

АРГО-МОДЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЛОБАЛЬНОГО ОКЕАНА: СИНТЕЗ НАБЛЮДЕНИЙ И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

К.В. Лебедев¹

¹*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва,
Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: KLebedev@ocean.ru*

Статья поступила в редакцию 15.11.2017, одобрена к печати 25.12.2017

В статье представлены некоторые результаты расчетов по недавно разработанной в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН Арго–Модели Исследования Глобального Океана (АМИГО), которая состоит из блока вариационной интерполяции на регулярную сетку данных профилирования дрейфующих измерителей Арго и блока модельной гидродинамической адаптации вариационно проинтерполированных полей. Разработанная методика позволяет получать по нерегулярно расположенным данным измерений Арго полный набор океанографических характеристик: температуру, соленость, плотность и скорость течений. Выполненные расчеты представлены ежемесячными, сезонными, годовыми и среднеклиматическими полями на одноградусной сетке и охватывают 10-летний период с 2005 по 2014 гг.

Ключевые слова: океан, моделирование, климат, циркуляция, течения, переносы, Арго.

Введение

Наступление в конце XX века эры спутниковых наблюдений за поверхностью океана и развитие в первые годы XXI века проекта Argo, направленного на сбор с использованием спутников информации о толще океана, дает уникальные возможности непрерывного мониторинга состояния Мирового океана. Целью проекта Argo является создание и поддержание постоянно действующей глобальной сети океанографических станций на основе дрейфующих буев-измерителей. Работа измерителей происходит по следующей схеме. Буй дрейфует около 10 суток на заданной глубине, затем опускается на горизонт 2000 м и всплывает на поверхность, измеряя температуру и соленость. В течение 6–12 часов прибор находится на поверхности, данные передаются на спутники, которые определяют точное местоположение прибора. После этого буй опускается на глубину дрейфа, и цикл повторяется. Энергии батарей хватает на 3–4 года работы. Кроме измерений температуры и солености такие дрейфующие буи позволяют также получать данные о течениях на глубине дрейфа и на поверхности океана (Lebedev et al., 2007).

С 2005 г. измерения с помощью поплавков Арго стали вести на большей части акватории Мирового океана. Заявленного при разработке программы Argo уровня покрытия в 3000 одновременно работающих поплавков (в среднем 1 поплавок на трехградусный “квадрат”) удалось достичь в ноябре 2007 г. Сейчас около 4000 измерителей Арго осуществляют автономное зондирование верхней двухкиломе-

тровой толщи океана от Антарктики до Шпицбергена с 10-дневным интервалом, ежемесячно пополняя базу данных по температуре и солёности Мирового океана на 10–12 тыс. полноценных профилей. Постоянно пополняющиеся массивы измерений позволяют решать задачи реконструкции и мониторинга состояния океана в режиме, близком к реальному времени, и исследовать особенности океанской динамики и ее изменчивости (Sasaki et al., 2010). Количество профилей, накопленных в рамках программы Арго за период с 2001 по 2015 гг., превысило 1 млн. Это позволяет получить разумные оценки климатического состояния Мирового океана для последнего десятилетия и дать оценку текущим внутриклиматическим трендам.

В настоящей статье приведены примеры расчетов, сделанных с использованием Арго-Модели Исследования Глобального Океана (АМИГО), и представлены результаты ведущихся в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН) работ по созданию новых, ориентированных на конечных пользователей массивов АМИГО, основанных на измерениях Арго (Argo, 2000) и данных спутниковой альтиметрии, которые используются для контроля решения при выборе параметров модели. Массивы АМИГО обеспечат научное сообщество оперативным доступом к глобальным унифицированным базам данных, полученным по измеренным профилям и траекториям поплавков Арго с привлечением дополнительных данных, сделанных с помощью спутников. Главной отличительной особенностью представленной методики является использование при обработке профилей Арго метода вариационной интерполяции измерений на регулярную сетку с последующей модельной гидродинамической адаптацией полученных полей. Такая методика позволяет получать по данным профилирования Арго полный набор океанографических характеристик: температуру, солёность, плотность и скорость течений. Выполненные расчеты (Лебедев, 2016) охватывают 10-летний период с 2005 по 2014 гг. и представлены ежемесячными, сезонными, годовыми и среднеклиматическими полями. База данных АМИГО находится в свободном доступе в сети Интернет на официальном сервере ИО РАН по адресу <http://argo.ocean.ru/>. Пространственное разрешение данных в базе составляет 1 градус по долготе и широте, временное – 1 месяц.

