

УДК 556, 519.688, 551.465
DOI: 10.23885/2500-0640-2018-14-1-59-70

ВЕРИФИКАЦИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ГЛОБАЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ АЗОВСКОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ *IN SITU*

© 2018 г. И.Ф. Запорожцев^{1, 2}, Д.В. Моисеев¹

Аннотация. Целью работы является проверка эффективности использования конфигурации гидродинамической модели MITgcm для исследования изменчивости температурных полей в северо-восточной части Азовского моря (Таганрогский залив и прилегающая область). Данные о температуре воды *in situ*, использованные для верификации модельных данных, получены в ходе трех совместных экспедиций Мурманского морского биологического института Кольского научного центра РАН и Южного научного центра РАН в июне – июле и сентябре 2005 г. и в июне 2006 г. С целью уменьшения модельных ошибок расчеты проведены для всей акватории Азовского моря. Данные реанализа JRA25 использованы в качестве атмосферного форсинга модели. Модельная сетка имеет размеры 101 × 64 узла с пространственным шагом 3' по долготе и 2' по широте. Конфигурация содержит 17 вертикальных слоев толщиной 0,5 м, кроме последнего. Наиболее длительный период имитации составил 56 дней с шагом по времени 100 с. Доступные входные гридированные данные имеют слишком большой шаг по пространству, несмотря на это, свойства модельных данных позволяют утверждать, что MITgcm пригодна для решения практических задач моделирования и прогнозирования мезомасштабной структуры термических полей в рассмотренных акваториях. Анализ полей направлений горизонтальных градиентов на различных глубинах показал, что модельные и полученные в экспедициях данные хорошо согласованы в смысле локализации фронтальных зон, хотя в модельных данных имеет место чрезмерное преобладание восточных градиентов. В наибольшей степени оказались близки модельные и реальные поля поверхностного слоя за период осенней экспедиции 2005 г.

Ключевые слова: MITgcm, Азовское море, температурные поля, верификация моделей по наблюдениям.

VERIFICATION OF GLOBAL HYDRODYNAMIC MODEL REGIONAL CONFIGURATION FOR THE SEA OF AZOV WITH *IN SITU* DATA

I.F. Zaporozhtsev^{1, 2}, D.V. Moiseev¹

Abstract. The aim of paper is to assess efficiency of hydrodynamic model MITgcm setup application in study of temperature fields variability in northern-eastern part of the Sea of Azov (Taganrog Bay and adjoining sea area). In situ temperature values used for model data verification were obtained during Murmansk Marine Biological Institute Kola Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences and Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences coupled expeditions in the Sea of Azov in June-July and September 2005, and June 2006. To reduce model errors, simulation is conducted for the whole Sea of Azov area. JRA25 reanalysis data is used as model forcing fields. Model grid is 101 by 64 nodes with 3' and 2' spatial steps in zonal and meridian directions correspondingly. Setup contains 17 vertical layers, each 0.5 m wide except the last one. The most longstanding model integration period is nearly two months (56 days) with 100 s timestep. Available input gridded data has too large spatial step. In spite of this fact, model data features allow us

¹ 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, e-mail: zaporozhtsev.if@gmail.com

² Мурманский арктический государственный университет (Murmansk Arctic State University, Murmansk, Russian Federation), Российская Федерация, 183038, г. Мурманск, ул. Капитана Егорова, д. 15

to state practical applicability of MITgcm to simulate and predict temperature field mesoscale structure in considered areas. Comparison of horizontal gradient fields computed for different depth levels shows that model and observed data coincides in terms of transition zones locations. However excessive eastern gradients predominance is observed in model generated data. The most consistent values are obtained for subsurface field of autumn expedition in 2005.

Keywords: MITgcm, Sea of Azov, temperature fields, model verification with observations.

ВВЕДЕНИЕ

Однотипные океанографические данные, полученные в результате мониторинга, осуществляемого различными способами (контактными и дистанционными), зачастую трудно использовать совместно для решения практических задач из-за различий в значениях погрешности и характера ее изменчивости.

В случае термохалинных полей очевидным ограничением первичных спутниковых данных и данных многолетнего реанализа является отсутствие данных для слоев, не граничащих с атмосферой. В то же время исследование плотностной стратификации всего объема водных масс, проводимое по термохалинным полям, является важной самостоятельной научной и практической задачей. Подобное исследование можно проводить либо по данным экспедиций, которых явно недостаточно по объему, либо по данным гидродинамических моделей, погрешность которых может быть мало изучена для конкретной акватории. Наиболее благоприятной является ситуация, когда в заданной акватории выбранная модель может быть корректно применена, а также верифицирована по некоторому набору данных *in situ*.

Рассматривая Азовское море, важно отметить, что сотрудники Южного федерального университета (ЮФУ) предприняли ряд успешных попыток в решении задачи моделирования гидродинамики этого мелководного бассейна. Результаты были обобщены в виде собственных численных методов и современной программно-аппаратной конфигурации многопроцессорной вычислительной системы [1; 2]. Однако в указанных публикациях авторы не приводят сведений о результатах верификации и калибровки предложенной ими модели и компьютерной технологии по результатам конкретных экспедиций.

В этом контексте большой интерес представляет верификация модели гидрологических данными *in situ*, полученными в 2005–2006 гг. в северо-вос-

точной части Азовского моря в ходе трех совместных экспедиций Мурманского морского биологического института Кольского научного центра РАН (ММБИ) и Южного научного центра РАН (ЮНЦ) с участием студентов кафедры океанологии ЮФУ.

Одним из основных научных направлений ММБИ является исследование термохалинных характеристик морских экосистем. Океанографические данные, полученные в морских экспедициях, проводимых институтом, можно использовать для верификации результатов и спутникового зондирования [3], и моделирования. Идея проведения мезомасштабных съемок с регулярной сеткой станций в Азовском море принадлежала директору Азовского филиала ММБИ, заместителю председателя ЮНЦ РАН, заведующему кафедрой океанологии ЮФУ члену-корреспонденту РАН Д.Г. Матишову. В качестве одной из задач, для решения которых им были задуманы эти детальные съемки [4], стояла верификация моделей по данным *in situ*. В настоящей работе описана попытка такого исследования для одной из возможных гидродинамических моделей.

