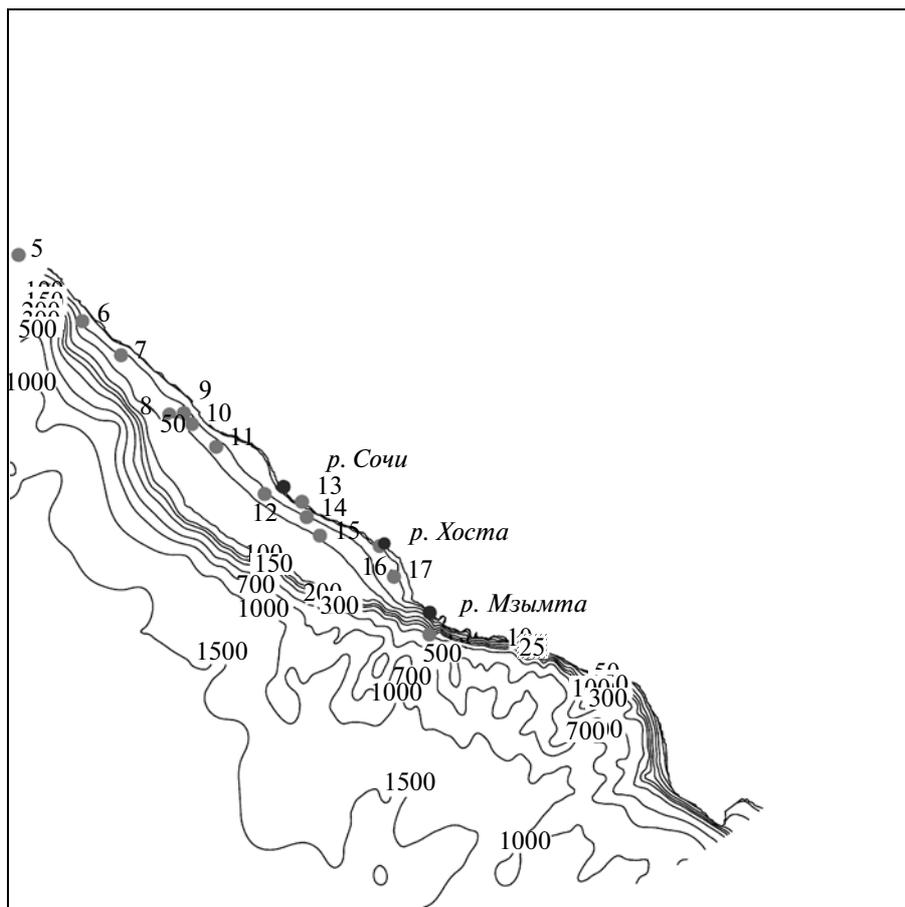


Рис. 4. Топография дна (в м) Черного моря в модели 2 со сгущением сетки в районе Большого Сочи. Черными кружками отмечены устья рек Сочи, Хоста и Мзымта, а серыми – места 18 оголовков труб вытоков сточных вод.

численного моделирования [25, 29]. На полученных в ходе эксперимента картах (рис. 6) выделяются как квази-геострофические вихри с размером более радиуса деформации Россби $R_d \approx 15\text{--}20$ км [30], так и более мелкомасштабные агеострофические вихревые образования, обнаруживаемые также и по натурным наблюдениям [27, 28]. Выделенные мезомасштабные вихри осуществляют основной перенос ЗВ, формируя сложную структуру поля распространения ЗВ. В результате их действия высокая концентрация ЗВ может проявиться далеко от локального места выхода в море речных или сточных вод. Характер распространения ЗВ может служить хорошим индикатором сложного вихревого поля прибрежных течений Черного моря.

Следует отметить, что формирование мезомасштабных квазигеострофических вихрей происходит при активном взаимодействии течений и плотностной стратификации [31, 32]. Поэтому представляется необходимым и оправданным использование сложной и физически полной модели течений высокого пространственного разре-

шения с прогностическим расчетом температуры и солёности даже для такой малой, по сравнению со всем морем, прибрежной акватории Большого Сочи.