Методика

Интерполяция на регулярную одноградусную сетку полей температуры и солёности по данным профилей Арго была выполнена методом вариационной интерполяции, который минимизирует отклонение рассчитанных в узлах регулярной сетки полей от нерегулярно расположенных измерений таким образом, что полученное оптимальное решение проходит максимально близко к данным измерений. Такая методика успешно применялась в более ранних работах с участием автора (Lebedev et al., 2010; Курносова, Лебедев, 2014). Математически задача описывается следующим образом (Лебедев, 2016):

$$F = \sum_{n \in L} (A_{g-d}^n - A_d^n)^2 + C_1 \sum_{i,j} (A_g^{i,j} - A_c^{i,j})^2 + C_2 \sum_{i,j} ((dX^j)^2 \Delta A_g^{i,j})^2,$$

где F – функционал, который требуется минимизировать, $A_g^{i,j}$ – значения переменной A (температура или соленость) в узлах регулярной сетки, A_d^n – нерегулярно расположенные данные измерений, A_{g-d}^n – линейная интерполяция в точку измерения A_d^n – значений переменной A_g из четырех окрестных узлов регулярной сетки, $A_c^{i,j}$ – климатические данные в узлах регулярной сетки, Δ – пятиточечный разностный аналог оператора Лапласа с граничными условиями в виде отсутствия потоков через боковые границы, dX^j – расстояние между узлами сетки в зональном направлении, C_1 и C_2 – весовые коэффициенты, L – временной интервал (месяц, сезон, год и т.п.).

Значения переменной $A_g^{i,j}$ в узлах регулярной сетки, полученные в результате минимизации функционала F , будут зависеть от коэффициента C_1 , определяющего влияние на результирующее поле климатических данных, и коэффициента C_2 , контролирующего уровень сглаживания получаемого решения. Коэффициент C_1 выбирается достаточно малым, чтобы минимизировать влияние климатических данных на те области, где имеются измерения. Для сглаживающего коэффициента C_2 в операторе Лапласа выбирается минимальное значение, при котором происходит подавление шума. Окончательные значения коэффициентов уточнялись по результатам модельных адаптационных расчетов, методика проведения которых описана ниже. Полученные в результате таких расчетов поля уровня океана (рис. 1а) сравнивались с данными спутниковой альтиметрии Aviso (Ducet, Le Traon, Reverdin, 2000) для соответствующего периода (рис. 1б). По результатам численных экспериментов в качестве коэффициента C_1 было выбрано значение 0.3.

Значения коэффициента C_2 при расчете «климатических» полей температуры и солености по данным Арго 2005–2014 гг. для месяцев, сезонов и года бралось равным 2/3. При этом в качестве климатических полей A_c использовались данные климатических массивов World Ocean Atlas 2009 (WOA09) (Antonov et al., 2010; Locarnini et al., 2010). Всего таким образом было получено 17 полей (12 месяцев, 4 сезона и средний год). Зимний сезон представлен данными января, февраля и марта, весенний – апреля, мая и июня, летний – июля, августа и сентября, осенний – октября, ноября и декабря.

