

И. Ф. Запорожцев, Д. В. Моисеев

Моделирование пространственно-временной изменчивости температуры в Таганрогском заливе с помощью модели MITgcm

Целью работы является анализ эффективности модели MITgcm в моделировании изменчивости температурных полей в Таганрогском заливе. Авторами впервые рассмотрен вариант гидродинамического моделирования на базе MITgcm для этого залива. Данные о температуре воды *in situ* для сравнения с модельными данными получены в ходе двух совместных экспедиций Мурманского морского биологического института Кольского научного центра РАН и Южного научного центра РАН летом и осенью 2005 г. Шаг расчетной сетки согласован с шагом сетки станций контактных измерений: данные о температуре и солёности воды, полученные в ходе рейсов, покрывают акваторию Таганрогского залива с дискретностью 2' по широте и 3' по долготе (и с шагом 4' и 6' соответственно для заведомо однородных по термохалинным характеристикам областей). Шаг по глубине составил 0,5 м. Данные для инициализации MITgcm и атмосферного форсинга взяты из открытых баз данных реанализа и атласов, отмечены их недостатки применительно к решаемой задаче. С целью упрощения формулировки граничных условий моделирование выполнено для всего Азовского моря. Проведена серия вычислительных экспериментов для определения оптимальных стартовой даты имитационного моделирования и инициализирующего константного температурного поля. Ввиду существенных временных затрат на каждый эксперимент оптимизационная задача решалась для очень ограниченного числа вариантов и с удвоенным шагом сетки (4' по широте и 6' по долготе). Найденные значения параметров использовались для решения исходной задачи верификации модельных данных по измеренным. В соответствии с тем, что рассмотрены результаты, полученные авторами на конкретной рабочей станции (персональной ЭВМ), сделан вывод о возможности имитационного моделирования с помощью MITgcm для реальных акваторий без использования специализированных высокопроизводительных вычислительных комплексов.

Ключевые слова: модель MITgcm, Таганрогский залив, Азовское море, моделирование пространственно-временной изменчивости температуры, верификация модели по данным *in situ*.

Введение

Моделирование пространственно-временной изменчивости полей океанографических характеристик и параметров морской биоты является актуальной задачей современных экосистемных исследований. В последние десятилетия финансирование, а следовательно, и объем контактных измерений в рамках экспедиций существенно сократились, в то же время сложные технические системы стали более доступными и функциональными. Появление средств дистанционного зондирования, в том числе спутников, привело к формированию больших массивов однородной информации, содержащих поля значений физических характеристик морской среды.

Экономическая стоимость получения данных с помощью дистанционного зондирования в масштабах планеты ниже аналогичной стоимости для контактных измерений, так как позволяет осуществить мониторинг больших по площади территорий и находит значительное число потребителей. Длинные ряды данных позволяют отслеживать закономерности и корректировать вновь поступающие значения. Качество этих данных повышается, так как данные подвергаются преобразованиям, обусловленным физическими законами, статистическими гипотезами, а также известными недостатками технических средств. Однако такая унификация, нивелирование локальных геологических, атмосферных, биогеографических условий на этапе первичной регистрации данных приводит к повышению стоимости их дальнейшей обработки. Вместе с этим уровень шума, погрешность, пространственное и временное разрешение ограничивает круг задач, решаемых с использованием телеметрии.

Принципиально иной подход основан на использовании выявленных и многократно проверенных закономерностей в виде математических моделей. Понятно, что для повышения качества результата в модель вводят все больше учитываемых факторов, в том числе локальных, но возможности их измерения ограничены природой данных. Современным можно считать подход, предполагающий многоитерационную параметрическую идентификацию модели (или ансамбля моделей с различной степенью доверия эксперта к каждой из них) и калибровку по измеренным регулярно обновляемым данным. Наблюдающееся в последние два десятилетия повышение доступности и производительности вычислительной техники позволяет рассматривать такой подход как основной и наиболее перспективный, что было бы невозможно в предшествующие годы. Так или иначе, в каждой конкретной ситуации необходимо оценить, хватит ли имеющихся вычислительных мощностей для имитационного моделирования происходящих в акватории процессов и получения результатов

за оптимальное время с приемлемой погрешностью. Обоснованные выводы о корректности и эффективности применения математического аппарата для конкретной задачи можно сделать только в том случае, когда результаты являются проверяемыми. В данной статье рассматривается задача моделирования, в которой численная гидродинамическая модель MITgcm¹ [1; 2] калибруется с помощью периодических воздействий, обусловленных атмосферными факторами, и генерирует изменяющееся поле температуры воды на различных глубинах в Таганрогском заливе. Таким образом, можно считать, что решается задача верификации модели по данным *in situ* с целью принятия решения о возможности ее применения для моделирования, при котором модельные данные будут основным источником информации.

Материалы и методы

Параметры акватории и источники данных. Для верификации температурных полей, рассчитанных с помощью модели MITgcm, использовались данные двух совместных экспедиций [3] Мурманского морского биологического института (ММБИ) Кольского научного центра РАН и Южного научного центра РАН за периоды: 23 июня – 2 июля и 15–24 сентября 2005 г. Данные о температуре и солености воды, полученные в ходе рейсов, покрывают акваторию Таганрогского залива с дискретностью 2' (4') по широте и 3' (6') по долготе (рис. 1). Такая сетка станций была разработана на этапе подготовки к первой экспедиции специально для решения задач по верификации математических моделей. В районах фронтальных зон дискретность расположения станций выше (2' × 3'), чем на акваториях с более однородным распределением термохалинных характеристик воды (4' × 6'). Гидрологические показатели измерялись с помощью STD-зонда STD60M. Инструментальная погрешность значений температуры составляет 0,005 °С. Данные обработаны с помощью программного обеспечения от производителя зонда и осреднены через 0,5 м по глубине.