С начала 2000-х гг. (в России – в 2010-х гг.) стала набирать популярность гидродинамическая модель MITgcm [5], разрабатываемая Массачусетским технологическим университетом с середины 1990-х гг. На данный момент представлено относительно немного материалов отечественных авторов, в которых освещена работа с этой моделью и сравнение с аналогами. Тем не менее имеются как научно-популярные публикации [6], являющиеся элементарным введением к началу использованию модели, так и научные статьи [7–10], отражающие опыт получения с помощью этой модели значимых результатов для различных водоемов – от небольших по площади и неглубоких до крупных морских акваторий.

В статье изложены сведения о верификации модели MITgcm по температурным полям Азовского моря, данные по которым получены во время экспедиций 2005–2006 гг. Исследование является продолжением анализа данных экспедиций 2005 г. [11].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для верификации полей температуры, рассчитанных с помощью модели MITgcm, использованы данные трех совместных экспедиций ММБИ и ЮНЦ за периоды 23 июня – 2 июля и 15–24 сентября 2005 г., 16–25 июня 2006 г., проведенных в Таганрогском заливе Азовского моря (все три экспедиции) и в собственно морской акватории на границе с заливом (третья экспедиция). Большая часть работ в первой и второй экспедициях произведена с борта научно-исследовательского судна «Профессор Панов», в третьей – с судна ПТС-231; на малых глубинах, недоступных для судна, работы вели с надувной лодки «Зодиак», оснащенной подвесным мотором. В районах ожидаемого наличия фронтов измерения выполнялись с дискретностью 2' по широте и 3' по долготе, на промежуточных акваториях дискретность станций составляла 4' по широте и 6' по долготе. Наблюдаемые гидрологические характеристики (для вертикальных горизонтов с шагом 0,5 м) – температура и соленость. Измерения выполнены STD-зондами STD60M, STD90M и SEACAT SBE 19. Координаты станций контролировали с помощью GPS-приемника. Работы на всех станциях сопровождалась метеонаблюдениями, каждая съемка выполнена в короткий временной промежуток в условиях стабильной метеорологической обстановки. Анализ экспедиционных данных отражен во внутренних рейсовых отчетах и в статье [4].

Равномерная расчетная сетка модели MITgcm (2' по широте и 3' по долготе) согласована со станциями и содержит их как подмножество.

Временной промежуток, для которого выполнено имитационное моделирование с помощью MITgcm, можно разделить на две части: отрезок адаптации (разгона) и отрезок верификации. В течение первого происходит адаптация модели к входным данным (батиметрии, полям начальной температуры и солености, периодическим воздействиям со стороны атмосферы). Второй временной отрезок моделирования в каждом случае обусловлен временем сбора данных из соответствующего рейсового отчета. Таким образом, второй отрезок имеет фиксированную длину, а первый может изменяться путем выбора различных моментов начала моделирования.

Файл батиметрии сформирован на основе продукта «GEBCO-2014 30 Arc-Second Grid» [12] с

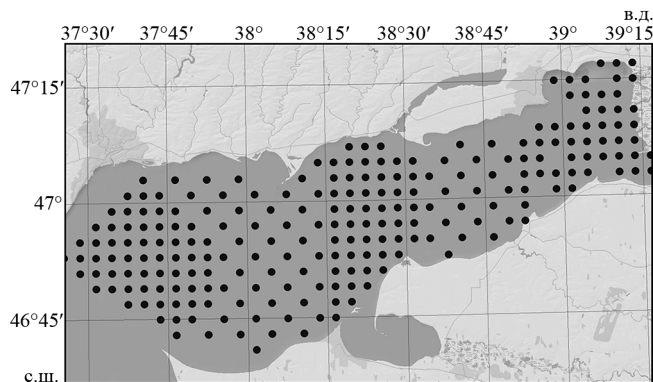


Рис. 1. Станции экспедиций 1 и 2.
Fig. 1. Expeditions 1 and 2 stations.

коррекцией максимальных глубин *in situ* по станциям экспедиций. Параметры атмосферного воздействия получены из массивов JRA-25 (Japanese 25-year Reanalysis Project) [13], шаг сетки 1,1°: каждые 6 часов пробега модели значения приповерхностного ветра, температуры, влажности нисходящей коротко- и длинноволновой радиации, а также осадки переводятся в потоки тепла, пресной воды и ветрового напряжения [6]. Ежемесячные климатологические значения речного стока взяты из Global Runoff Database [14]. Упомянутые поля имеют недостаточное для сформулированной задачи пространственное разрешение, вследствие чего погрешность модельных данных ожидалась существенная. Для ее уменьшения было принято решение выполнить моделирование для всей акватории Азовского моря (сетка 101 × 64 узла: 101 узел вдоль параллели и 64 узла вдоль меридиана): в противном случае встала бы проблема задания заведомо недостоверных граничных условий по температуре, солености и т.д. на входе в залив с запада. Значения других физических и управляющих параметров модели MITgcm были выбраны в соответствии с рекомендациями из работ [5; 6; 8]. Поле начальной солености было построено в результате интерполяции данных, представленных в работе [15]: помимо данных экспедиций требуются дополнительные данные ввиду моделирования для всей акватории моря.

Модельные данные и данные *in situ* известны в узлах равномерной сетки, поэтому для температурного поля могут быть корректно вычислены зональная и меридиональная составляющие горизонтального градиента температуры. Расчет проведен для каждого узла, имеющего ближайшие соседние узлы в сетке по четырем горизонтальным направле-

