

УДК 551.465:532.5-1/-9
DOI: 10.7868/S25000640200105

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ (НА ПРИМЕРЕ АЗОВСКОГО МОРЯ)

© 2020 г. Академик Г.Г. Матишов^{1,2}, В.В. Кулыгин¹, Г.В. Валов¹, А.Л. Чикин¹

Аннотация. Прогноз фактического состояния морской среды на заданный временной интервал представляет собой задачу, решение которой направлено на удовлетворение практических потребностей морского рыболовства, надводного и подводного плавания. Подготовка своевременных и качественных прогнозов является основной целью создания систем оперативной океанографии. Сегодня в основу таких систем положены суперкомпьютерные технологии решения задач численного моделирования циркуляции вод. В статье обозначены современные проблемы моделирования гидрофизических процессов, некоторые из них продемонстрированы на примере Азовского моря. Фундаментом оперативной океанологии является анализ базы данных за более чем 100-летний период. Данные фактических STD-измерений термохалинной структуры вод и течений должны использоваться для проверки качества модельных расчетов и прогнозов. Несмотря на заметное развитие систем мониторинга (особенно дистанционного), имеющихся в наличии данных все равно недостаточно для систематических сравнений с результатами расчетов. Использование нерепрезентативных данных наблюдений создает неоправданно завышенные ожидания от качества моделей. В статье кратко рассмотрена двухслойная математическая модель гидродинамики Азовского моря, созданная в Южном научном центре Российской академии наук. Представлено сравнение картины поверхностных течений Азовского моря по результатам расчета со схемой, построенной экспертом-гидрологом. Модель не отражает реальной картины: в результатах расчета отсутствует учет всех особенностей рельефа дна. Существующие технологии наблюдений и современные вычислительные возможности не позволяют непрерывно контролировать состояние Мирового океана с достаточно высокой точностью. Необходимо совершенствовать все компоненты системы наблюдений, увеличивая долю автономных гидрометеорологических комплексов в общей сети наземных и морских станций.

Ключевые слова: оперативная океанография, моделирование гидрофизических процессов, Азовское море.

MODERN ISSUES OF MODELING HYDROPHYSICAL PROCESSES (THE SEA OF AZOV CASE STUDY)

Academician RAS G.G. Matishov^{1,2}, V.V. Kulygin¹, G.V. Valov¹, A.L. Chikin¹

Abstract. Forecasting the actual state of the marine environment for a given time interval in future is a task solution of which is aimed to satisfying the practical needs of marine fishing, shipping and underwater navigation. The preparation of timely and high-quality forecasts is the main goal of creating operational oceanographic systems. Today, operational oceanographic systems are based on supercomputer technologies for numerical modeling of water circulation. The article outlines modern issues of modeling hydrophysical processes, some of which are demonstrated by the example of the Sea of Azov. The foundation of operational oceanography is the analysis of a database for more than a 100 year period. The CTD measurements of the water thermohaline structure and currents should be used to verify the quality of model simulations and forecasts. Despite the

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: kulygin@ssc-ras.ru

² Мурманский морской биологический институт Кольского научного центра Российской академии наук (Murmansk Marine Biological Institute, Kola Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian Federation), Российская Федерация, 183010, г. Мурманск, ул. Владимирская, 17

noticeable development of monitoring systems (especially remote), the available data is still insufficient for systematic comparisons with the simulation results. The use of non-representative observational data creates unreasonably high expectations for the models quality. In the article the two-layer mathematical model of the hydrodynamics of the Sea of Azov created at the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences is briefly discussed. The comparison of the surface currents of the Sea of Azov according to the simulation results with a diagram constructed by an expert hydrologist is presented. It is noted that the model does not reflect the real picture: the simulation results do not take into account all the features of the sea bottom topography. Existed observation technologies and modern computational capabilities do not allow to perform the continuous monitoring of the World Ocean state with sufficiently high accuracy. It is necessary to improve all components of the observing system, increasing the part of autonomous hydrometeorological complexes in the monitoring stations network.

Keywords: operational oceanography, modeling of hydrophysical processes, Sea of Azov.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие оперативной океанографии тесно связано с внедрением новых методов измерений параметров морской среды, совершенствованием численных моделей и процедур усвоения данных, развитием телекоммуникационных средств связи. Новые знания необходимы для подводного плавания, поиска и добычи рыбы в океане, для ориентации при бурении и сейсмопрофилировании шельфа. Качественное прогнозирование состояния морей и океанов должно обеспечивать своевременное реагирование на угрозы, связанные с природными и техногенными рисками [1]. После распада СССР сеть стационарных и передвижных постов наблюдений за морской и метеорологической обстановкой в стране резко сократилась, особенно за Полярным кругом. В таких условиях сделать качественный среднесрочный и долгосрочный прогноз изменений окружающей среды очень трудно [2; 3].

Велико значение и точного оперативного прогноза, который должен основываться на результатах прямых наблюдений. Это касается не только климата, но и морских биоресурсов. Только фактические данные, полученные с помощью научных и рыбопромысловых судов, могут служить источником объективной информации о запасах биоресурсов в океанах и морях – от рыб и морских млекопитающих до зоопланктона и первичных продуцентов [4].