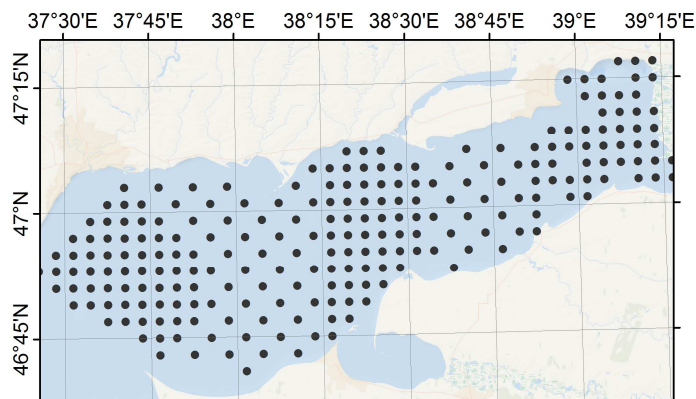


Рис. 1. Станции во время рейса P1

Fig. 1. P1 cruise stations

Проект MITgcm представляет собой программную реализацию численной гидродинамической модели, разработанную на базе Массачусетского технологического университета. Программный комплект создан на языке Fortran; для использования модели необходимо настроить ряд параметров и подготовить несколько входных файлов. Часть входных данных передается до компиляции модели, а часть – в момент запуска. Программные средства MITgcm являются консольными приложениями (не имеют графического интерфейса). Для компиляции модели, формирования, визуализации и анализа результатов необходимо использовать стороннее программное обеспечение [1; 2].

В данной работе моделирование выполнялось для всей акватории Азовского моря, ограниченной 45,2° с.ш., 47,3° с.ш., 34,4° в.д., 39,4° в.д., от поверхностного слоя до дна. Файл батиметрии сформирован на основе продукта GEBCO-2014 30 Arc-Second Grid (<http://www.gebcos.net>) с коррекцией максимальных глубин *in situ* по станциям экспедиций. Наибольшая глубина моря – 13,5 м. Доступ к батиметрии в MITgcm осуществляется через файловую переменную *bathyFile*.

Данные реанализа NCEP NOAA, JRA и ERA-Interim, которые обеспечивают атмосферные граничные условия, имеют недостаточное пространственное разрешение для исследуемой акватории, однако подходящих альтернатив, содержащих необходимое количество сведений о форсинге, нет. В работе используются массивы JRA-25 (Japanese 25-year Reanalysis Project, шаг сетки 1,1°), приведенные с шестичасовой дискретностью. Они содержат значения параметров приповерхностного ветра, температуры, влажности нисходящей коротко- и длинноволновой радиации, а также осадков. Ежемесячные климатологические значения речного стока

¹ MITgcm User Manual. URL: http://mitgcm.org/public/r2_manual/latest/online_documents/manual.pdf.

взяты из Arctic Runoff Database. Данные о стоке были скорректированы с учетом сведений о водном балансе из [4] ("гирла" Дона и Кубани, Сиваш, Керченский пролив). Выполнение модельных расчетов для всей акватории моря, а не только для залива, упрощает введение граничных условий, так как в противном случае необходима детальная информация о гидрометеорологических характеристиках на входе в залив с запада. Всякая попытка оценки этих значений вместе с обозначенными проблемами пространственного разрешения имеющихся данных приведет к еще большей погрешности результатов моделирования.

Начальные условия в данной работе – поля температуры и солёности. Ввиду того, что солёность в заданной акватории в течение рассматриваемых месяцев изменяется незначительно (по информации из Атласа [5]), начальные условия (неоднородные скалярные поля в трехмерном пространстве) солёности можно задать как среднемесячные значения. Поле было построено в результате интерполяции данных, представленных в Атласе [5], и откалибровано по данным *in situ*, полученным в ходе упомянутых экспедиций в Таганрогском заливе. Поле загружается из файла (параметр *hydrogSaltFile*). Начальное условие по температуре – скалярная переменная *tRef*: неоднородное поле не задается, так как временному промежутку, для которого происходит верификация, предшествует промежуток разгона модели, в течение которого и формируется неоднородное поле.

Методика вычислений. Сетка в трехмерной области, заданная для расчетов, содержит в качестве подмножества узлы сети станций двух экспедиций, которая в свою очередь является объединением нескольких равномерных сеток. Планарная сетка на горизонтах: 105 × 69 узлов (с шагом 3' и 2' по долготе и по широте соответственно); 17 горизонтов (с шагом 0,5 м; последний слой – глубины, превышающие 8 м). Нужно отметить, что интерполяция (восстановление в узлах равномерной сетки модели) файлов форсинга обеспечивается стандартными средствами MITgcm без участия пользователя; батиметрия и начальные условия для солёности заданы в узлах указанной сетки.

Достаточно маленькие пространственные шаги сетки требуют частого пересчета значений модели MITgcm². При имитационном моделировании шаг по времени для уравнений движения и переноса трассера составил 100 с; периодичность записи результатов в файл netCDF – 10 800 с (каждые 3 часа симуляции).

Модельные физические параметры для MITgcm были установлены в соответствии с рекомендациями в статьях [1; 2], а также документации и учебных сетапах MITgcm. Учитывались следующие конфигурации:

- 1) глобальной циркуляции (учебный сетап *Global_Oce_latlon*);
- 2) регионального моделирования: морей Арктики (ftp://ecco2.jpl.nasa.gov/data6/arctic/arctic_4km/cube-JRA_4km/input/) и Лабрадорского моря (учебный сетап *Lab_Sea*).