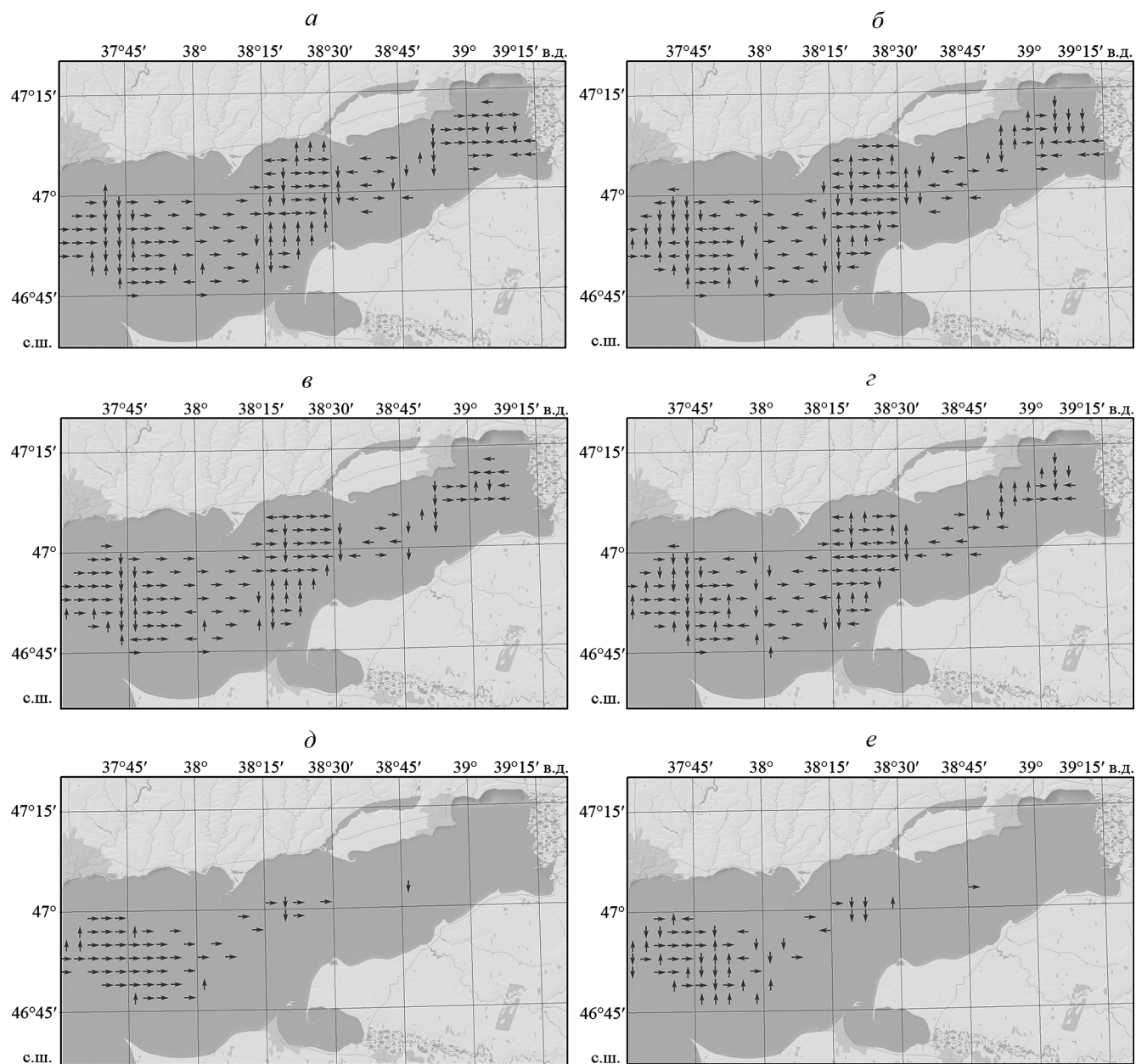


Рис. 2. Поля направлений градиентов в зависимости от глубины, экспедиция 1: *a, в, д* – модельные данные для глубин 0,5, 2,5, 5 м соответственно; *б, г, е* – данные, полученные в экспедиции на аналогичных глубинах.

Fig. 2. Gradient direction fields depending on depth, expedition 1: *a, в, д* – model data 0.5, 2.5, 5 m deep; *б, г, е* – observed data for the same depth levels.

ниям, то есть узла, окрестность которого обеспечена данными. Одновременно построены поля градиентов для каждого вертикального уровня. Отметим, что данные измерений соответствуют различным моментам времени, исходя из графика выполнения станций по маршруту экспедиции. Ввиду этого факта для верификации и визуализации удобнее использовать агрегированное поле значений измеренной температуры на акватории, которое было сформировано за время всей экспедиции. Это скалярное

поле есть значения температуры, приписанные каждой пространственной точке ровно один раз в момент времени, когда было сделано наблюдение. Аналогично построено агрегированное поле модельных данных: значения в узлах получены примерно в те промежутки времени, в которые были сделаны измерения (погрешность сопоставления не превосходит 1,5 часов).

Подход, основанный на анализе поля градиентов, широко используется, так как позволяет