В настоящее время существует множество моделей гидродинамики различных водоемов от океанических моделей до моделей озер и водохранилищ. Качество любой модели и ее прогноза зависит от трех составляющих [2]:

– количество реальных процессов, которые учитывает модель (волнение, сгонно-нагонные явления, морской лед и т.д.);

– корректность математического описания этих процессов;

– точность входных данных (поля ветра, атмосферного давления и т.д.).

Специальные модели применяются для мелководных водоемов (например, Азовского моря – глубина 14 м [5]), для шельфовых морей (например, Баренцева моря с глубинами 600 м, Черного моря – глубины до 500–2000 м [6] и т.д.), глубоководных районов океана (глубины более 2000 м [7]).

Определенный интерес представляют водоемы со сложным рельефом дна: глубоководные желоба, хребты, подводные котловины, – а также моря, где наряду с относительно глубоководными районами присутствуют большие по площади районы мелководья (прибрежная зона, лиманы, заливы и т.д.), глубина которых соразмерна с величиной перепада уровня воды при сгонно-нагонных явлениях. Применение уравнений мелкой воды к моделированию течений в таких водоемах не даст достоверной картины течений в глубоководных районах [8]. Для подобных водоемов наиболее распространенные методы моделирования гидрофизических процессов связаны с предварительным преобразованием области, таким как переход к σ -координатам [9].

Другие методы решения данной задачи основаны на использовании криволинейных или сгущающихся в определенной области сеток [10]. Для более точного описания границы вводятся специальные координатные системы, хорошо согласуемые с границей, или строятся специальные адаптивные сетки, которые подстраиваются в процессе расчетов под область и решение. Решение задач в областях с такой сложной геометрией возможно с использованием тетраэдральных сеток, позволяющих описывать область с необходимой точностью. Подобные задачи движения жидкости в водоеме можно так-

же решать на равномерных прямоугольных сетках в их общей постановке, но для этого по вертикали потребуется очень высокое разрешение сетки [11]. Все это значительно усложняет как решение задачи, так и ее численную реализацию, требуя от вычислительных устройств высокого быстродействия и большого объема памяти.

В настоящей работе обозначены современные проблемы моделирования гидрофизических процессов, некоторые из которых продемонстрированы на примере Азовского моря.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Фундаментом оперативной океанологии должен быть анализ базы данных за более чем 100-летний период. Наиболее полной в настоящее время является объединенная база *in situ* океанографических данных NOAA [12], где собраны мировые наблюдения, в том числе Мурманского морской биологический институт Кольского научного центра Российской академии наук (ММБИ) и Южного научного центра Российской академии наук (ЮНЦ РАН).

В распоряжении ЮНЦ РАН находится база данных по южным морям, охватывающая более чем 100-летний период инструментальных наблюдений [13]. Для Азовского моря она насчитывает более 70 тыс. морских станций за 1891–2019 гг. Продолжая работы, начатые Азовским филиалом ММБИ, ЮНЦ РАН с 2003 г. осуществляет экспедиционные исследования на юге России в Азовском, Черном и Каспийском морях. Всего за это время выполнено более 300 морских рейсов [13].

Данные фактических STD-измерений термохалинной структуры вод и течений должны использоваться для проверки качества модельных расчетов и прогнозов. Здесь важно отметить, что этот процесс не должен полностью выполняться только компьютерной программой. Суть исследуемых процессов кроется в деталях, понять которые может только опытный океанолог. Например, на рисунке 1а приведен разовый гидрологический STD-разрез от г. Азова до Керченского пролива, построенный компьютерной программой, а на рисунках 1б–ж показана реальная типизация водных масс на основе анализа ежедневных многолетних наблюдений в Таганрогском заливе. Роль квалифицированного специалиста-океанолога является критической в процессе настройки модели и интерпретации результатов расчетов.

Можно выделить несколько моделей, используемых в настоящее время в задачах расчета гидродинамики Азовского моря:

- двумерная модель, разработанная в Государственном океанографическом институте им. Н.Н. Зубова [5];
- трехмерная модель, разработанная в Гидрометцентре России [14];
- трехмерная модель INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model), разработанная в Институте вычислительной математики РАН [15];
- трехмерная модель, разработанная в Южном федеральном университете [16];
- две модели, используемые в Морском гидрофизическом институте РАН: модифицированная версия модели POM и модель ADCIRC, работающая в связке с волновой моделью SWAN [17];
- две модели, используемые в ЮНЦ РАН: мультикомпарментальная балансовая модель [18] и двухслойная математическая модель гидродинамики водоемов [19].

Балансовая модель Азовского моря [18] предназначена для описания крупномасштабных изменений океанологических характеристик, проявляющихся в пространстве на акваториях с характерными размерами в десятки километров, а по временной шкале имеющих масштаб сезонной и межгодовой изменчивости. Эта модель имеет большие шаги по времени и пространству и поэтому не в состоянии давать оперативные прогнозы мелко-масштабных явлений: сгонно-нагонных явлений, полей течений.

Двухслойная математическая модель гидродинамики водоемов [19] является трехмерной. Данная модель легка в численной реализации и достаточно универсальна в том плане, что ее можно быстро адаптировать к мелкому водоему, для которого известна карта глубин. В основу модели гидродинамики Азовского моря заложены известные уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости [8]. Новизна подхода заключена в декомпозиции области расчета.