Хотя в исследуемом районе БС вдольбереговой перенос ЗВ под воздействием изменчивой структуры ветров может осуществляться в обе стороны, но все же в среднем большая часть ЗВ переносится на северо-запад согласно генеральному направлению ОЧТ. Такой характер вдольберегового распространения отмечается также в [33].

Для оценки особенностей вертикального распространения ЗВ был построен поперечный берегу разрез распространения суммарных концентраций ЗВ от рек и труб на конец расчета 30.04.2007 г. (рис. 7). Его положение около трубы № 13 показано на рис. 6г. Для оценки характера распространения ЗВ на карту были наложены соответствующие им мгновенные линии тока скорости течений. Для построения карт вертикального распределения ЗВ результаты моделирования интерполировались из σ -системы на обычные глубины

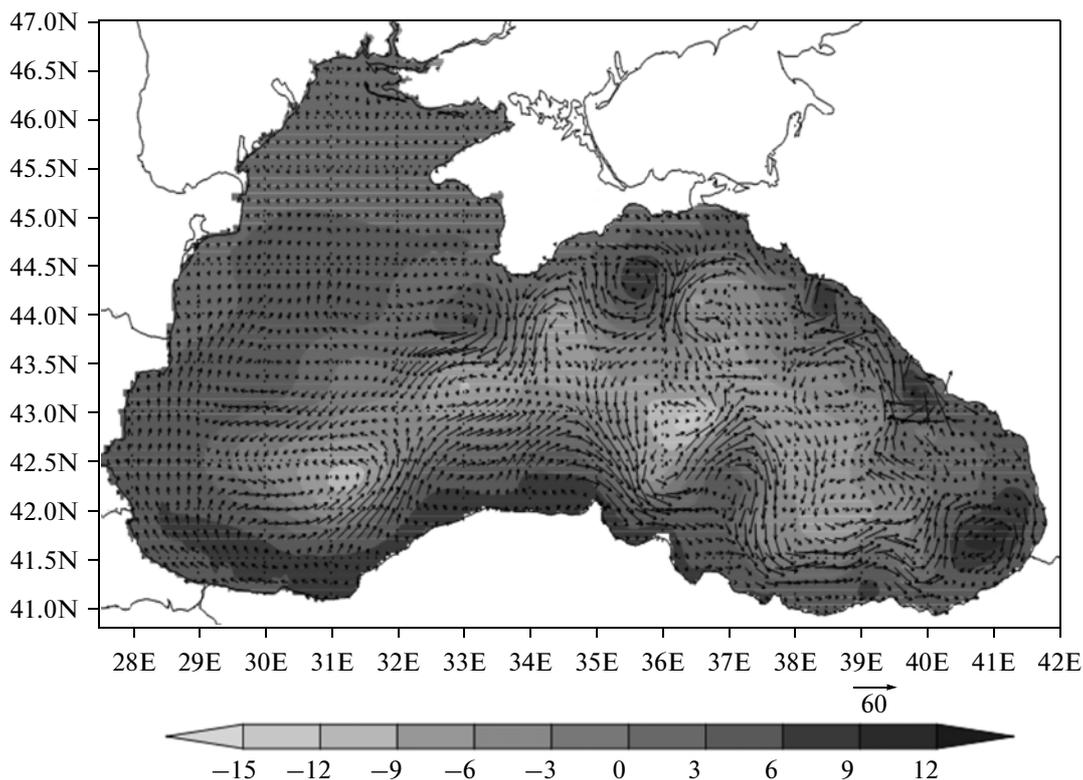


Рис. 5. То же, что и на рис. 1, но результаты по М2 интерполированные на сетку М1.