Временной промежуток, для которого выполнялось имитационное моделирование с помощью MITgcm, можно разделить по смыслу (не по способу расчета модели) на два: отрезок адаптации ("разгона") и отрезок верификации. В течение первого происходит адаптация модели к входным данным (батиметрии, полям начальной температуры и солёности, периодическим воздействиям в виде характеристик атмосферного форсинга). Второй отрезок обусловлен временем сбора данных контактных измерений, полученных в экспедициях. Таким образом, второй отрезок имеет фиксированную длину, а первый может изменяться путем выбора различных моментов начала моделирования.

Серии экспериментов выполнялись отдельно для каждого набора данных (температурных полей), определяемого конкретной экспедицией. Как было сказано в предыдущем разделе, измеренная на гидрологических станциях глубина и солёность использовались для уточнения батиметрии GEBCO и задания начальных условий соответственно. Отдельными проблемами, требующими численного исследования, стали вопросы выбора температуры для *tRef* и стартовой даты, с которой начинается разгон модели. Подобные задачи являются обратными задачами математического моделирования и, очевидно, являются некорректными, т. е. имеют не единственное решение. Ввиду того, что прямая задача – модельные расчеты на обоих отрезках (разгона и верификации) – требует значительных ресурсов (техники и времени), оптимальность выбора конкретной температуры и даты в качестве начальных условий, т. е. оптимальность решения обратной задачи, не обсуждается в данной работе. Вместо нее экспериментально решается аналогичная задача для сетки, имеющей в два раза больший шаг, чем исходная, с перебором потенциальных значений температуры и стартовых дат. В качестве потенциальных стартовых дат выбираются те, которые отделены от начала отрезка верификации кратным количеством недель и месяцев (неделя, две недели, три недели, месяц, месяц и неделя, месяц и две недели, месяц и три недели, два месяца). Всего 8 вариантов. Множество потенциальных значений температуры: 16, 18, 20, 22, 24 (°C). Для первого массива входных данных (июнь 2005 г.) учитывались только первые три значения из множества, для данных сентябрьской экспедиции 2005 г. – три последние.

Персональная ЭВМ, выбранная для осуществления экспериментов, не выполняла никаких пользовательских задач одновременно с модельными расчетами. Ее основные характеристики:

- 1) операционная система: Ubuntu 14.04 32bit;
- 2) объем оперативной памяти: 2 Гб;

² MITgcm User Manual. URL: http://mitgcm.org/public/r2_manual/latest/online_documents/manual.pdf.

- 3) процессор: Intel Core 2 Duo;
- 4) частота процессора: 2,93 ГГц.

Очевидно, что данная ЭВМ обладает достаточно "слабыми" характеристиками; она уступает большинству имеющихся в организации (ММБИ) рабочих станций, на которых решаются задачи офисного типа, подготовки карт и т. д. Выбор этой станции определялся вопросом возможности проведения содержательных экспериментов с реальными данными на ЭВМ низкой производительности пользователем, не являющимся специалистом в области оптимизации вычислений для многопроцессорных систем.

Средняя продолжительность каждого эксперимента в ходе перебора всех возможных пар из восьмизлементного множества дат и трехэлементного множества температур составила 15 минут.

Описанная вспомогательная обратная задача, заключающаяся в выполнении и анализе результатов серий расчетов для укрупненной сетки, заняла по времени около 5,5 час для каждого массива данных, т. е. всего примерно 11 часов. При этом учитывалось, что переход к следующему эксперименту по завершении предыдущего может выполняться с некоторой задержкой при ручном вводе или без нее при пакетном варианте с автоматическим переключением. Важно также, что анализ результатов может выполняться на той же рабочей станции, что и модельные расчеты. При всех допущениях хорошо спланированная серия экспериментов и их анализ потребуют 2–3 дня. Эта оценка справедлива для специалиста, который уже имеет некоторый набор готовых скриптов и опыт подобных расчетов.

Результаты и обсуждение

В табл. 1 приведены сведения о длине промежутков разгона и верификации, установленных при решении вспомогательной обратной задачи. Каждая итерация модельных расчетов соответствует равноотстоящим моментам времени с шагом 100 с (в сутках 86 400 с, т. е. 864 итерации в сутки). Для упрощения ссылок на экспедиционные данные будем именовать их рейсами, снабдив нумерацией в хронологическом порядке их осуществления.

Таблица 1. Временные отрезки симуляции
Table 1. Simulation time segments

Рейс	Сроки съемки	Общее число итераций	Общее число дней	Дата и время старта	Число дней для разгона	Число дней для верификации
P1	23.06.2005–02.07.2005	27 648	32	01.06.2005 00:00	22	10
P2	15.09.2005–24.09.2005	47 520	55	01.08.2005 00:00	45	10

Примерная продолжительность одного эксперимента с данными для исходной задачи и объем файла результатов в формате netCDF, который формируется одним из пакетов MITgcm, представлены в табл. 2.

Таблица 2. Время расчета и объем выходного файла
Table 2. Calculation duration and output file size

Рейс	Время работы, ч	Объем файла, Мб
P1	2	630
P2	3,5	1 050

Модельные расчеты выполнены для всей акватории Азовского моря с целью верификации температурных полей на различных глубинах за периоды двух указанных выше рейсов. В качестве иллюстраций приведены поля на следующих горизонтах: 0,5 м; 2,5 м; 5 м. Все изображения построены по данным из выходного файла модели MITgcm в формате netCDF с использованием Matlab R2015b (табл. 3).

Сетка станций, в которых выполнялись измерения во время рейса P1, показана на рис. 1. Распределение станций рейса P2 несколько отличается от приведенного, но несущественно. Отметим, что данные измерений соответствуют различным моментам времени согласно последовательности выполнения станций по маршруту экспедиции. Ввиду этого факта (по аналогии с [6]) для анализа удобнее агрегированное поле измеренных (и модельных) значений температуры, сформированное для периода всей экспедиции. Поля измеренных данных для рейсов P1 и P2, полученные с помощью интерполяции методом кригинга в ГИС-программе ArcMap 10.1, приведены на рис. 2.