Суть предлагаемого метода в следующем. Рассмотрим водоем, содержащий как мелководные районы, так и районы с относительно большой глубиной. Исходная трехмерная область моделирования – водная толща водоема – ограничена сверху уровнем моря, а снизу донной поверхностью. Для декомпозиции пространственной области моделирования проведем горизонтальную секущую плоскость, отстоящую от невозмущенной поверхности

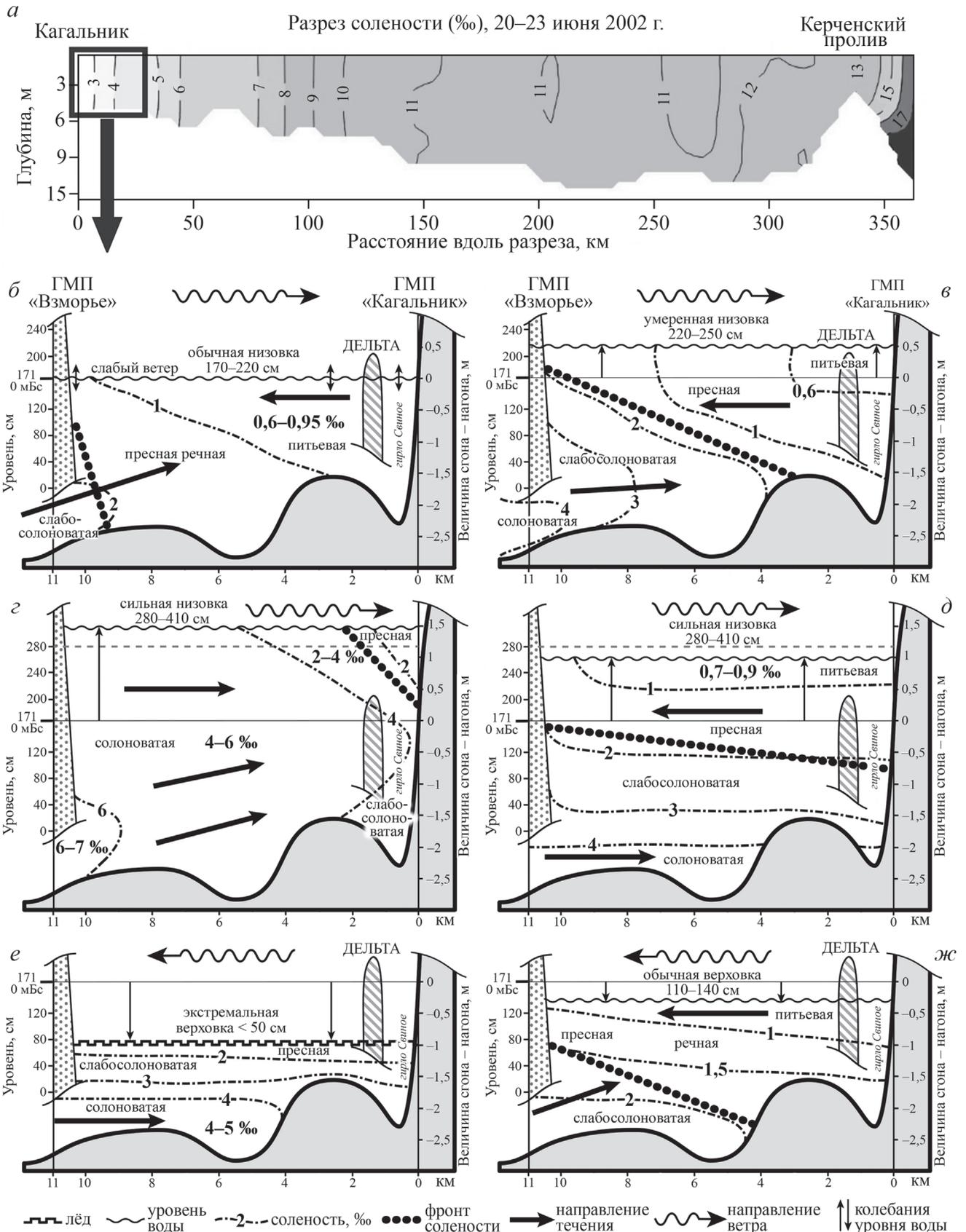


Рис. 1. Сравнение типизации водных масс Азовского моря, выполненной программой (а) и специалистом-океанологом (б–ж, схема из [3]).

Fig. 1. Comparison of the Sea of Azov water masses' classification, performed by the program (a) and oceanologist (б–ж, diagram from [3]).

водоема на некоторой глубине. Глубина верхнего слоя может быть выбрана исходя из разных соображений: это и максимальная глубина мелководья, и, возможно, предположение однородности по глубине протекающих здесь процессов, и предположение, что величины сгона и нагона не превосходят глубину верхнего слоя. Таким образом, секущая плоскость разделяет исходную область на две подобласти: верхний слой (слой I) – все мелководье и верхняя часть глубоководного слоя – и глубоководный слой (слой II). Считаем, что слой I достаточно мелкий (не более 5 м) – значения возможных возмущений уровня воды и глубины слоя близки. Предполагается, что эффект осушения из-за сгона воды может присутствовать только в мелководных районах.