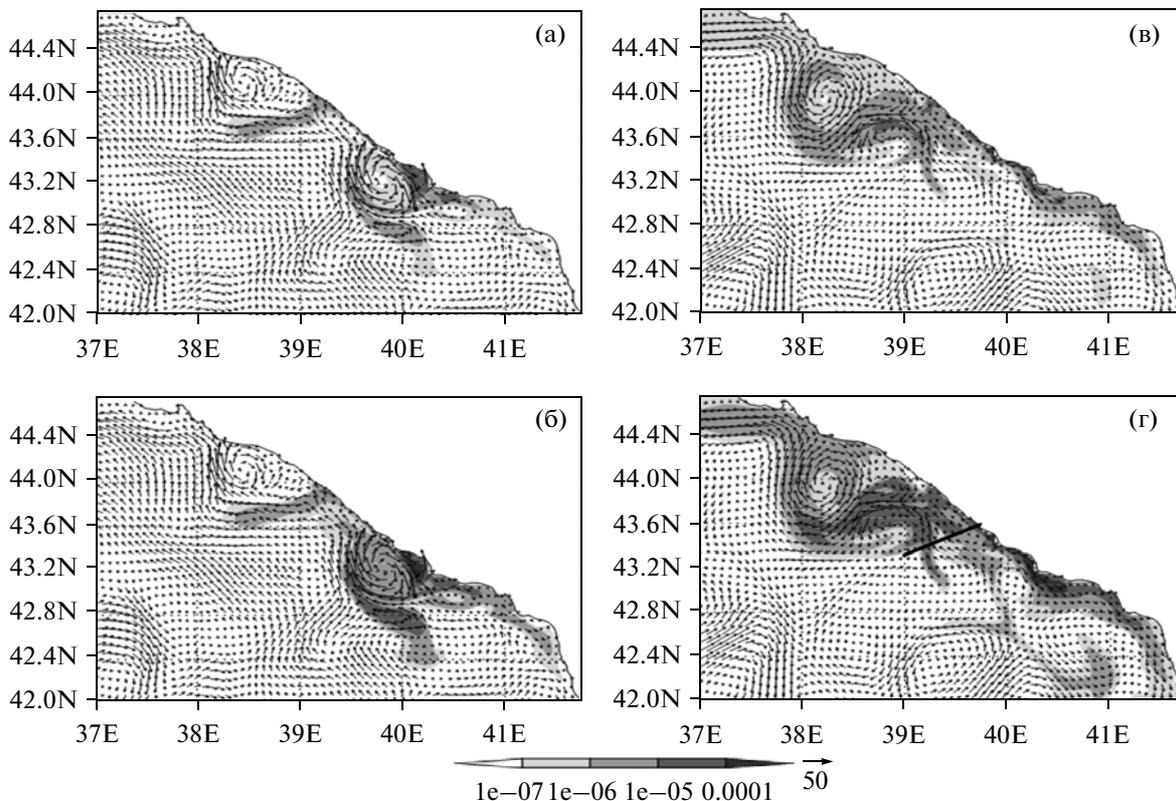


Рис. 6. Распространение ЗВ на поверхности моря от труб (а, в) и рек (б, г) для 2-х моментов времени: 15 (а, б) и 30 (в, г) апреля 2007 г. Шкала градаций концентрации ЗВ показана внизу. На карты концентрации ЗВ нанесены векторы скоростей течений на поверхности океана с масштабом стрелок в см/с, указанным под рисунками. На (г) показано положение разреза около трубы № 13.