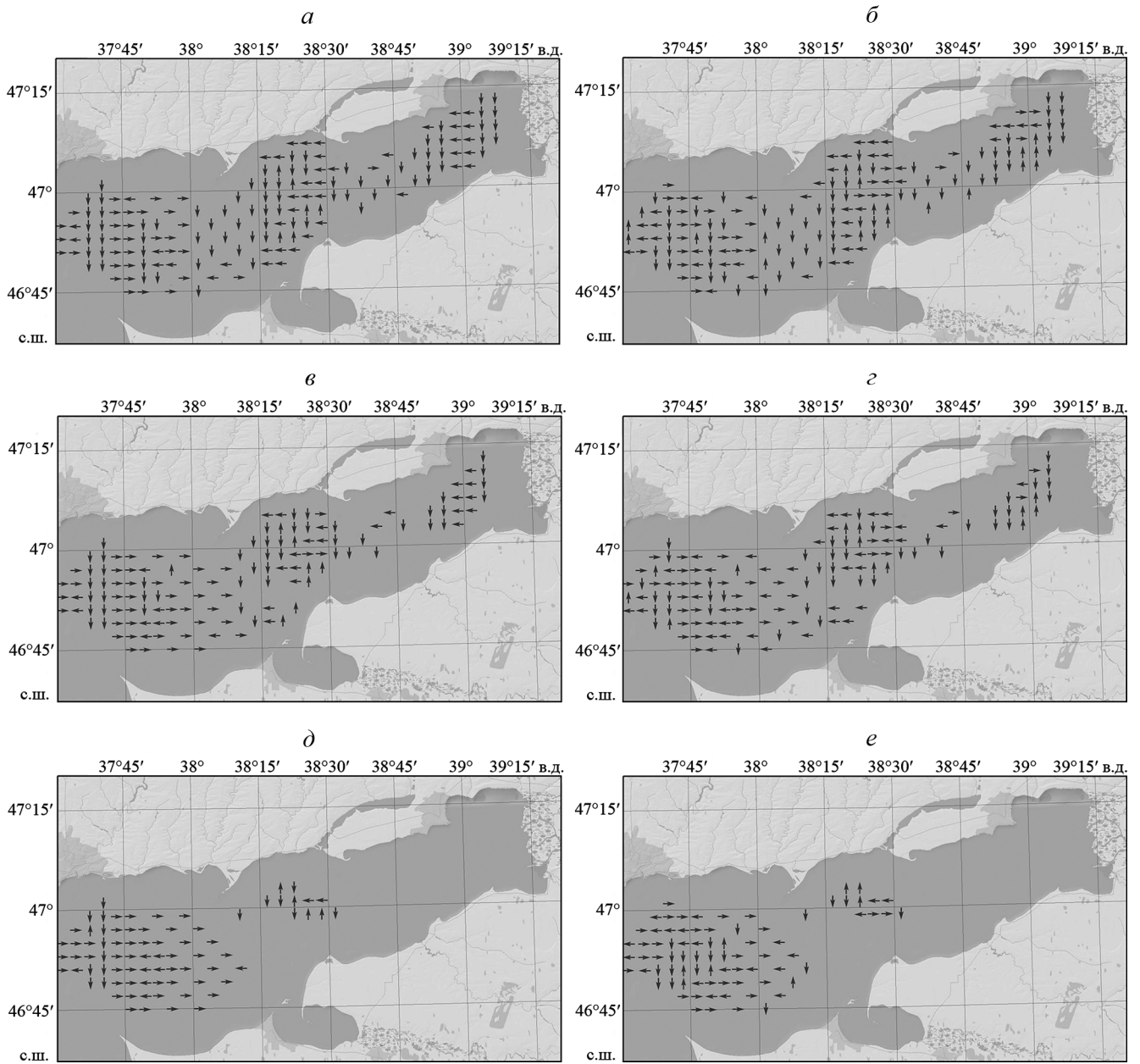


Рис. 3. Поля направлений градиентов в зависимости от глубины, экспедиция 2: *a, в, д* – модельные данные для глубин 0,5, 2,5, 5 м соответственно; *б, г, е* – данные, полученные в экспедиции на аналогичных глубинах.
Fig. 3. Gradient direction fields depending on depth, expedition 2: *a, в, д* – model data 0.5, 2.5, 5 m deep; *б, г, е* – observed data for the same depth levels.

оценить параметры фронтальных зон посредством определения преобладающих направлений наибольшего локального роста температуры. В ряде исследований [7; 10] отмечен тот факт, что MITgcm завышает значения температуры. Аналогичный вывод получен и авторами данной статьи, однако отследить закономерность в абсолютном значении пока не удалось [11]. Переход к градиентам позволяет обойти в анализе постоянную составляющую невязки реальных и модельных

данных. Сравнение результатов моделирования и наблюдений в абсолютных значениях для Таганрогского залива проведено в предыдущей статье авторов [11]. Сведения об особенностях полей градиентов для исследуемых данных являются новыми по сравнению с информацией, изложенной в статье [11].

Принимая, что $F_{i,j}$ – значение температуры в узле с координатами i, j в расчетной сетке (координаты i и j – это номера узлов в сетке в меридиональном и

зональном направлениях соответственно), находим составляющие горизонтального градиента [16]:

1) зональную:

$$g_z = \frac{F_{i,j+1} - F_{i,j-1}}{2\Delta h_z},$$

где Δh_z – шаг расчетной сетки по параллели (км);

2) меридиональную:

$$g_m = \frac{F_{i+1,j} - F_{i-1,j}}{2\Delta h_m},$$

где Δh_m – шаг расчетной сетки по меридиану (км).

Величина шагов:

$$\Delta h_z = 1,852 \left| \alpha_{j+1} - \alpha_j \right| \cos \frac{\beta_{i+1} + \beta_{i-1}}{2},$$

$$\Delta h_m = 1,852 \left| \beta_{j+1} - \beta_j \right|,$$

где α , β – долгота и широта соответственно.

Ввиду существенной близости узлов, которые участвуют в вычислении каждого горизонтального градиента, а также равномерности сетки зональную и меридиональную составляющие можно оценивать только по числителям дробей в указанных формулах.

Для простоты направление горизонтального градиента можно считать совпадающим с одним из направлений основных четырех румбов (С – Ю – З – В), на которое он имеет наибольшую проекцию. Таким образом, долю одинаковых направлений градиентов и их локализацию для модельных и наблюдаемых полей температуры на выбранных горизонтах можно считать критерием успешности моделирования. Изображения для визуализации узлов, обеспеченных экспедиционными данными, и распределения направлений градиентов на различных глубинах построены в ГИС-программе ArcMap.

В результате серии экспериментов с различными вариантами константной начальной температуры и момента старта имитационного моделирования для сетки с увеличенным в 2 раза шагом по широте и долготе было принято решение назначить длину отрезка разгона модели равным 1,5 месяцам. Меньшие значения не давали для каждой экспедиции приемлемых результатов: смоделированное температурное поле к концу отрезка разгона не стабилизировалось по реакции на воздействия атмосферы, то есть существенно отличалось при различных значениях начальной температуры хотя бы для одной экспедиции (а именно для третьей).

Здесь и далее экспедиции нумеруются по хронологии их осуществления.

Ввиду того, что шаг по пространству достаточно маленький (несколько минут), пересчет модельных параметров нужно осуществлять с высокой регулярностью, что отмечено в руководстве к модели MITgcm [5] и было проверено авторами на практике. При пересчете реже, чем 1 раз в 100 с временной шкалы моделирования поле температуры оказывалось расходящимся – после нескольких итераций температура принимала физически не интерпретируемые значения. Параметры атмосферного воздействия обновляли значения каждые 6 часов симуляции (такой шаг в исходных массивах JRA [13]). Протоколирование данных имитационного моделирования выполнено с шагом в 3 часа, то есть погрешность по времени при сопоставлении экспедиционных данных и данных модели не превышает 1,5 часов.