Таблица 3. Модельные температурные поля в акватории Азовского моря
 в зависимости от глубины (горизонт d)
 Table 3. Model temperature fields in the Azov Sea depending on depth (horizon d)

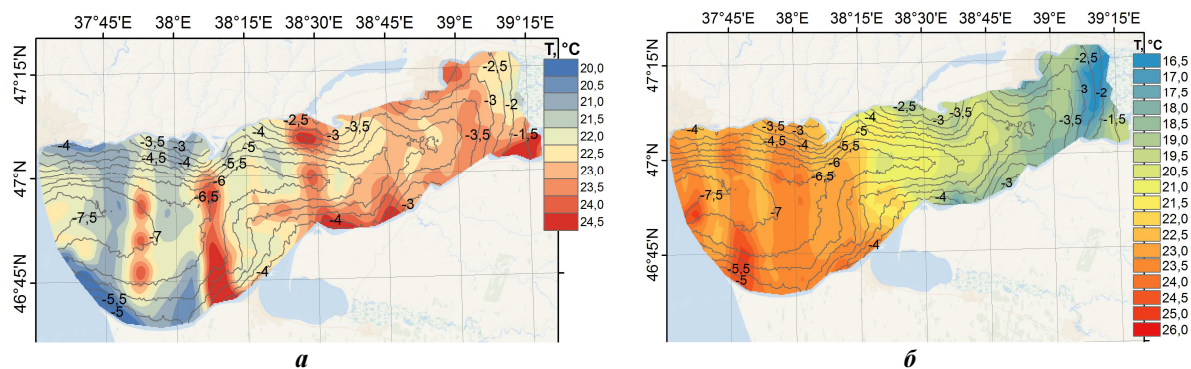
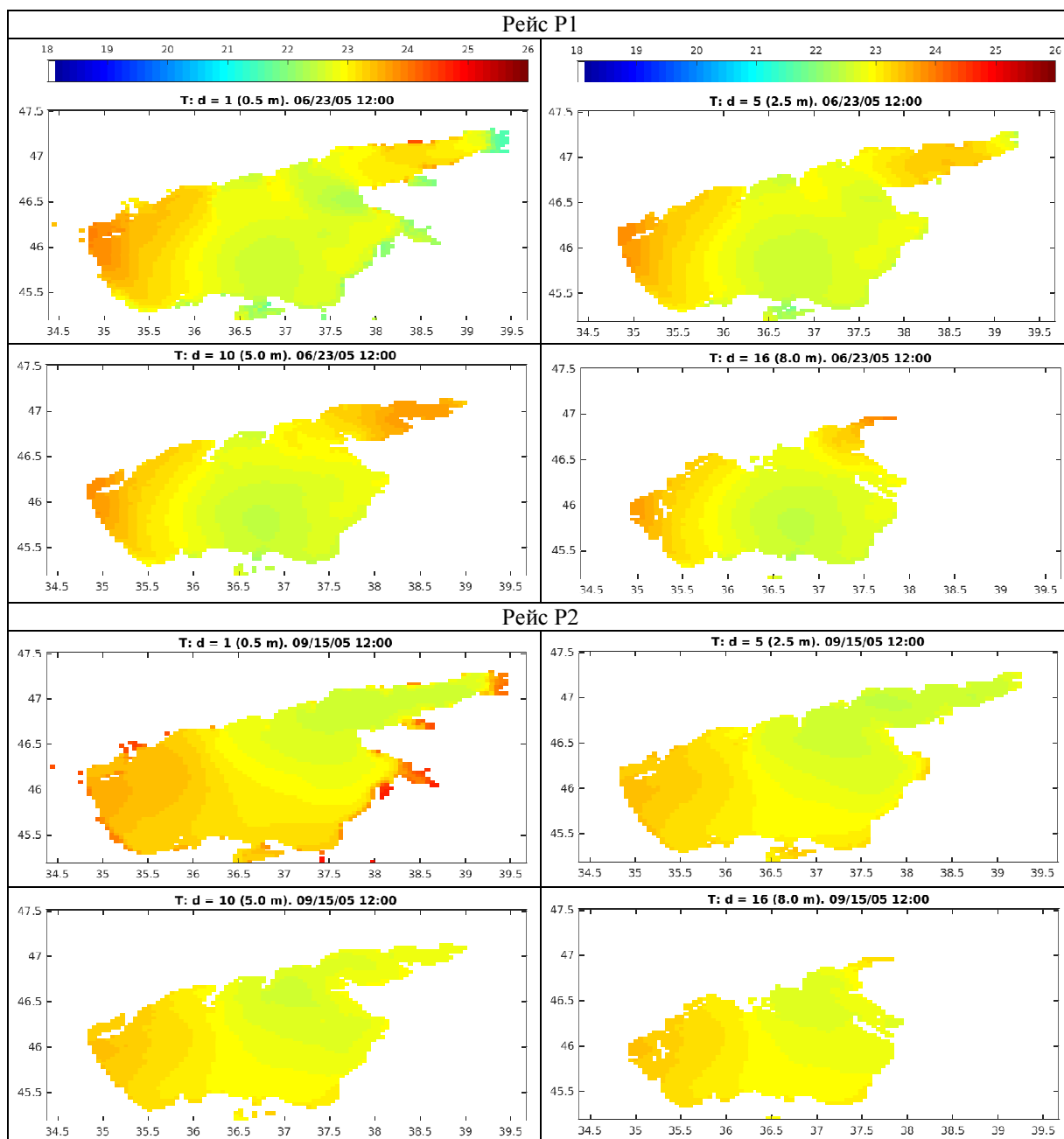


Рис. 2. Проинтерполированное поле температур для рейсов P1 (а) и P2 (б) с батиметрией
 Fig. 2. Interpolated temperature fields of P1 (a) и P2 (б) cruises with bathymetry

Значения для пар сопоставляемых модельных и наблюдаемых полей в конкретных узлах синхронизированы по времени. В табл. 4–5 указаны следующие показатели: общее количество узлов (станций) n , в которых доступны данные для сравнения на глубине (горизонте) d ; число выбросов для станций n_B , среднее значение ошибки на горизонте, среднеквадратическое отклонение (с.к.о.), а также исправленное (скорректированное) с.к.о. (см. ниже). Выбросом (аномалией) будем считать разность модельного и измеренного значений, превосходящую по модулю $3\text{ }^\circ\text{C}$.