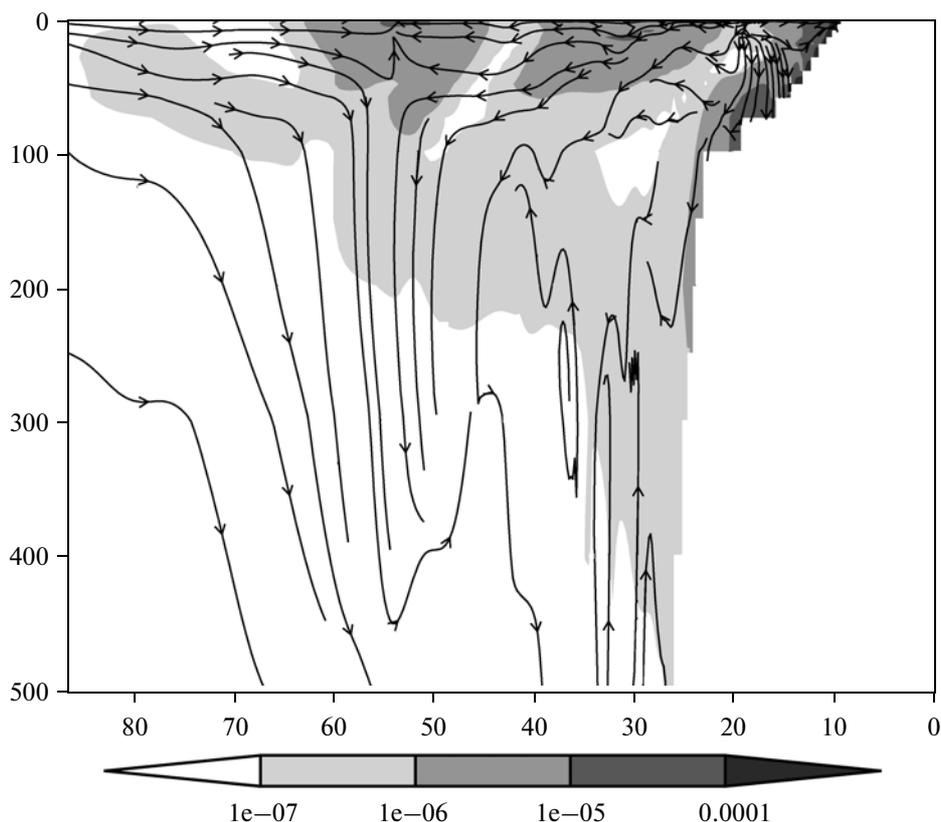


Рис. 7. Поперечный берегу разрез распространения суммарных концентраций ЗВ от рек и труб на 30.04.2007 г. Его положение показано на рис. 6 г. Соответствующие направления скорости течений показаны в виде линий тока. По горизонтальной оси отсчитывается расстояние в км, по вертикальной – глубина в м. Шкала градаций концентрации ЗВ показана справа.

ны. Полученные результаты подтверждают, что распространение ЗВ по вертикали носит адвективный характер, как и в горизонтальной плоскости (рис. 6). При этом распространение ЗВ в глубинные слои ниже 150 м, хотя и в малых концентрациях, происходит за счет вертикальных движений, сгенерированных сложной вихревой структурой склоновых прибрежных течений в полосе шириной порядка 50 км. При этом наибольшую роль в поступлении ЗВ вглубь до 500 м за месяц играют склоновые течения, вертикальная составляющая которых достигает 0.02 см/с.

На расстоянии от берега более 50 км загрязнения не поступают глубже 100 м. Очевидно, что здесь течения в основном становятся квазигеострофичными и черноморский соленостный галоклин, хорошо видимый на рис. 2, начинает выполнять свою запирающую роль, препятствуя вентиляции глубинных слоев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предложена методика расчета распространения загрязняющих веществ на

прибрежной акватории ЧМ, прилегающей к району БС. Она основана на применении гидродинамической модели INMOM в двух версиях М1 и М2. В М1 использовалось равномерное пространственное разрешение модели с шагом ~4 км на всей акватории ЧАМ. В М2 использовалась неравномерная по пространству сеточная область с увеличением разрешения у побережья БС до ~50 м. По М1 быстро рассчитывается циркуляция всего Черного моря на любой заданный момент времени. У М2 временной шаг существенно меньше, а сеточное пространство существенно больше, чем в М1, поэтому она требует больших вычислительных ресурсов. Для расчета распространения ЗВ в локальной области начальное гидрологическое состояние задается из М1, а М2 используется только в периоды расчета переноса загрязнения. Поскольку обе версии реализованы для акватории всего ЧМ, то исчезает проблема условий на “жидких” границах, которая неизбежно возникла бы при использовании региональной модели высокого разрешения.