Таким образом, с учетом числа дней для верификации, равного 10, и числа дней для разгона модели, равного 45, для каждой экспедиции было выполнено 47520 итераций имитационного моделирования с шагом в 100 с. Повышение длительности отрезка разгона до нескольких месяцев не давало качественного улучшения модельных результатов, а дальнейшее увеличение числа месяцев было чревато необходимостью учета динамики движения льда. Имеющиеся рекомендации специалистов [8] по разгону модели в течение нескольких полных лет (с подключением модулей MITgcm, отвечающих за ледообразование) не удалось реализовать также ввиду отсутствия высокопроизводительных вычислительных комплексов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Множество станций, на которых были выполнены измерения во время экспедиций 1–2, изображено на рисунке 1.

На рисунках 2–4 представлены распределения преобладающих направлений горизонтальных градиентов в зависимости от глубины для модельных и полученных в экспедициях данных. Показаны только те узлы, у которых имелись четыре соседних узла, – все обеспечены экспедиционными данными.

Для удобства комментирования введены пронумерованные с запада на восток и разделенные

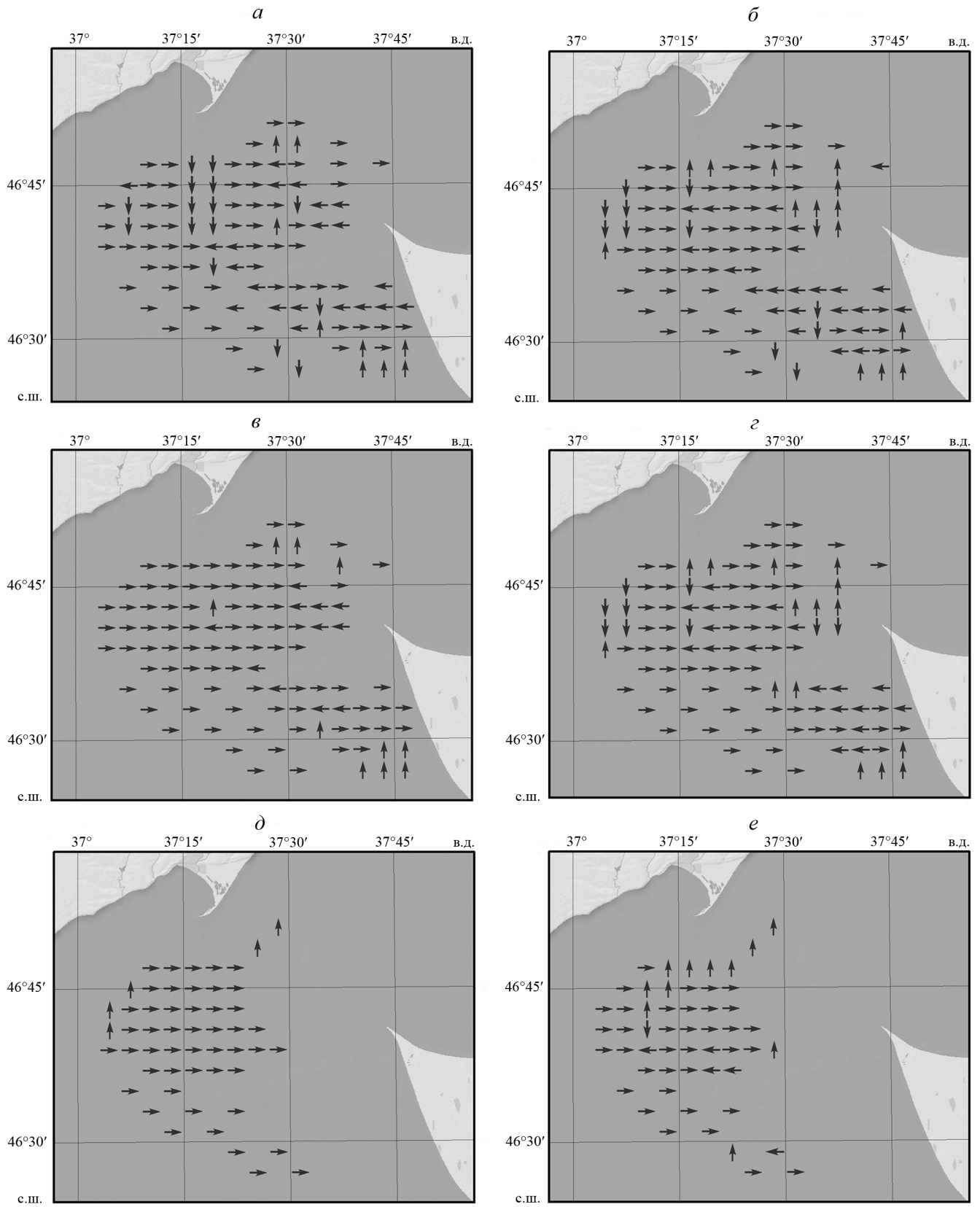


Рис. 4. Поля направлений градиентов в зависимости от глубины, экспедиция 3: *a, в, д* – модельные данные для глубин 0,5, 2,5, 8 м соответственно; *б, г, е* – данные, полученные в экспедиции на аналогичных глубинах.
Fig. 4. Gradient direction fields depending on depth, expedition 3: *a, в, д* – model data 0.5, 2.5, 8 m deep; *б, г, е* – observed data for the same depth levels.