Значения коэффициента C_2 при расчете полей температуры и солености для индивидуальных месяцев, сезонов и годов 10-летнего периода с 2005 по 2014 гг. (всего 170 полей) бралось равным 2. В этих расчетах в качестве климатических полей A_c для года и сезонов вместо массивов WOA09 использовались соответствующие «климатические» поля Арго, полученные на предыдущем шаге. При расчете по данным Арго климатических полей A_c для месяцев дополнительно привлекалась информация предыдущего и последующего месяцев (для расчета «климатического» января использовались данные Арго за декабрь, январь и февраль, февраля – за январь, февраль и март и т.д.).

На заключительном этапе работы с использованием модели общей циркуляции океана в режиме диагноза и гидродинамической адаптации (Иванов, Лебедев, Саркисян, 1997; Лебедев, 1999) были выполнены расчеты гидродинамически сба-

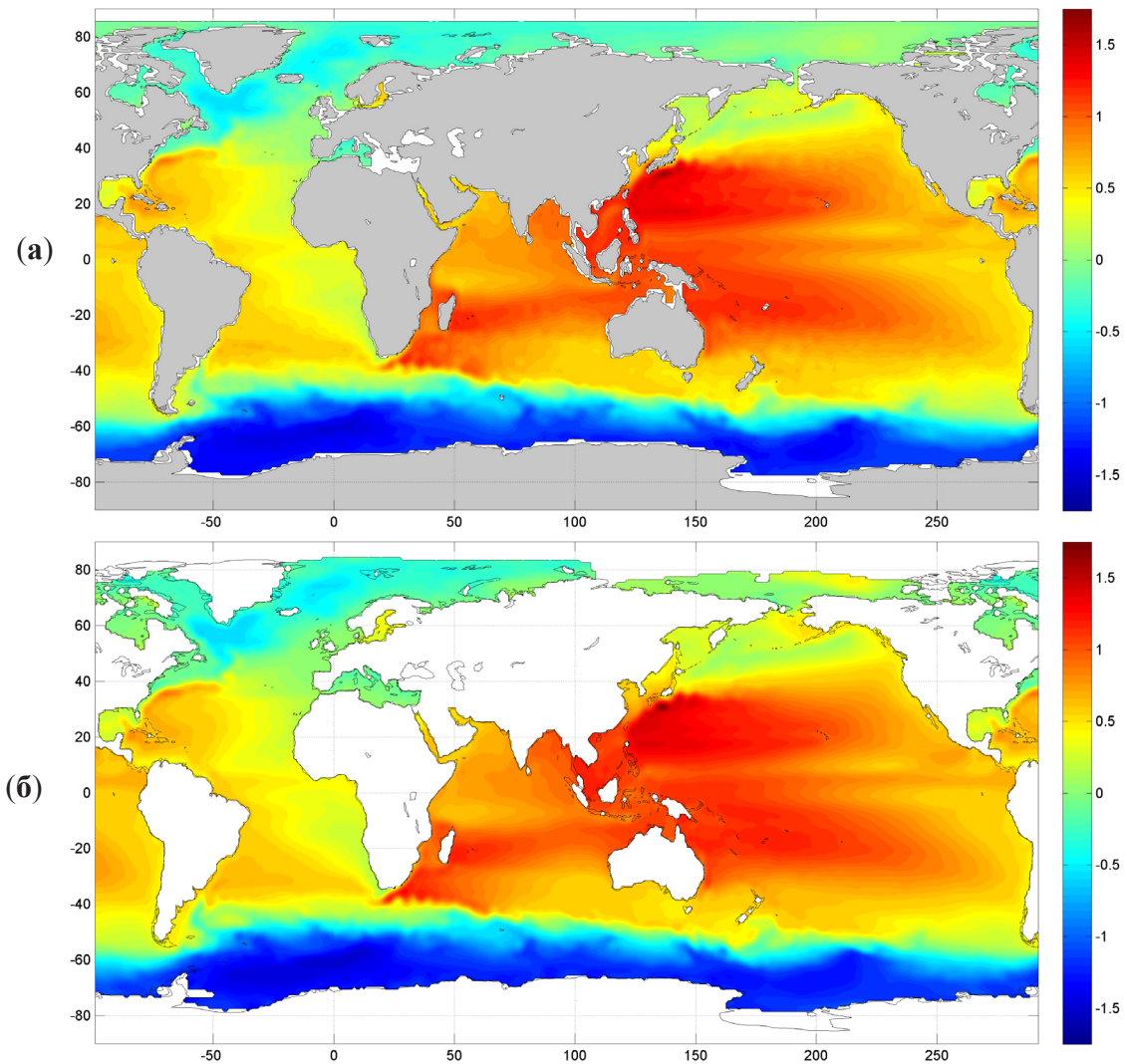


Рис. 1. Среднегодовое поле динамического уровня Мирового океана (м) по данным расчетов АМИГО (а) и по данным спутниковой альтиметрии Aviso (б) за 2005–2014 гг.

лансированных полей температуры, солёности и скорости течений по данным поплавок Арго. Расчеты проводились для акватории Мирового океана, ограниченной на севере 85.5° с.ш. на сетке с шагом 1° по долготе и широте, на 32 горизонтах, соответствующих горизонтам массивов WOA09; максимальная глубина океана составляла 5750 м. На глубинах, превышающих 2000 м, где отсутствуют измерения Арго, значения температуры и солёности брались из массивов WOA09. В качестве граничных условий на поверхности океана задавались постоянные значения температуры и солёности, полученные по данным Арго для соответствующего месяца (года, сезона) с использованием описанной выше вариационной методики. Тангенциальное напряжение трения ветра для соответствующего месяца (года, сезона) задавалось по данным реанализа ECMWF ERA-Interim (Dee et al., 2011).

Для корректного описания водообмена при использовании одноградусной модельной сетки была проведена корректировка рельефа дна для ряда ключевых районов Мирового океана (Флоридский пролив, западная граница Гольфстрима,