Таблица 4. Распределение абсолютных ошибок по горизонтам. Рейс P1

Table 4. Absolute errors distribution by horizons. P1 cruise

№ п/п	d , м	n	n_B	Среднее, $^\circ\text{C}$	С.к.о., $^\circ\text{C}$	С.к.о. испр., $^\circ\text{C}$
1	0,5	248	1	1,402	0,504	0,532
2	1,0	243	1	1,497	0,470	0,488
3	1,5	229	0	1,628	0,436	0,380
4	2,0	210	1	1,743	0,401	0,316
5	2,5	202	1	1,839	0,379	0,286
6	3,0	191	0	1,952	0,341	0,226
7	3,5	179	1	2,033	0,317	0,198
8	4,0	159	3	2,120	0,350	0,244
9	4,5	136	6	2,222	0,289	0,246
10	5,0	130	7	2,296	0,295	0,302
11	5,5	102	10	2,415	0,269	0,345
12	6,0	69	11	2,469	0,278	0,404
13	6,5	56	11	2,553	0,302	0,426
14	7,0	39	7	2,515	0,281	0,418
15	7,5	20	3	2,535	0,287	0,352
16	8,0	5	0	2,249	0,292	0,224

Таблица 5. Распределение абсолютных ошибок по горизонтам. Рейс P2

Table 5. Absolute errors distribution by horizons. P2 cruise

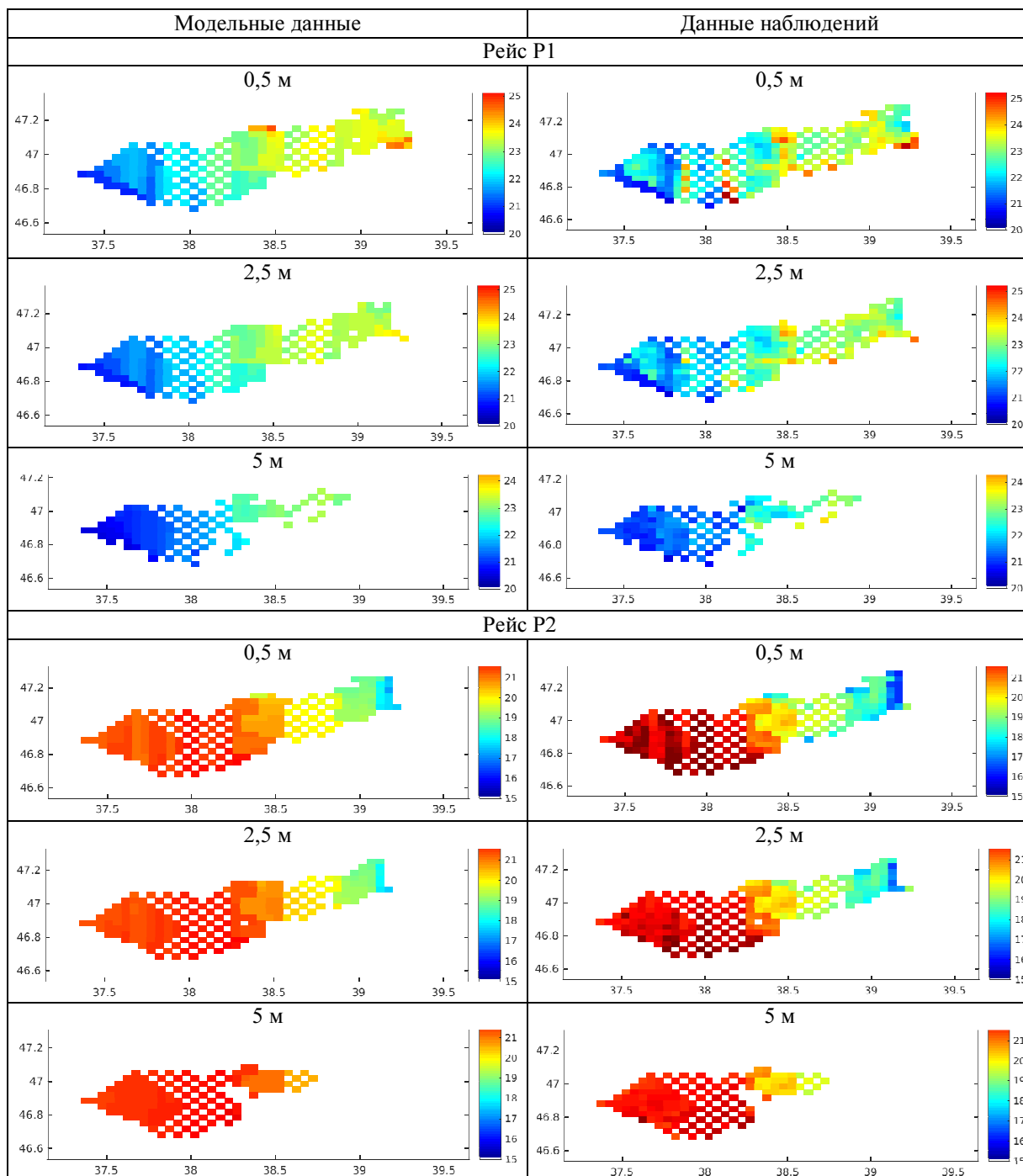
№ п/п	d , м	n	n_B	Среднее, $^\circ\text{C}$	С.к.о., $^\circ\text{C}$	С.к.о. испр., $^\circ\text{C}$
1	0,5	243	4	1,165	0,794	0,604
2	1,0	238	1	1,175	0,787	0,582
3	1,5	235	1	1,173	0,794	0,526
4	2,0	223	0	1,146	0,744	0,428
5	2,5	221	1	1,201	0,725	0,348
6	3,0	203	1	1,217	0,682	0,301
7	3,5	186	0	1,239	0,642	0,258
8	4,0	175	0	1,285	0,606	0,252
9	4,5	158	0	1,295	0,556	0,264
10	5,0	142	0	1,310	0,499	0,278
11	5,5	118	0	1,367	0,446	0,288
12	6,0	104	0	1,399	0,413	0,279
13	6,5	84	0	1,441	0,365	0,251
14	7,0	53	0	1,538	0,295	0,211
15	7,5	25	0	1,669	0,283	0,233
16	8,0	16	0	1,832	0,198	0,198