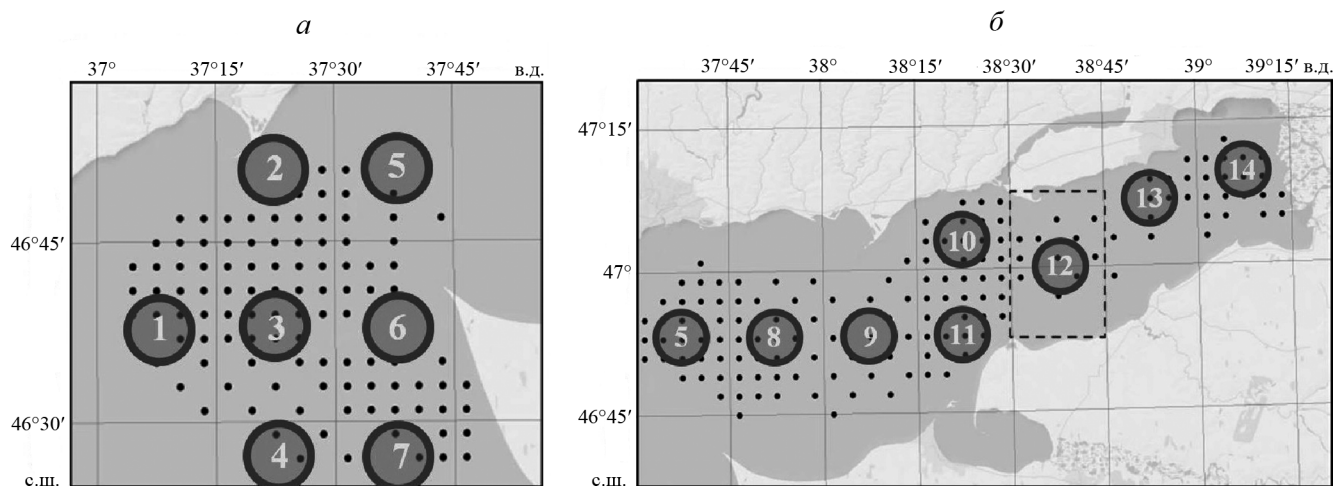


Рис. 5. Множества узлов, в которых вычислены градиенты, и соответствующие им области: *a* – узлы для экспедиции 3; *б* – узлы для экспедиций 1 и 2.

Fig. 5. Grid nodes sets where gradients are calculated and corresponding areas: *a* – expedition 3; *b* – expeditions 1 and 2.

параллелями и меридианами области (рис. 5). Области 6 и 7 содержат точки в прибрежной зоне, а область 12 ограничена с севера и юга дополнительными линиями.

Для температурных полей при сопоставлении модельных и экспедиционных данных получены следующие результаты (сообщаются наиболее важные):

- область 1: хорошо согласованы для придонного слоя, где изменчивость меньше, и для поверхностного; преобладание восточных градиентов;
- область 2: согласованы для средней части области; в модельных данных более явное преобладание восточных градиентов;
- область 3: хорошо согласованы для большей части области в поверхностном слое (на севере согласованы плохо); также преобладание восточных градиентов усилено в выходных данных MITgcm;
- область 5: согласованы, преобладают восточные градиенты;
- область 6: хорошо согласованы в южной части (для поверхностного слоя и пелагиали).

Все перечисленные области (собственно Азовское море на границе с Таганрогским заливом), кроме пятой, были охвачены исследованиями только во время экспедиции 3. Результаты для акватории Таганрогского залива (экспедиции 1 и 2):

- область 5: и по экспедиционным, и по модельным данным хорошо просматривается фронтальная зона – в поверхностном слое четко выраженные подобласти, вытянутые в меридиональном направлении, с южными и восточными градиентами; для

экспедиции 1 нужно отметить более явное преобладание восточных градиентов в модельных данных, чем в реальных; для экспедиции 2 обострение градиентов сохраняется с глубиной по модельным данным, а по экспедиционным поля градиентов приобретает более сложную конфигурацию;

- область 8: преобладание северных градиентов для придонного слоя в данных *in situ*; в модельных доминирование восточных градиентов; в экспедиции 2 в поверхностном слое просматривается область, вытянутая вдоль меридиана, с обострением южных градиентов как в модели, так и в реальных данных;

- область 9: поля оказались очень хорошо согласованы в поверхностном слое: практически вся область ориентирована в южном направлении, однако с увеличением глубины в модели преобладают восточные градиенты, а в данных *in situ* – западные;

- область 10: данные для экспедиции 2 согласованы очень хорошо (преобладание южных и западных градиентов), для экспедиции 1 в модели чрезмерно преобладают восточные градиенты;

- область 11: для экспедиции 2 очень хорошо согласованы; преобладают южные и западные градиенты; в модельных данных экспедиции 1 ошибочно преобладают северные градиенты;

- область 12: для экспедиции 2 поля хорошо согласованы; преобладают южные градиенты;

- области 13–14: во время экспедиции 2 на границе 13 и 14 областей образован «меридиональный коридор», по обе стороны от которого и в модельных, и в реальных данных преобладает южный градиент.

Таблица 1. Доли совпадающих направлений горизонтальных градиентов в модельных и экспедиционных данных по областям во время экспедиции 2

Table 1. Percentage of similar horizontal gradient directions of model and observed data in areas during expedition 2

Глубина 0,5 м Depth 0.5 m				Глубина 2,5 м Depth 2.5 m			
Область Area	Модель Model	Измерения Measurements	Совпадения Matches	Область Area	Модель Model	Измерения Measurements	Совпадения Matches
5			18 / 26 69 %	5			17 / 26 65 %
8			21 / 30 70 %	8			23 / 30 77 %
9			12 / 17 70 %	9			10 / 16 63 %
10			13 / 18 72 %	10			9 / 15 60 %
11			17 / 24 71 %	11			13 / 17 76 %
12			8 / 11 72 %	12			5 / 8 63 %
13			12 / 17 70 %	13			7 / 10 70 %
14			10 / 14 71 %	14			4 / 8 50 %

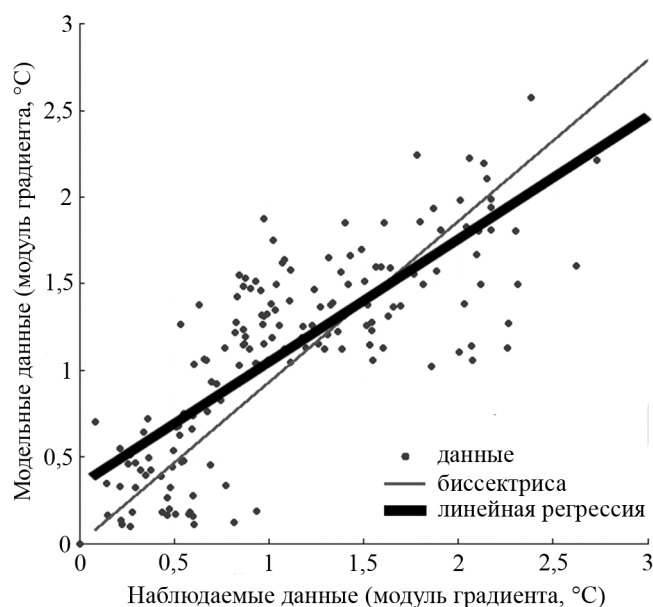


Рис. 6. Диаграмма рассеяния наблюдаемых и модельных значений модуля градиента температуры в поверхностном слое во время экспедиции 2.