пролив Нэрса, Берингов пролив, район течения Куроисио, Индонезийские проливы и другие). В результате такой корректировки также удалось устранить многие несоответствия измеренных полей плотности модельному одноградусному рельефу дна, что привело к устойчивому поведению решения при коэффициенте бокового турбулентного обмена импульсом равным 7×10^6 см²/с. Коэффициенты горизонтального турбулентного обмена теплом и солью также задавались как 7×10^6 см²/с. Вертикальный коэффициент турбулентного обмена брался равными 10 см²/с для импульса и 1 см²/с для тепла и соли. В экваториальных областях, начиная с 20° северной и южной широт, коэффициент бокового обмена импульсом плавно увеличивается, достигая величины 2×10^8 см²/с на экваторе. Суммарная адаптация экваториальной области Тихого океана продолжалась 86 суток, экваториальных областей Атлантического и Индийского океанов – 52 суток, внеэкваториальных областей Мирового океана – 12 суток. В результате расчетов по модели получаются адаптированные поля (месячные, сезонные и годовые) температуры, солёности, плотности и течений Мирового океана на одноградусной сетке, полученные с использованием данных Арго.

Выполненные расчеты охватывают 10-летний период с 2005 по 2014 гг. и представлены ежемесячными (120 полей), сезонными (40 полей), годовыми (10 полей), а также среднеклиматическими для 2005–2014 гг. данными (17 полей, включающие среднеклиматический год, сезоны и месяцы) с пространственным разрешением 1 градус по долготе и широте (Лебедев, 2016). Сравнение результатов модельных расчетов с данными дрейфтеров показало, что поля температуры и солёности, полученные по нерегулярно расположенным данным измерений Арго с использованием вариационной методики интерполяции данных на регулярную сетку, восстанавливают реалистичные поля течений (Лебедев, Саркисян, Никитин, 2016; Саркисян, Никитин, Лебедев, 2016). Использование данных поверхностной солёности, полученных с использованием указанной методики, приводит к лучшему воспроизведению в моделях общей циркуляции океана межгодовой изменчивости глубины верхнего перемешанного слоя, изменчивости солёности в нижележащих слоях, а также к воспроизведению так называемых «барьерных слоев» (Figue et al., 2018). База данных АМИГО находится в свободном доступе в сети Интернет на официальном сервере ИО РАН по адресу <http://argo.ocean.ru/>.