Исследуем ошибку, которая допускается моделью (при сравнении с наблюдаемыми данными). Так как модель завышает значения температуры для всех слоев в обоих экспериментах (количество отрицательных значений разности модельных и измеренных данных не превышает одного процента от общего числа станций), можно предположить, что ошибка является систематической. Это предположение подтверждается экспериментально полученными с помощью MITgcm результатами для других акваторий [7; 8]. Для P1 средняя по горизонтам ошибка составила $2,09\text{ }^\circ\text{C}$, а для P2 – $1,34\text{ }^\circ\text{C}$. Ошибка слабо меняется от слоя к слою: при доверительной вероятности 0,95 получаем значения $(2,09 \pm 0,26)\text{ }^\circ\text{C}$ и $(1,34 \pm 0,14)\text{ }^\circ\text{C}$. Среднеквадратичное отклонение также вычислено для горизонтов по отдельности (табл. 4 и 5). Слой на глубине от 8 м до дна не рассматривается ввиду того, что станций с такими глубинами в Таганрогском заливе было не более 5,

что затрудняет статистический анализ. Важно отметить, что значения с.к.о. достаточно малы как для P1, так и для P2. В расчете доверительных интервалов с вероятностью 0,95 для большинства горизонтов слагаемое погрешности не превосходит 0,07 °C (кроме четырех наиболее глубоких слоев) для P1 и 0,1 °C (кроме двух наиболее глубоких слоев) для P2. Как следует из таблиц, вариативность ошибки – полуширина доверительного интервала – составляет 10–12 % ошибки в наблюдаемом значении.

При вычитании из каждого поля средней по всем горизонтам ошибки (2,09 °C и 1,34 °C для P1 и P2 соответственно) приходим к еще меньшим значениям с.к.о. для рейса P2 (с.к.о. испр. в табл. 5–6); для другого рейса с.к.о. заметно меньше только в толще вод от 1 до 5 м (рис. 3). При наличии статистики ошибок за различные временные отрезки в течение года можно использовать их для коррекции новых значений за те же отрезки других лет, которые получаются при моделировании.

Таблица 6. Температурные поля в Таганрогском заливе
 Table 6. Temperature fields in the Taganrog Bay



Далее для P1 был проведен эксперимент с более длинным временным отрезком разгона, а для P2, наоборот, – с более коротким (45 суток и 22 дня соответственно), длительность моделирования для двух рейсов поменялись местами (табл. 1). Результаты отличались незначительно от приведенных выше, поэтому можно сделать вывод, что полученные статистические характеристики обусловлены скорее не длиной отрезка разгона, а особенностями межсезонной изменчивости гидрологического режима залива.

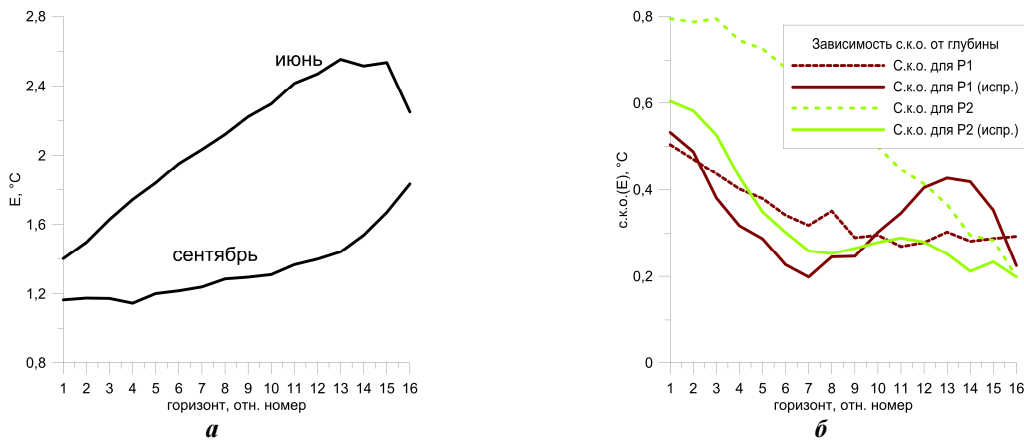


Рис. 3. Профили (а) осредненных по горизонтам абсолютных ошибок E для рейсов P1 (июнь) и P2 (сентябрь), (б) с.к.о. ошибок E
 Fig. 3. Profiles of (а) averaged by horizons absolute errors E for P1 and P2 cruises, (б) standard deviations of errors E

В табл. 6 представлены поля собранных во время экспедиций данных и модельных (по экспериментам с длительностью из табл. 1), из которых вычтены ошибки 2,09 °C и 1,34 °C для P1 и P2 соответственно. Рисунки, из которых сформирована таблица, выполнены с помощью Matlab R2015b.