Движение воды в верхнем слое I описывается уравнениями мелкой воды [8]. Движение воды в глубоководном слое II описывается трехмерной системой, состоящей из уравнений количества движения, уравнения неразрывности среды и уравнения

гидростатического давления. Задача замыкается соответствующими начальными и граничными условиями. На твердой границе ставится условие скольжения. В местах втекания или вытекания воды задаются соответствующие значения скоростей. На границе слоев ставится условие равенства скоростей. Задача решается конечно-разностными методами на равномерной прямоугольной сетке. Конвективные слагаемые в уравнениях движения и уравнении переноса аппроксимируются разностями против потока и вычисляются по неявным схемам.

Предполагая, что глубина верхнего слоя в нашей модели для Азовского моря равна 2 м, оценим количество ячеек, в которых проводится расчет гидродинамических параметров. Шаги по горизонтали составляли 660 м по долготе, 685 м по широте, 0,5 м по вертикали. Так, для трехмерной модели в σ -координатах число расчетных ячеек составляет 2,2 млн. Для двухслойной модели общее количество ячеек не превышает 1 млн, что уже дает экономию как времени счета, так и используемой машинной памяти. Наличие большого числа неизвестных предъявляет высокие требования и к вычислительной системе, и к пакетам используемых программ решения систем линейных алгебраических уравнений. Численная реализация поставленной задачи производится на многопроцессорных вычислительных системах.

Расчеты проводились на кластере в центре коллективного пользования «Высокопроизводительные вычисления» Южного федерального университета (г. Ростов-на-Дону, Россия). Кластер IBM Cluster 1350 состоит из 13 вычислительных узлов, соединенных служебной сетью Gigabit Ethernet и скоростной коммуникационной сетью DDR Infiniband (скорость передачи данных около 1400 Мб/с, латентность 3,1 мкс). Производительность каждого вычислительного узла на тесте Linpack составляет 21 гигафлопс, а всего кластера в целом 252 гигафлопс. Для решения систем линейных алгебраических уравнений, возникающих при дискретизации исходных дифференциальных уравнений, использована библиотека параллельных подпрограмм Aztec. Распараллеливание выполнено на основе коммуникационной библиотеки MPI.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Важность используемых морфометрических данных при моделировании гидродинамики водоемов не вызывает сомнения. Однако чаще всего

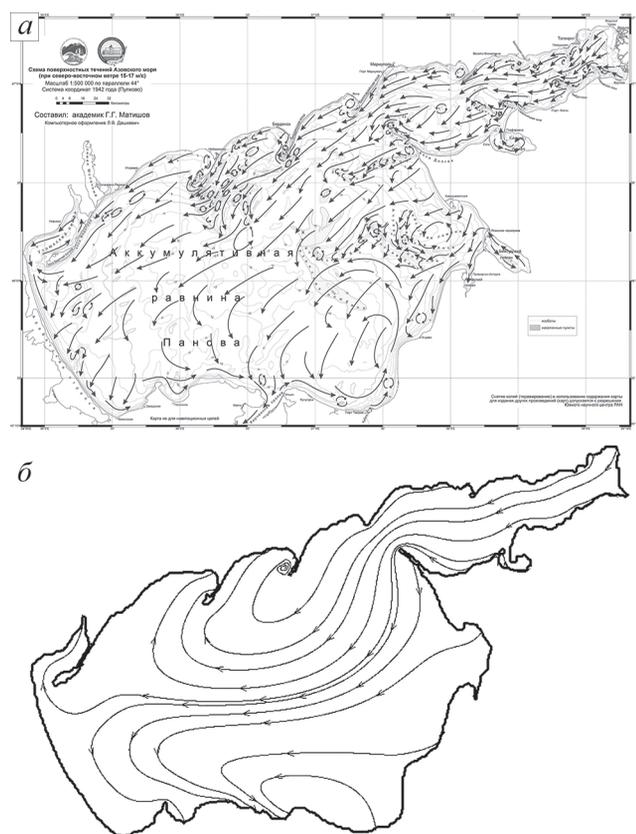


Рис. 2. Течения в поверхностном слое Азовского моря: *a* – схема из [20]; *б* – рассчитанные по двухслойной модели при северо-восточном ветре 7 м/с.

Fig. 2. Currents in the surface layer of the Sea of Azov: *a* – diagram from [20]; *b* – two-layer model simulation results for a north-east wind of 7 m/s.

информации, характеризующей качество используемых данных, уделяется мало внимания. От точности используемой батиметрии в первую очередь зависят количественные оценки гидрофизических параметров. Этот вопрос тесно связан с разрешением используемых сеточных областей.

На рисунке 2 представлены две картины поверхностных течений Азовского моря при северо-восточном ветре: одна – схема поверхностных течений, построенная экспертом-гидрологом с учетом рельефа дна (рис. 2а), а другая есть результат расчета с помощью двухслойной модели [19] (рис. 2б). Видно, что модель не отражает реальной картины. В расчете отсутствует учет всех особенностей рельефа дна. В связи с выбранным разрешением модель не в состоянии точно воспроизвести особенности батиметрии и топографии дна: линии тока воды следуют так, как будто нет протяженных (от 1–2 до 15 км) подводных частей кос, возвышенностей с превышением над дном 2–8 м, островных гряд на Азовском шельфе.