Основные результаты

Важной динамической характеристикой океана является уровень, изолинии которого достаточно близко воспроизводят линии тока геострофической составляющей течений в верхнем слое океана. На рис. 1 представлены карты динамического уровня Мирового океана, полученные в результате модельных расчетов с использованием данных измерений Арго за период 2005–2014 гг. (рис. 1а), и рассчитанные путем осреднения данных спутниковой альтиметрии Aviso (Ducet, Le Traon, Reverdin, 2000) за этот же период времени (рис. 1б). Хорошо видны основные эле-

менты крупномасштабной океанской циркуляции: антициклонические и циклонические круговороты, экваториальные течения Тихого и Атлантического океанов, Антарктическое циркумполярное течение (АЦТ). Сравнение карт модельного (рис. 1а) и измеренного со спутников (рис. 1б) уровня показывает их хорошее соответствие друг другу.

На рис. 2 представлены рассчитанные по среднемесячным данным АМИГО графики изменчивости расходов в ряде ключевых проливов Мирового океана, где, как указывалось выше, для корректного описания водообмена при проведении модельных расчетов на одноградусной сетке была проведена корректировка рельефа дна. Средний за 2005–2014 гг. расход через Берингов пролив (рис. 2а) в результате такой коррекции получился равным $0,63 \pm 0,57$ Св, что находится в хорошем соответствии с общепринятой оценкой 0,83 Св, полученной по данными многолетних прямых измерений (Roach et al., 1995). Изменчивость переноса из Северного Ледовитого в Атлантический океан через проливы Канадского архипелага, которые в модели представлены проливом Нэрса, добавленным в скорректированный одноградусный рельеф дна, проиллюстрирована данными переноса в проливе Дейвиса, соединяющего море Баффина с морем Лабрадор. Средний за 2005–2014 гг. расход через Дейвисов пролив (рис. 2б) получился в результате описанной выше коррекции рельефа дна равным $1,46 \pm 0,29$ Св, что хорошо согласуется с известной из литературы оценкой $1,6 \pm 0,5$ Св, полученной по данными прямых измерений 2004–2010 гг. (Curry et al., 2014). Несмотря на достаточно грубое разрешение Средиземного