Атмосферный форсинг для М1 и М2 рассчитывался по данным Eta-Interim с довольно гру-

бым для ЧМ пространственным разрешением 0.75° . Показано, что обе версии М1 и М2 адекватно данным наблюдений воспроизводят сложный характер циркуляции вод моря. Версия М2 со сгущением сетки более точно воспроизводит вихревую циркуляцию в восточной части ЧМ с наличием Батумского, Кавказского и Крымского антициклональных вихревых образований. Это позволяет сделать вывод, что для воспроизведения вихревой структуры циркуляции ЧМ необходимо пространственное разрешение порядка 1.5 км, а основной фактор формирования квазистационарного БАВ – топографические особенности в этой части акватории моря. Адекватно данным буев АРГО воспроизводится вертикальная структура распределения T и S , характеризующейся наличием ХПС.

Расчет распространения ЗВ в прибрежной акватории БС проводился по М2 для периода полуводья с 01.04.2007 г. по 30.04.2007 г. с помощью монотонной схемы переноса. Полагалось, что ЗВ поступают из рек Сочи, Хоста и Мзымта и из 18-ти труб глубоководных выпусков сточных вод. Показано, что большой вклад в распространение ЗВ осуществляют мезомасштабные образования. Они формируют сложную структуру поля распространения ЗВ, вследствие чего высокая концентрация ЗВ может проявиться далеко от мест их выхода в море. Распространение ЗВ в глубинные слои ниже 150 м (хотя и в малых концентрациях) происходит за счет вертикальных движений, сгенерированных сложной вихревой структурой склоновых прибрежных течений в полосе шириной порядка 50 км. Мористее ЗВ не поступают глубже 100 м. Очевидно, что здесь течения становятся более геострофичными и черноморский соленостный галоклин препятствует вентиляции глубинных слоев.

Проведенные исследования динамики вод Черного моря с использованием комплекса моделей М1 и М2 позволили определить характер распространения загрязняющих веществ в водах района Большого Сочи, который в основном определяется синоптическим ветровым воздействием. Поскольку разработанная методика расчета распространения ЗВ на акватории БС будет встроена в систему оперативного расчета циркуляции Черного моря с использованием М1, то к используемому атмосферному воздействию должно быть предъявлено требование адекватности изменчивости ветра в прибрежной области. Для более точного по сравнению с Eta-Interim расчета атмосферного воздействия будет использоваться негидростатическая модель атмосферной циркуляции WRF (Weather Research and Forecasting model) [34], которую можно использовать также в режиме прогноза. Кроме этого, для более адекватного воспроизведения реальной циркуляции ЧАМ с помощью

М1 будет развиваться система усвоения данных наблюдений, и в первую очередь, спутниковых данных о температуре поверхности моря.

Результаты, полученные в настоящей работе, могут быть внедрены в оперативную практику на базе ГОИНа, в котором накоплен большой опыт анализа временной динамики и пространственного распределения ЗВ в акватории ЧМ [2, 3, 35]. С помощью численного моделирования и имеющихся данных мониторинга предусматривается разработать оперативные практические рекомендации для обеспечения рационального и экологически безопасного природопользования на акватории шельфа.

Авторы выражают благодарность сотруднику ЦСГМС ЧАМ Ю.И. Юренко за предоставленную информацию о характеристиках поступающих в море ЗВ из района БС, а также сотруднику ГОИН А.В. Григорьеву за помощь в получении отдельных материалов, использованных в работе. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (Соглашение № 8352) и РФФИ (проект № 12-05-90415-Укр-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев А.В., Зацепин А.Г., Кубряков В.А., Чариков И.В. Численное моделирование динамики вод российской зоны Черного моря – технология и верификация на основе реальных данных // Создание искусственных пляжей, островов и других сооружений в береговой зоне морей, озер и водохранилищ. Труды 2-й Международной конференции “Создание и использование искусственных земельных участков на берегах и акватории водоемов”, Новосибирск: Изд-во СОРАН, 2011. С. 129–132.
2. Oil spill accident in the Kerch Strait in November 2007. Black Sea Commission Publications. (Eds). Korshenko A., Ilyin Yu., Velikova V. Moscow: Nauka, 2011. 288 p.
3. Korshenko A. The State of Total Petroleum Hydrocarbons (TPHs) // State of the Environment of the Black Sea (2001–2006/7) / Ed. Temel Oguz. Istanbul: 2008. P. 113–129.
4. Коршенок А.Н., Панова А.И. Динамика нефтяного загрязнения Керченского пролива после аварии танкера “Волгонефть-139” 11 ноября 2007 г. // Исследования океанов и морей. Труды ГОИН. Вып. 212. Обнинск: Артифекс, 2009. С. 197–208.
5. 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 J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2012. V. 27. № 1. P. 95–111.
6. Дианский Н.А., Багно А.В., Залесный В.Б. Сигма-модель глобальной циркуляции океана и ее чувствительность к вариациям напряжения трения ветра // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38. № 4. С. 537–556.
7. Дианский Н.А., Залесный В.Б., Мошонкин С.Н., Русаков А.С. Моделирование муссонной циркуля-