Эта же модель, но на более мелкой сетке (с разрешением 200 м по горизонтали) была применена к Таганрогскому заливу. Общее число ячеек по трем направлениям составило около 4,2 млн. На рисунке 3 представлена картина течений при действии юго-западного ветра. Сетка с таким разрешением лучше аппроксимирует береговую линию, но не позволяет отследить подводные продолжения, затопленные острова – следовательно, этот расчет тоже далек от реальной картины.

Разработанные модели оперативного прогноза гидрофизических полей [5–7] пока производят расчеты с разрешением не менее единиц – десятков километров. Вместе с тем в районах, где происходит трансформация крупномасштабных явлений с передачей энергии в малые масштабы, необходимо учитывать интенсивные короткопериодные процессы с размером ячейки расчетной сетки менее единиц километров [21].

Для получения более точной картины нужно, чтобы пространственное разрешение модели было порядка 50–100 м. А это предъявляет значительно более высокие требования к вычислительным мощностям. Сегодня только три суперкомпьютера в России входят в рейтинг 500 самых производительных общественно известных вычислительных систем мира по тесту Linpack [22]:

- суперкомпьютер «Кристофари» (Сбербанк) занимает 29 место, максимальная производительность при тесте 6669 терафлопс;

- суперкомпьютер «Ломоносов-2» (Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета) занимает 107 место, максимальная производительность при тесте 2478 терафлопс;

- суперкомпьютер «Cray» (Главный вычислительный центр Росгидромета) занимает 465 место, максимальная производительность при тесте 1200 терафлопс.

При таком состоянии с суперЭВМ даже использование этих суперкомпьютеров вряд ли решит вопрос адекватного прогнозирования состояния океанографической обстановки в тринадцати внутренних и окраинных морях, прилегающих к территории России.

Работа с моделями невозможна без первичных данных измерений состояния морской среды: температуры, солёности, скорости течений и т.д. Материалы наблюдений за морями и океанами поступают из различных источников, которые включают спутниковые измерения, платформы для наблюдений *in situ*, такие как поверхностные и подповерхностные буи, а также попутные суда. При этом, несмотря на заметное развитие систем мониторинга (особенно дистанционного), этих данных все равно недостаточно. Сегодня

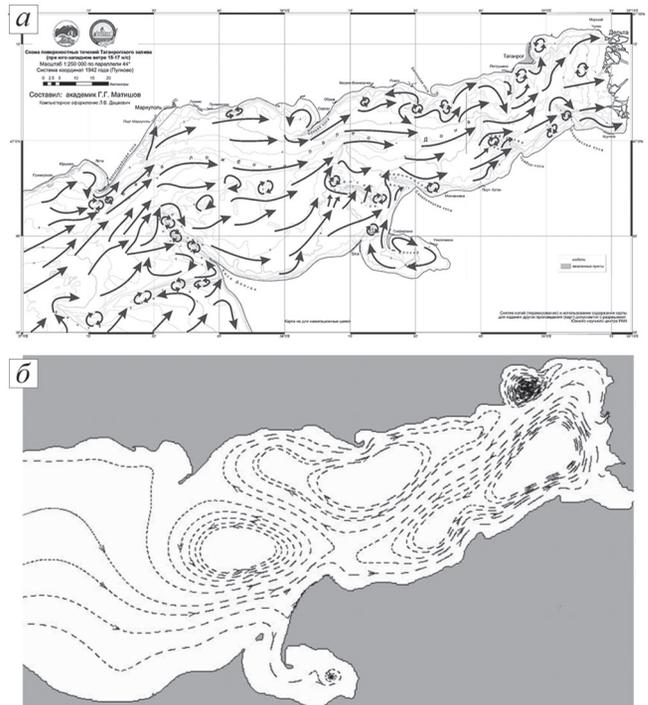


Рис. 3. Течения в поверхностном слое Таганрогского залива: а – схема из [20]; б – расчет по двухслойной модели при юго-западном ветре 7 м/с.

Fig. 3. Currents in the surface layer of the Taganrog Bay: а – diagram from [20]; б – two-layer model simulation results for a south-west wind of 7 m/s.

предсказать изменчивость окружающей среды с высоким качеством и по сезонам не представляется возможным. Особенно это актуально для Арктики и морей, покрывающихся льдом.

К сожалению, основное внимание в работе с данными наблюдений уделяется процессу ассимиляции этих данных, и значительно реже представляется анализ оправдываемости гидрометеорологических и климатических прогнозов. Тем не менее это является самым важным критерием качества работы используемых моделей. Отсутствие систематических сравнений со всеми существующими данными измерений (а не только с присутствующими у конкретных авторов) приводит к неверным цепочкам рассуждений. Следует отметить, что анализ адекватности модели необходимо выполнять заново при внесении любых изменений, например при повышении детализации расчетной сетки.

Использование нерепрезентативных данных наблюдений (например, очень редких по времени и/или пространству) создает неоправданно завышенные ожидания от качества моделей. Поэтому реальные ошибки прогнозов могут оказаться больше, чем ошибки, рассчитанные при сравнении с редкими данными наблюдений. Любой проект в рамках оперативной океанографии должен завершаться оценкой точности и оправдываемости ранее сделанных прогнозов. Это оградит от безответственных выводов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существующие технологии наблюдений и современные вычислительные возможности позволяют непрерывно контролировать состояние Мирового океана, однако с не всегда достаточно высокой точностью. Представленная двухслойная модель также не лишена недостатков. В частности, используемые в модели величины шагов по про-

странству не позволяют в полной мере учитывать влияние геоморфологических черт на течение воды. Это происходит из-за того, что, например, поперечные размеры затопленных частей азовских кос в удалении от берега становятся значительно меньше шагов по пространству. Для решения этой проблемы необходимо уменьшить шаги по пространству до размеров, соизмеримых с шириной кос (1–5 м). Однако в этом случае возникает другая проблема – высокие требования к вычислительным системам, с помощью которых решается подобная задача.