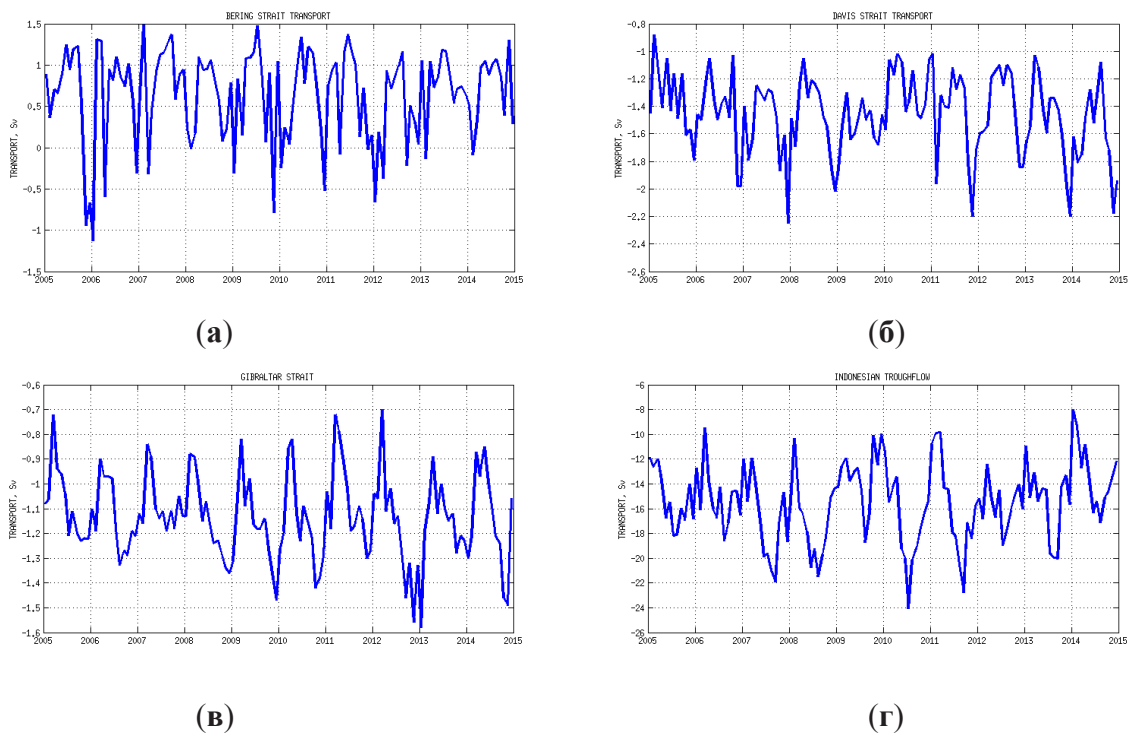


Рис. 2. Изменчивость среднемесячного расхода (Св) в Беринговом проливе (а), в проливе Дейвиса (б), придонного течения в Гибралтарском проливе (в), в Индонезийских проливах (г) для периода 2005–2014 гг.

моря, удалось получить разумные значения расхода средиземноморских вод (СМВ) в придонном течении Гибралтарского пролива (рис. 2в), который оказался равным $1,1 \pm 0,2$ Св, что не сильно отличается от известных оценок $0,68–0,78$ Св, основанных по данным прямых измерений (Bryden, Candela, Kinder, 1994; Soto-Navarro et al., 2010). Средний расход через Индонезийские проливы (рис. 2г), характеризующий водообмен Тихого и Индийского океанов, получился равным $15,4 \pm 3$ Св, практически не отличаясь от оценки 15 Св, основанной на результатах проводившихся в 2004–2006 гг. прямых измерений (Sprintall et al., 2009).

На рис. 3 представлены карты средней температуры Мирового океана на горизонте 75 м для летнего (рис. 3а) и зимнего (рис. 3б) сезонов северного полушария. На картах хорошо видны антициклонические субтропические круговороты Тихого и Атлантического океанов. Круговороты асимметричны, центры круговоротов значительно сдвинуты к западу, что определяется западной интенсификацией тече-