Fig. 6. Scatter plot of observed and model gradient module values of surface temperature during expedition 2.

Анализ экспедиционных данных показывает, что в одной и той же акватории в июне (экспедиция 1) преобладают зональные направления, а в сентябре (экспедиция 2) существенно увеличивается доля южного направления, а западные направления доминируют над восточными. Последние превалируют для полей экспедиции 1, как модельных, так и реальных. На качественном уровне модель хорошо воспроизводит распределение градиентов для экспедиции 3 в областях 1, 3, 6, которые охватывают большую часть станций; для экспедиции 1 – в областях 5, 10, 12. Наиболее согласованными (большинство областей) оказались поля, соответствующие экспедиции 2.

По данным, представленным в таблице 1, можно утверждать, что доля совпадающих направлений градиентов (модельных и наблюдаемых) для экспедиции 2 в поверхностном слое (до 0,5 м) составляет 70 %, а в слое 2,5 м (с толщиной 0,5 м) – 65 %.

Достаточно хорошие результаты для экспедиции 2 подтверждают и количественные данные сравнения модулей. В частности, диаграмма рассеяния наблюдаемых и модельных значений модуля градиента температуры в поверхностном слое (экспедиция 2, 162 значения) приведена на рисунке 6. Коэффициент парной корреляции Пирсона ра-

вен 0,80, его интервальная оценка при доверительной вероятности 0,95 – промежуток (0,75; 0,84). Прямая линейной регрессии имеет угловой коэффициент 0,71; коэффициент детерминации равен 0,64.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании приведена информация о вычислительных экспериментах на базе гидродинамической модели MITgcm с целью ее верификации по данным из северо-восточной части Азовского моря, полученным в ходе трех экспедиций в 2005–2006 гг.

Для верификации модели по контактными измерениям температуры воды на различных глубинах построены поля горизонтальных градиентов, разбитые естественным образом по географическим признакам на квадраты. Анализ этих квадратов позволил сделать следующие выводы о качестве сгенерированных полей.

1. В наибольшей степени реальные и расчетные данные согласованы для осенней экспедиции 2005 г.

2. Имеют место существенные расхождения для полей летней экспедиции того же года, которые могут быть вызваны двумя причинами:

1) недостаточное пространственное разрешение полей характеристик атмосферного воздействия;

2) выбранные стартовая температура и/или стартовая дата, которые были получены в ходе решения вспомогательной обратной задачи моделирования (задачи с увеличенным пространственным шагом сетки) посредством компьютерного эксперимента, не являются оптимальными.

3. По результатам моделирования динамики, отслеживаемой во время экспедиции летом 2006 г., наиболее согласованы пары поверхностных и придонных полей температуры.

4. Неоднократно регистрируемой проблемой модельных данных для рассмотренных квадратов является ошибочное преобладание восточных градиентов, особенно с ростом глубины.

Верификация показала, что модель MITgcm может быть использована для моделирования изменчивости термохалинных полей в Азовском море, но ее эффективность выше при рассмотрении качественных и относительных количественных показателей (на примере градиентов температуры), в то время как абсолютные модельные значения имеют

существенные ошибки при имеющихся входных термохалинных данных и данных о взаимодействии атмосферы и океана.

Одним из вариантов продолжения исследований является сравнительный анализ результатов MITgcm для Азовского моря со значениями, полученными с помощью региональных моделей для мелководных водоемов, в частности, разработанной сотрудником ЮНЦ А.Л. Чикиным модели SASMO [2]. Опыт получения модельных данных MITgcm и верификации по данным *in situ* будет также использован при работе с полями температуры в Баренцевом море.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Чикин А.Л. 2009. Двухслойная математическая модель ветровых течений в водоемах, имеющих большие площади мелководья. *Математическое моделирование*. 21(12): 152–160.
3. Моисеев Д.В., Духно Г.Н. 2015. Верификация температуры поверхности моря по данным дистанционного зондирования Земли и *in situ* для Карского моря. В кн.: *Арктическое морское природопользование в XXI веке – современный баланс научных традиций и инноваций (к 80-летию ММБИ КНЦ РАН): тезисы докладов международной научной конференции (г. Мурманск, 1–3 апреля 2015 г.)*. Под ред. Г.Г. Матишова. Апатиты, изд-во Кольского научного центра Российской академии наук: 169–171.
4. Матишов Д.Г., Ильин Г.В., Моисеев Д.В. 2007. Сезонная термохалинная изменчивость водных масс в Таганрогском заливе Азовского моря. *Вестник Южного научного центра*. 3(1): 28–35.
5. MITgcm. URL: <http://mitgcm.org> (дата обращения: 10.10.2017).
6. Колдунов Н.В. Компиляция и настройка MITgcm, океан в компьютере. *Записки океанолога – обработка и визуализация данных*. URL: <http://koldunov.net/?s=%D0%9A%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%B8%D0%BB%D1%8F%D1%86%D0%B8%D1%8F+%D0%B8+%D0%BD%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B9%D0%BA%D0%B0+MITgcm> (дата обращения: 10.10.2017).
7. Блошкина Е.В., Иванов В.В. 2016. Конвективные структуры в Норвежском и Гренландском морях по результатам моделирования с высоким пространственным разрешением. *Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации*. 361: 146–168.
8. Колдунов А.В., Колдунов Н.В., Волков Д.Л., Белоненко Т.В. 2015. Применение спутниковых данных для валидации гидродинамической модели Северного Ледовитого океана. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 12(6): 111–124.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи выражают благодарность Н.В. Колдунову (Climate Service Center, Гамбург, Германия) и М. Лёшу (M. Lösch, Alfred Wegener Institute, Бремерхафен, Германия) за помощь и ценные советы по использованию модели MITgcm.

Исследование проведено в рамках темы госзадания «Биогеографические особенности функционирования больших морских экосистем (БМЭ) Арктики в условиях комплексного природопользования» (№ госрегистрации 01 2013 66840, № в госзадании 0228-2014-0009).