Сегодня нужны высокоточные расчеты с использованием самой высокопроизводительной техники. Однако даже они пока не позволят восстановить реальную картину. Прогнозные расчеты должны сопровождаться сравнением со всеми доступными данными наблюдений. Обеспечить их способны автономные гидрометеорологические комплексы, регистрирующие значения параметров с большой частотой. Необходимо совершенствовать все компоненты системы наблюдений, увеличивая долю автономных комплексов в сети наземных и морских станций.

Задачи оперативной океанографии имеют первостепенную важность, поскольку их решение направлено на удовлетворение практических потребностей морского рыболовства, надводного и подводного плавания. Разрабатываемые методы прогнозирования должны проходить экспертную оценку в Российской академии наук, например в рамках Секции океанологии, физики атмосферы и географии Отделения наук о Земле РАН.

Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН №№ гр. проектов АААА-А18-118122790121-5 (академик Г.Г. Матишов, А.Л. Чикин) и 01201363188 (В.В. Кулыгин) и проекта РФФИ № 19-05-50099 Микромир (академик Г.Г. Матишов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коротаев Г.К. 2019. Оценка эффективности применения прогнозов поля скорости звука в российских морях. В кн.: *Оперативная океанология и технические средства в интересах Военно-Морского Флота: материалы совместного заседания Командования Главного штаба Военно-Морского Флота и Секции океанологии, физики атмосферы и географии ОНЗ РАН (г. Санкт-Петербург, 5–6 октября 2018 г.)*. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 113–122.
2. Матишов Г.Г. 2019. Опыт и проблемы оперативной океанологии и их значение в развитии флота. В кн.: *Оперативная*

океанология и технические средства в интересах Военно-Морского Флота: материалы совместного заседания Командования Главного штаба Военно-Морского Флота и Секции океанологии, физики атмосферы и географии ОНЗ РАН (г. Санкт-Петербург, 5–6 октября 2018 г.). Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 15–41.

3. Матишов Г.Г., Григоренко К.С., Московец А.Ю. 2017. Механизмы осолонения Таганрогского залива в условиях экстремально низкого стока Дона. *Наука Юга России*. 13(1): 35–43. doi: 10.23885/2500-0640-2017-13-1-35-43
4. Матишов Г.Г., Матишов К.Д., Кириллова Е.Э. 2019. Российская океанология и перспективы освоения биоре-

- сурсов Мирового океана. *Вестник РАН*. 89(5): 509–512. doi: 10.31857/S0869-5873895509-512
5. Филиппов Ю.Г., Фомин В.В. 2018. Краткосрочный прогноз колебаний Азовского моря. *Метеорология и гидрология*. 4: 62–67.
 6. Попов С.К. 2014. Численное моделирование скоростей течений и уровня морей России. *Труды ГОИИ*. 215: 40–52.
 7. Ибраев Р.А. 2019. Суперкомпьютерные технологии для оперативного прогнозирования морской среды (разрешение ~1 км, ~10 км). В кн.: *Оперативная океанология и технические средства в интересах Военно-Морского Флота: материалы совместного заседания командования Главного штаба Военно-Морского Флота и Секции океанологии, физики атмосферы и географии ОНЗ РАН (г. Санкт-Петербург, 5–6 октября 2018 г.)*. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 42–82.
 8. Вольцингер Н.Е., Пясковский Р.В. 1977. *Теория мелкой воды. Океанологические задачи и численные методы*. Л., Гидрометеиздат: 206 с.
 9. Blumberg A.F., Mellor G.L. 1987. A Description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*. N.S. Heaps (Ed.). Washington, DC, American Geophysical Union: 1–16.
 10. Добролюбов С.А., Архипкин В.С., Мысленков С.А., Иванова А.А. 2019. Новые подходы к моделированию волн и нагонов в российских морях. В кн.: *Оперативная океанология и технические средства в интересах Военно-Морского Флота: материалы совместного заседания командования Главного штаба Военно-Морского Флота и Секции океанологии, физики атмосферы и географии ОНЗ РАН (г. Санкт-Петербург, 5–6 октября 2018 г.)*. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 185–211.
 11. Марчук Г.И., Дымников В.П., Залесский В.Б. 1987. *Математические модели в геофизической гидродинамике и численные методы их реализации*. Л., Гидрометеиздат: 296 с.
 12. WORLD OCEAN ATLAS. 2018. URL: <https://www.nodc.noaa.gov/OC5/woa18/> (дата обращения: 04.02.2020).
 13. Matishov G.G., Berdnikov S.V., Zhichkin A.P., Dzhenyuk S.L., Smolyar I.V., Kulygin V.V., Yaitskaya N.A., Povazhniy V.V., Sheverdyayev I.V., Kumpan S.V., Tretyakova I.A., Tsygankova A.E., D'yakov N.N., Fomin V.V., Klochkov D.N., Shatohin B.M., Plotnikov V.V., Vakul'skaya N.M., Luchin V.A., Kruts A.A. 2014. *Atlas of Climatic Changes in Nine Large Marine Ecosystems of the Northern Hemisphere (1827-2013)*. NOAA Atlas NESDIS 78: 131 p. doi: 10.7289/V5Q52MK5
 14. Попов С.К., Лобов А.Л. 2017. Моделирование изменений уровня Азовского моря в 2015–2016 годах. *Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации*. 364: 131–143.
 15. Дианский Н.А., Фомин В.В. 2017. Моделирование циркуляции Азовского моря и особенности воспроизведения экстремальных нагонов в Таганрогском заливе. *Труды ГОИИ*. 218: 74–104.
 16. Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Алексеенко Е.В. 2011. Численная реализация трехмерной модели гидродинамики для мелководных водоемов на супервычислительной системе. *Математическое моделирование*. 23(3): 3–21. doi: 10.1134/S2070048211050115
 17. Фомин В.В., Алексеев Д.В., Лемешко Е.М., Лазоренко Д.И. 2018. Расчет и анализ морских наводнений в дельте реки Дон. *Метеорология и гидрология*. 2: 45–54.
 18. Сорокина В.В., Бердников С.В. 2008. Математическое моделирование терригенного осадконакопления в Азовском море. *Океанология*. 48(3): 456–466.
 19. Чикин А.Л. 2005. Об одном из методов расчета параметров течений в водоемах с большой неоднородностью глубин. *Водные ресурсы*. 32(1): 55–60.
 20. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г. 2009. Новые принципы представления циркуляции вод Азовского моря. В кн.: *Труды Южного научного центра РАН. Т. IV. Моделирование и анализ гидрологических процессов в Азовском море*. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 196–202.
 21. Родионов А.А., Семенов Е.В., Зимин А.В. 2012. Развитие системы мониторинга и прогноза гидрофизических полей морской среды в интересах обеспечения скрытности и защиты кораблей ВМФ. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 5(2): 89–108.
 22. TOP500. URL: <https://www.top500.org/statistics/sublist/> (дата обращения: 04.02.2020).