Сопоставление карт температуры в заливе (табл. 6) показывает, что несмотря на локальные отличия, изменение температуры с запада на восток на всех глубинах хорошо согласовано в модельных данных с выводами для измеренных данных [3; 9].

Заключение

В ходе работы было выполнено моделирование с помощью модели MITgcm температурных полей Азовского моря в июне и сентябре 2005 года на горизонтах с шагом 0,5 м и проведено сравнение модельных данных с данными *in situ*, полученными для этих же месяцев 2005 года в ходе двух экспедиций в Таганрогском заливе.

Для определения предпочтительных значений инициализирующей константной температуры для акватории и стартового момента разгона модели была решена вспомогательная обратная задача: при увеличенных шагах по пространству определены значения каждого из параметров, при которых изменение другого не влияло на сходимость полученного температурного поля к наблюдаемому на разных горизонтах.

Контроль результатов осуществлялся как посредством визуального сопоставления полей, так и численно с использованием простейших статистических характеристик.

Установлено, что модель завышает значения температуры, причем это повышение можно определить как константу – свою для каждого временного отрезка (в данной задаче: в среднем по горизонтальным уровням на 2,09 °C и 1,34 °C для летней и осенней экспедиций соответственно). Подобное поведение отмечается в статьях [7; 8]. Этот вопрос требует дальнейшего исследования.

Ошибки для температурных полей июня и сентября 2005 года с ростом глубины имеют устойчивую динамику на линейное возрастание до 6-метровой глубины. Но важно отметить, что среднеквадратическое отклонение значений невелико (обеспечивает вариативность ошибки 10–12 %). Далее участки кривых ошибок для пяти наиболее глубоких горизонтов, считая придонный, существенно отличаются: одна кривая выпукла вверх, а другая – вниз. Значимость этого вывода трудно оценить статистически: на 6,5 и 7 м имеем выборки объема 50–80 элементов, а глубже – не более 25 значений.

Ошибки за июнь на каждом горизонте оказались больше, чем ошибки за сентябрь, почти в два раза. Данный результат можно объяснить как гидрометеорологическими условиями в период экспедиций, так и тем фактом, что отрезок разгона модели для сентябрьского эксперимента был в 2 раза длиннее (45 суток против 22, на 20 000 итераций пересчета MITgcm больше). Дополнительные эксперименты показали, что длительность отрезка разгона для акватории Таганрогского залива не является определяющим фактором, так как получены качественно сходные результаты имитационного моделирования за три недели и полтора месяца разгона модели (по каждой из экспедиций).

Серии проведенных численных экспериментов показали, что специалист в области океанологии, морской биологии, экологии и т. д., имеющий сборку операционной системы Ubuntu (авторы осуществляли практическую часть работы на ее базе) с подготовленными средствами компиляции и запуска модели, а также визуализации и анализа результатов, может эффективно применять MITgcm для моделирования пространственно-временной изменчивости температуры водных масс, в том числе в случае отсутствия высокопроизводительной компьютерной техники.

Благодарности

Авторы выражают признательность Н. В. Колдунову (PhD, Climate Service Center, Гамбург, Германия) за ценные советы и предоставление примеров конфигураций модели MITgcm для регионального моделирования.

Библиографический список

1. Колдунов Н. В. Компиляция и настройка MITgcm // Записки океанолога – обработка и визуализация данных. URL: <http://koldunov.net>.
2. Колдунов А. В., Колдунов Н. В., Белоненко Т. В. Применение спутниковых данных для валидации гидродинамической модели Северного Ледовитого океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 6. С. 111–124.
3. Матишов Д. Г., Ильин Г. В., Моисеев Д. В. Сезонная термohалинная изменчивость водных масс в Таганрогском заливе Азовского моря // Вестник Южного научного центра РАН. 2007. Т. 3, № 1. С. 28–35.
4. Сухинов А. И., Чистяков А. Е., Алексеенко Е. В. Численная реализация трехмерной модели гидродинамики для мелководных водоемов на супервычислительной системе // Математическое моделирование. 2011. Т. 23, № 3. С. 3–21.
5. Атлас климатических изменений в больших морских экосистемах Северного полушария (1878–2013). Регион 1. Моря Восточной Арктики. Регион 2. Черное, Азовское и Каспийское моря / Г. Г. Матишов, С. В. Бердников, А. П. Жичкин [и др.]. Ростов н/Д : ЮНЦ РАН, 2014. 256 с.
6. Моисеев Д. В., Духно Г. Н. Верификация температуры поверхности моря по данным дистанционного зондирования Земли и *in situ* для Карского моря // Арктическое морское природопользование в XXI веке – современный баланс научных традиций и инноваций (к 80-летию ММБИ КНЦ РАН) : тезисы докладов Междунар. науч. конф., г. Мурманск, 1–3 апреля 2015 г. / под ред. Г. Г. Матишова. Апатиты : КНЦ РАН, 2015. С. 169–170.
7. Блошкина Е. В., Иванов В. В. Конвективные структуры в Норвежском и Гренландском морях по результатам моделирования с высоким пространственным разрешением // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2016. № 361. С. 146–168.
8. Махотин М. С., Иванов В. В. Распространение атлантических водных масс в Баренцевом море по данным наблюдений и численного моделирования // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2016. № 361. С. 169–191.
9. Экосистемные исследования Азовского, Черного, Каспийского морей и их побережий / под ред. Г. Г. Матишова. Апатиты : КНЦ РАН, 2007. 315 с.