9. Куркин А.А., Семин С.В., Степанянц Ю.А. 2015. Трансформация поверхностных волн над донным уступом. *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 51(2): 242–252. doi: 10.7868/S0002351515020091
10. Махотин М.С., Иванов В.В. 2016. Распространение атлантических водных масс в Баренцевом море по данным наблюдений и численного моделирования. *Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации*. 361: 169–191.
11. Запорожцев И.Ф., Моисеев Д.В. 2017. Моделирование пространственно-временной изменчивости температуры в Таганрогском заливе с помощью модели MITgcm. *Вестник МГУ*. 20(1/2): 231–241. doi: 10.21443/1560-9278-2017-20-1/2-231-241
12. GEBCO. *General Bathymetric Chart of the Oceans*. URL: https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/gebco_30_second_grid/ (дата обращения: 10.10.2017).
13. *Japanese 25-year ReAnalysis (JRA-25) and JMA Climate Data Assimilation System (JCDAS)*. URL: http://jra.kishou.go.jp/JRA-25/index_en.html (дата обращения: 10.10.2017).
14. GRDC. *Global Runoff Data Base – Status, Development, Use*. URL: http://www.bafg.de/GRDC/EN/01_GRDC/13_dtbase/database_node.html (дата обращения: 10.10.2017).
15. Матишов Г.Г., Бердников С.В., Жичкин А.П., Макаревич П.Р., Дженюк С.Л., Кульгин В.В., Яицкая Н.А., Поважный В.В., Швердяев И.В., Кумпан С.В., Третьякова И.А., Цыганкова А.Е. 2014. *Атлас климатических изменений в больших морских экосистемах Северного полушария (1878–2013). Регион 1. Моря Восточной Арктики. Регион 2. Чёрное, Азовское и Каспийское моря*. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 256 с.
16. Федоров К.Н. 1983. *Физическая природа и структура океанических фронтов*. Л., Гидрометеиздат: 296 с.

REFERENCES

1. 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. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 3(5): 562–574. doi: 10.1134/S2070048211050115

2. Chikin A.L. 2009. [The two-layer mathematical model of the wind currents in the basin with different level of deep]. *Matematicheskoe modelirovanie*. 21(12): 152–160. (In Russian).
3. Moiseev D.V., Dukhno G.N. 2015. [Verification of the Kara Sea surface temperature according to data of remote sensing and in situ observations]. In: *Arkticheskoe morskoe prirodopol'zovanie v XXI veke – sovremennyy balans nauchnykh traditsiy i innovatsiy (k 80-letiyu MMBI KNTs RAN): teziy dokladov mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*. [Arctic marine nature management in the 21st century – modern balance of scientific traditions and innovations (for the 80th anniversary of MMBI KSC RAS): abstracts of international scientific conference) (Murmansk, Russia, 1–3 April 2015)]. G.G. Matishov (Ed.). Apatity, Kola Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 169–171. (In Russian).
4. Matishov D.G., Ilyin G.V., Moiseev D.V. 2007. [Seasonal thermohaline variability of water mass in the Taganrog Bay of the Azov Sea]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra*. 3(1): 28–35. (In Russian).
5. MITgcm. Available at: <http://mitgcm.org> (accessed 10 October 2017).
6. Koldunov N.V. [MITgcm compilation and configuration, ocean in the computer]. *Zapiski okeanologa – obrabotka i vizualizatsiya dannykh*. [Oceanographer's notes – data handling and visualization]. Available at: <http://koldunov.net/?s=%D0%9A%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%B8%D0%B%D1%8F%D1%86%D0%B8%D1%8F+%D0%B8+%D0%BD%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B9%D0%BA%D0%B0+MITgcm> (accessed 10 October 2017). (In Russian).
7. Bloshkina E.V., Ivanov V.V. 2016. [Convective structures in the Greenland and Norwegian seas according to the results of the high spatial resolution simulation]. *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiyskoy Federatsii*. 361: 146–168. (In Russian).
8. Koldunov A.V., Koldunov N.V., Volkov D.L., Belonenko T.V. 2015. [Applying satellite data for validation of the hydrodynamic model for the Arctic Ocean]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 12(6): 111–124. (In Russian).
9. Kurkin A.A., Semin S.V., Stepanyants Yu.A. 2015. Transformation of surface waves over a bottom step. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 51(2): 214–223. doi: 10.1134/S0001433815020097
10. Makhotin M.S., Ivanov V.V. 2016. [Circulation of the Atlantic water in the Barents Sea based on hydrological survey data and numerical simulation]. *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiyskoy Federatsii*. 361: 169–191. (In Russian).
11. Zaporozhtsev I.F., Moiseev D.V. 2017. [Simulation of spatio-temporal variability of temperature in the Taganrog Bay with MITgcm model]. *Vestnik MGTU*. 20(1/2): 231–241. (In Russian). doi: 10.21443/1560-9278-2017-20-1/2-231-241
12. GEBCO. *General Bathymetric Chart of the Oceans*. Available at: https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/gebco_30_second_grid/ (accessed 10 October 2017).
13. *Japanese 25-year ReAnalysis (JRA-25) and JMA Climate Data Assimilation System (JCDAS)*. Available at: http://jra.kishou.go.jp/JRA-25/index_en.html (accessed 10 October 2017).
14. GRDC. *Global Runoff Data Base – Status, Development, Use*. Available at: http://www.bafg.de/GRDC/EN/01_GRDC/13_dtbse/database_node.html (accessed 10 October 2017).
15. Matishov G.G., Berdnikov S.V., Zhichkin A.P., Makarevich P.R., Dzhenyuk S.L., Kulygin V.V., Yaitskaya N.A., Povazhnyi V.V., Sheverdyayev I.V., Kumpan S.V., Tret'yakova I.A., Tsygankova A.E. 2014. *Atlas klimaticheskikh izmeneniy v bol'shikh morskikh ekosistemakh Severnogo polushariya (1878–2013). Region 1. Morya Vostochnoy Arktiki. Region 2. Chernoe, Azovskoe i Kaspiyskoe morya*. [Atlas of climatic changes in large marine ecosystems of the Northern hemisphere (1878–2013). Region 1. The Eastern Arctic seas. Region 2. The Black Sea, the Sea of Azov and the Caspian Sea]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 256 p. (In Russian).
16. Fedorov K.N. 1983. *Fizicheskaya priroda i struktura okeanicheskikh frontov*. [Physical nature and structure of ocean fronts]. Leningrad, Gidrometeoizdat: 296 p. (In Russian).

Поступила 30.06.2017