- ции Индийского океана с высоким пространственным разрешением // *Океанология*. 2006. Т. 46. № 4. С. 421–442.
8. *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. 25. № 6. P. 581–609.
 9. *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.
 10. *Pacanovsky R.C., Griffies S.M.* The MOM 3 Manual. Geophysic Fluid Dynamics Laboratory. Princeton: NOAA, 1999. 680 p.
 11. *Ибраев Р.А., Хабеев Р.Н., Ушаков К.В.* Вихреразрешающая $1/10^\circ$ модель Мирового океана // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2012. Т. 48. № 1. С. 45–55.
 12. *Blumberg A.F., Mellor G.L.* A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model // *Three-dimensional coastal ocean models, Coastal and Estuarine series* / Ed. Heaps N.S. Washington: AGU, 1987. V. 4. P. 1–16.
 13. *Shchepetkin A.F., McWilliams J.C.* The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model // *Ocean Modelling*. 2004. V. 9. P. 347–404.
 14. *Belokopytov V.N.* Ocean Station Tool: Software package for processing and analysis of oceanographic data // *International Marine Data and Information Conference – IMDIC (May, 31–June 3, 2005). Abstracts.* – Brest, France, 2005. 67 p.
 15. *Pacanovsky R.C., Griffies S.M.* The MOM 3.0 Manual. Geophysic Fluid Dynamics Laboratory. Princeton: NOAA, 2000. 680 p.
 16. *Гилл А.* Динамика атмосферы и океана. В 2-х томах. Т. 2. М.: Мир, 1986. 415 с.
 17. *Large W., Yeager S.* 2004. Diurnal to decadal global forcing for ocean and sea-ice models: the data sets and flux climatologies. NCAR Technical Note: NCAR/TN-460+STR. Boulder: CGD Division of the National Center for Atmospheric Research. 105 с.
 18. *Lorenc A.C., Bell R.S., MacPherson B.* The Meteorological Office analysis correction data assimilation scheme // *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 1991. V. 117. P. 59–89.
 19. *Korotaev G.K., Oguz T., Dorofeev V.L. et al.* Development of Black Sea nowcasting and forecasting system // *Ocean Sci.* 2011. V. 7. P. 629–649.
 20. *Джаошвили Ш.В.* Речной сток и сток наносов в Черное море // *Водные ресурсы*. 1999. Т. 26. № 3. С. 275–282.
 21. *Ибраев Р.А.* Исследование чувствительности решения модели динамики Черного моря к условию свободной поверхности моря // *Океанология*. 2001. Т. 29. № 5. С. 645–652.
 22. *Ибраев Р.А.* Математическое моделирование термогидродинамических процессов в Каспийском море. М.: ГЕОС, 2008. 128 с.
 23. *Stanev E.V.* Understanding Black Sea dynamics: Overview of recent numerical modeling // *Oceanography*. 2005. V. 18. № 2. P. 56–75, <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2005.42>.
 24. *Korotaev G., Oguz T., Nikiforov A., Koblinsky C.* Seasonal, interannual, and mesoscale variability of the Black Sea upper layer circulation derived from altimeter data // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № C4. P. 3122. doi:10.1029/2002JC001508, 2003.
 25. *Кордзадзе А.А., Деметрашвили Д.И.* Краткосрочный прогноз гидрофизических полей в восточной части Чёрного моря // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2013. Т. 49. № 6.
 26. *Дианский Н.А., Гусев А.В., Фомин В.В.* Особенности распространения загрязнений в северо-западной части Тихого океана // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2012. Т. 48. № 2. С. 247–266.
 27. *Марчук Г.И.* Методы вычислительной математики. СПб: Лань, 2009. 608 с.
 28. *Зацепин А.Г., Баранов В.И., Кондрашов А.А., Корж А.О.* Субмезомасштабные вихри на Кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 4. С. 592–605.
 29. *Kubryakov A., Korotaev G., Ratner Yu. et al.* The Black Sea Nearshore Regions Forecasting System: operational implementation, Coastal to Global Operational Oceanography: Achievements and Challenges / Eds: Dahlin H., Bell M.J., Flemming N.C., Petersson S.E. Proceedings of the Fifth International Conference on EuroGOOS, 20–22 May, Exeter, UK. Southampton: University of Southampton, 2008. P. 293–296.
 30. *Дорофеев В.Л., Демьяшев С.Г., Коротаев Г.К.* Вихреразрешающая модель циркуляции Черного моря // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: НПЦ “ЭКОСИ-Гидрофизика”, 2001. С. 73–82.*
 31. *Дианский Н.А.* Динамические характеристики линзы распресненных вод в экваториальной зоне Атлантики // *Тр. ГОИН. Вып. 197.* 1991. С. 96–104.
 32. *Анисимов М.В., Дианский Н.А.* Физический механизм западного дрейфа рингов фронтальных течений в океане // *Океанология*. 2008. Т. 48. № 3. С. 325–332.
 33. *Косьян Р.Д., Подымов И.С., Пыхов Н.В.* Динамические процессы береговой зоны моря. М.: Научный мир, 2003. 320 с.
 34. *Skamarock W.C.* A Description of the Advanced Research WRF. Version 3 Boulder: NCAR Technical Notes. 2008. 113 p.
 35. *Корищенко А.Н., Матвейчук И.Г., Плотникова Т.И. и др.* Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2009. Обнинск: Артифекс, 2010. 174 с.