REFERENCES

1. Korotaev G.K. 2019. [Evaluation the effectiveness of the sound velocity fields' forecasts in the Russian seas]. In: *Operativnaya okeanologiya i tekhnicheskie sredstva v interesakh Voennno-Morskogo Flota: materialy sovmestnogo zasedaniya komandovaniya Glavnogo shtaba Voennno-Morskogo Flota i Sektisii okeanologii, fiziki atmosfery i geografii ONZ RAN (g. Sankt-Peterburg, 5–6 oktyabrya 2018 g.)*. [Operational Oceanology and Technical Facilities in the Interests of the Navy: Materials of a Joint Meeting of the Command of the General Staff of the Navy and the Section of Oceanology, Atmospheric Physics and Geography of the Department of Earth Sciences Russian Academy of Sciences (St. Petersburg, October 5–6, 2018)]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 113–122. (In Russian).
2. Matishov G.G. 2019. [Experience and problems of operational oceanology and their importance in the development of the fleet]. In: *Operativnaya okeanologiya i tekhnicheskie sredstva v interesakh Voennno-Morskogo Flota: materialy sovmestnogo zasedaniya komandovaniya Glavnogo shtaba Voennno-Morskogo Flota i Sektisii okeanologii, fiziki atmosfery i geografii ONZ RAN (g. Sankt-Peterburg, 5–6 oktyabrya 2018 g.)*. [Operational Oceanology and Technical Facilities in the Interests of the Navy: Materials of a Joint Meeting of the Command of the General Staff of the Navy and the Section of Oceanology, Atmospheric Physics and Geography of the Department of Earth Sciences Russian Academy of Sciences (St. Petersburg, October 5–6, 2018)]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 15–41. (In Russian).
3. Matishov G.G., Grigorenko K.S., Moskovets A.Yu. 2017. [The salinization mechanisms in the Taganrog Bay under the conditions of the Don River extremely low runoff]. *Nauka Yuga Rossii*. 13(1): 35–43. (In Russian). doi: 10.23885/2500-0640-2017-13-1-35-43
4. Matishov G.G., Matishov K.D., Kirillova E.A. 2019. Russian oceanology and prospects of development of bioresources of