References

1. Koldunov N. V. Kompilyatsiya i nastroyka MITgcm [MITgcm compilation and configuration] // Zapiski okeanologa – obrabotka i vizualizatsiya dannyh. URL: <http://koldunov.net>.
2. Koldunov A. V., Koldunov N. V., Belonenko T. V. Primenenie sputnikovyyh dannyh dlya validatsii gidrodinamicheskoy modeli Severnogo Ledovitogo okeana [Applying satellite data for validation of the hydrodynamic model for the Arctic Ocean] // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2015. V. 12, N 6. P. 111–124.
3. Matishov D. G., Il'in G. V., Moiseev D. V. Sezonnaya termohalinnaya izmenchivost vodnyh mass v Taganrogskom zalive Azovskogo morya [Seasonal thermohaline variability of water mass in the Taganrog Bay of the Azov Sea] // Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN. 2007. V. 3, N 1. P. 28–35.
4. Suhinov A. I., Chistyakov A. E., Alekseenko E. V. Chislennaya realizatsiya trehmernoy modeli gidrodinamiki dlya melkovodnyh vodoemov na supervychislitel'noy sisteme [Numerical realization of three-dimensional model of hydrodynamics for shallow water basins on high-performance system] // Matematicheskoe modelirovanie. 2011. V. 23, N 3. P. 3–21.
5. Atlas klimaticheskikh izmeneniy v bolshih morskikh ekosistemah 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 Northern Hemisphere (1878–2013). Region 1st. Seas of Eastern Arctic. Region 2nd. Black, Azov and Caspian Seas] / G. G. Matishov, S. V. Berdnikov, A. P. Zhichkin [i dr.]. Rostov n/D : YuNTs RAN, 2014. 256 p.

6. Moiseev D. V., Duhno G. N. Verifikatsiya temperatury poverhnosti morya po dannym distantsionnogo zondirovaniya Zemli i *in situ* dlya Karskogo moray [Verification of remote sensing basic products with *in situ* data for the Kara Sea] // Arkticheskoe morskoe prirodopolzovanie v XXI veke – sovremenniy balans nauchnyh traditsiy i innovatsiy (k 80-letiyu MMBI KNTs RAN) : tezisy dokladov Mezhdunar. nauch. konf., g. Murmansk, 1–3 aprelya 2015 g. / pod red. G. G. Matishova. Apatity : KNTs RAN, 2015. P. 169–170.

7. Bloshkina E. V., Ivanov V. V. Konvektivnye struktury v Norvezhskom i Grenlandskom moryah po rezultatom modelirovaniya s vysokim prostranstvennym razresheniem [Convective structures in the Norwegian and the Greenland Seas on results of high spatial resolution modeling] // Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiyskoy Federatsii. 2016. N 361. P. 146–168.

8. Mahotin M. S., Ivanov V. V. Rasprostranenie atlanticheskikh vodnyh mass v Barentsevom more po dannym nablyudeniyy i chislennogo modelirovaniya [Atlantic water masses distribution in the Barents Sea on observed data and numerical modeling] // Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiyskoy Federatsii. 2016. N 361. P. 169–191.

9. Ekosistemnye issledovaniya Azovskogo, Chernogo, Kaspiyskogo morey i ih poberezhnyy [Ecosystems researches for the Azov, Black, Caspian Seas and coasts] / pod red. G. G. Matishova. Apatity : KNTs RAN, 2007. 315 p.

Сведения об авторах

Запорожцев Иван Федорович – ул. Капитана Егорова, 15, г. Мурманск, Россия, 183038; Мурманский арктический государственный университет, канд. техн. наук, ст. преподаватель; Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН, науч. сотрудник; e-mail: zaporozhtsev.if@gmail.com

Zaporozhtsev I. F. – 15, Cap. Erogov Str., Murmansk, Russia, 183038; Murmansk Arctic State University, Cand. of Tech. Sci., Senior Lecturer; Murmansk Marine Biological Institute KSC RAS, Researcher; e-mail: zaporozhtsev.if@gmail.com

Моисеев Денис Витальевич – ул. Владимирская, 17, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН, канд. геогр. наук; зам. директора по науке; Мурманский государственный технический университет, Естественно-технологический институт, кафедра биологии, доцент; e-mail: Denis_Moiseev@mmbi.info

Moiseev D. V. – 17, Vladimirskaaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk Marine Biological Institute KSC RAS, Cand. of Geogr. Sci., Deputy Director on Science; Murmansk State Technical University, Institute of Natural Science and Technology, Department of Biology, Associate Professor; e-mail: Denis_Moiseev@mmbi.info

I. F. Zaporozhtsev, D. V. Moiseev

Simulation of spatio-temporal variability of temperature in the Taganrog Bay with MITgcm model

The goal of the paper is to analyze efficiency of MITgcm in simulation of temperature fields' variability in the Taganrog Bay. Authors are the first to consider hydrodynamic modeling approach based on MITgcm for this bay. *In situ* temperature values to be compared with the model data have been obtained during two Murmansk Marine Biological Institute Kola Scientific Center RAS and Southern Scientific Center RAS coupled expeditions in summer and autumn of 2005. The step of calculation grid is agreed with the step of direct measurements stations grid. The obtained during cruises temperature and salinity data cover the Taganrog Bay with 2' latitude and 3' longitude steps (and with 4' latitude and 6' longitude steps correspondingly for thermohaline homogeneous areas). Depth step is 0.5 m. Data for initialization and atmospheric forcing have been taken from public reanalysis databases and atlases, datasets limitations are discussed. To simplify boundary conditions simulation has been carried out for the whole Azov Sea. Numerical experiments series has been fulfilled to determine the optimal start date of simulation and initial constant temperature field. In view of significant experiment time cost optimization task has been solved for restricted parameters values set and with doubled grid steps (4' latitude and 6' longitude steps). The determined values have been used to solve original task of model data verification with the measured ones. As far as the results obtained by the authors with the particular workstation PC are concerned, the conclusion about possibility of MITgcm simulation in real areas without specialized high-performance computers has been given.

Key words: model MITgcm, Taganrog Bay, Azov Sea, simulation of spatio-temporal variability of temperature, model verification with *in situ* data.