Calculations of Currents and Spread of Pollution in the Coastal Waters of Big Sochi

N. A. Dianskii^{a, b}, V. V. Fomin^{a, c}, N. V. Zhokhova^a, and A. N. Korshenko^a

^a Zubov State Oceanographic Institute, Kropotkinskii per. 6, Moscow, 119034 Russia

^b Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, ul. Gubkina 8, Moscow, 119991 Russia

^c Moscow Institute of Physics and Technology, Institutskii per. 9, Dolgoprudnyi, Moscow oblast, 141700 Russia
e-mail: dinar@inm.ras.ru

Received February 18, 2013; in final form, April 3, 2013

Abstract—We suggested a method for calculating the spreading of pollutants over the Black Sea water basin adjacent to Big Sochi. The model is based on the application of the Institute of Numerical Mathematics Ocean Model (INMOM) over the entire basin of Big Sochi in two versions: M1 and M2. In the first version, we use uniform spatial resolution of the model with a step of ~4 km; in the M2 version, the resolution is not uniform. The step decreases to 50 m in the basin of Big Sochi. The M2 version is used only in the periods when pollution transport is calculated, for which the initial hydrothermodynamic state is specified from the M1 version. Both versions reflect a complex character of Black Sea circulation; however, the M2 version more adequately reproduces the eddy circulation in its eastern part, where the horizontal resolution of the M2 version is higher. A conclusion is made on this basis that, in order to reproduce the eddy structure of the Black Sea circulation, the resolution of the model should be on the order of 1.5 km and the main factor of the formation of the quasi-stationary Batumi anticyclonic eddy is the topographic peculiarities in this part of the sea. The pollution spreading from the Sochi, Khosta, and Mzymta rivers and from 18 pipes of deep-water sewage was calculated for the flood periods from April 1, 2007, to April 30, 2007. It was shown that mesoscale eddy formations that form a complex three-dimensional structure of pollution spreading make the greatest contribution to the spread of pollution.

Keywords: numerical model, modeling of currents, circulation, Black Sea, transport of pollutants in the sea environment.