- the World Ocean. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 89(2): 196–198. doi: 10.1134/S1019331619020126
5. Filippov Yu.G., Fomin V.V. 2018. [Short-term forecast of fluctuations in the Sea of Azov level]. *Meteorologiya i gidrologiya*. 4: 62–67. (In Russian).
 6. Popov S.K. 2014. [Numerical modeling of currents velocities and sea level in Russian seas]. *Trudy GOIN*. 215: 40–52. (In Russian).
 7. Ibraev R.A. 2019. [Supercomputer technologies for operational forecasting of the marine environment (resolution ~1 km, ~10 km)]. In: *Operativnaya okeanologiya i tekhnicheskie sredstva v interesakh Voenno-Morskogo Flota: materialy sovmestnogo zasedaniya komandovaniya Glavnogo shtaba Voenno-Morskogo Flota i Sektsii okeanologii, fiziki atmosfery i geografii ONZ RAN (g. Sankt-Peterburg, 5–6 oktyabrya 2018 g.)*. [Operational Oceanology and Technical Facilities in the Interests of the Navy: Materials of a Joint Meeting of the Command of the General Staff of the Navy and the Section of Oceanology, Atmospheric Physics and Geography of the Department of Earth Sciences Russian Academy of Sciences (St. Petersburg, October 5–6, 2018)]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 42–82. (In Russian).
 8. Vol'tsinger N.E., Pyaskovskiy R.V. 1977. *Teoriya melkoy vody. Okeanologicheskie zadachi i chislennyye metody*. [Theory of shallow water. Oceanological problems and numerical methods]. Leningrad, Gidrometeoizdat: 206 p. (In Russian).
 9. Blumberg A.F., Mellor G.L. 1987. A Description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*. N.S. Heaps (Ed.). Washington, DC, American Geophysical Union: 1–16.
 10. Dobrolyubov S.A., Arkhipkin V.S., Myslenkov S.A., Ivanova A.A. 2019. [New approaches to modeling waves and surges in the Russian seas]. In: *Operativnaya okeanologiya i tekhnicheskie sredstva v interesakh Voenno-Morskogo Flota: materialy sovmestnogo zasedaniya komandovaniya Glavnogo shtaba Voenno-Morskogo Flota i Sektsii okeanologii, fiziki atmosfery i geografii ONZ RAN (g. Sankt-Peterburg, 5–6 oktyabrya 2018 g.)*. [Operational Oceanology and Technical Facilities in the Interests of the Navy: Materials of a Joint Meeting of the Command of the General Staff of the Navy and the Section of Oceanology, Atmospheric Physics and Geography of the Department of Earth Sciences Russian Academy of Sciences (St. Petersburg, October 5–6, 2018)]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 185–211. (In Russian).
 11. Marchuk G.I., Dymnikov V.P., Zalesnyy V.B. 1987. *Matematicheskie modeli v geofizicheskoy gidrodinamike i chislennyye metody ikh realizatsii*. [Mathematical models in geophysical hydrodynamics and numerical methods of their implementation]. Leningrad, Gidrometeoizdat: 296 p. (In Russian).
 12. WORLD OCEAN ATLAS. 2018. Available at: <https://www.nodc.noaa.gov/OC5/woa18/> (accessed 4 February 2020).
 13. Matishov G.G., Berdnikov S.V., Zhichkin A.P., Dzhenyuk S.L., Smolyar I.V., Kulygin V.V., Yaitskaya N.A., Povazhniy V.V., Sheverdyayev I.V., Kumpan S.V., Tretyakova I.A., Tsygankova A.E., D'yakov N.N., Fomin V.V., Klochkov D.N., Shatohin B.M., Plotnikov V.V., Vakulskaya N.M., Luchin V.A., Kruts A.A. 2014. *Atlas of Climatic Changes in Nine Large Marine Ecosystems of the Northern Hemisphere (1827-2013)*. NOAA Atlas NESDIS 78: 131 p. doi: 10.7289/V5Q52MK5
 14. Popov S.K., Lobov A.L. 2017. [Modeling of water level changes in the Sea of Azov in 2015–2016]. *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiyskoy Federatsii*. 364: 131–143. (In Russian).
 15. Diansky N.A., Fomin V.V. 2017. [Modeling of the Sea of Azov circulation and features of the reproduction of extreme surges in the Taganrog Bay]. *Trudy GOIN*. 218: 74–104. (In Russian).
 16. Sukhinov A.I., Chistyakov A.E., Alekseenko E.V. 2011. Numerical realization of the three-dimensional model of hydrodynamics for shallow water basins on a high-performance system. *Math Models Comput Simul*. 3(5): 562–574. doi: 10.1134/S2070048211050115
 17. Fomin V.V., Alekseev D.V., Lemeshko E.M., Lazorenko D.I. 2018. Simulation and Analysis of Sea Floods in the Don River Delta. *Russian Meteorology and Hydrology*. 43(2): 95–102. doi: 10.3103/S106837391802005X
 18. Sorokina V.V., Berdnikov S.V. 2008. Mathematical modeling of the terrigenous sedimentation in the Sea of Azov. *Oceanology*. 48(3): 418–427. doi: 10.1134/S0001437008030144
 19. Chikin A.L. 2005. A technique for evaluating flow parameters in water bodies with a highly heterogeneous depth. *Water Resour*. 32(1): 50–55. doi: 10.1007/s11268-005-0007-2
 20. Matishov G.G., Matishov D.G. 2009. [New principles for representing the circulation of the Sea of Azov]. In: *Trudy Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN. T. IV. Modelirovanie i analiz gidrologicheskikh protsessov v Azovskom more*. [Proceedings of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Vol. IV. Modeling and analysis of hydrological processes in the Sea of Azov]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 196–202. (In Russian).
 21. Rodionov A.A., Semenov E.V., Zimin A.V. 2012. [Advancement of the Real-Time Analysis and Forecast Hydrological Sea Fields in Behalf of the Defense and the Conceal of Naval Ships]. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 5(2): 89–108. (In Russian).
 22. TOP500. Available at: <https://www.top500.org/statistics/sublist/> (accessed 4 February 2020).

Поступила 10.02.2020