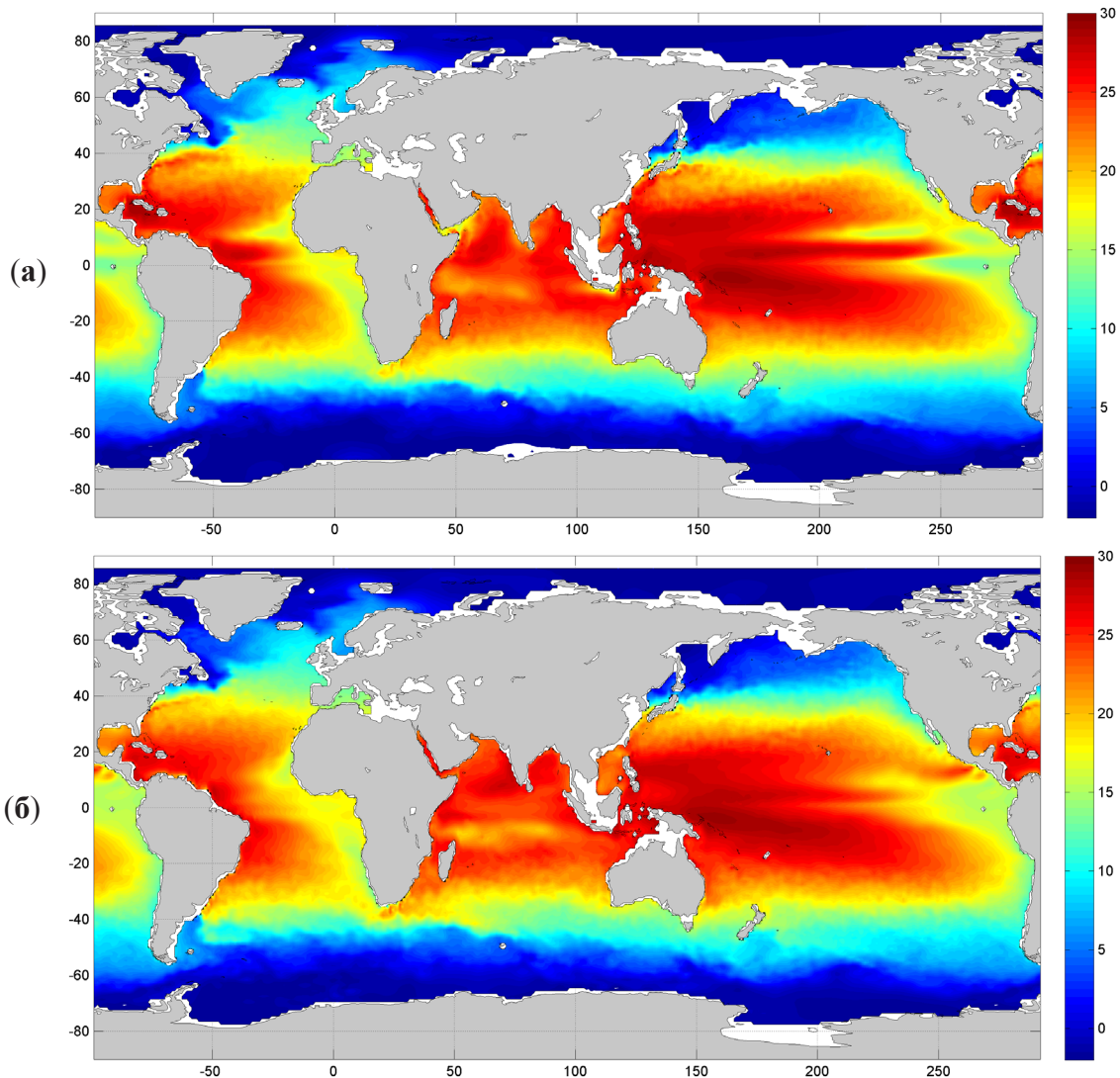


Рис. 3. Среднегодовое поле температуры Мирового океана на горизонте 75 м для летнего (а) и зимнего (б) сезонов северного полушария по данным АМИГО.

ний. Распределение температуры носит в основном зональный характер, заметные в восточных частях океанов отклонения от зонального распределения обусловлены течениями. Существенное отклонение изотерм от зонального распределения, наблюдаемое в северной части Атлантического океана, вызвано переносом на север теплых вод Северо-Атлантического течения (САТ) и поступлением холодных вод из моря Лабрадор. Различия летнего (рис. 3а) и зимнего (рис. 3б) полей температуры хорошо заметны в северном полушарии в районе западных пограничных течений и на северных границах антициклонических круговоротов. Заметный рост температуры летом северного полушария наблюдается в экваториальных областях Тихого и Атлантического океанов. В южном полушарии можно отметить заметное падение зимой южного полушария температуры в районе недалеко от мыса Доброй Надежды, где происходит разворот течения мыса Игольного в восточном направлении.

На рис. 4 приведены карты среднегодовой температуры и солености Мирового океана на горизонте 200 м. В распределении температуры (рис. 4а) хорошо

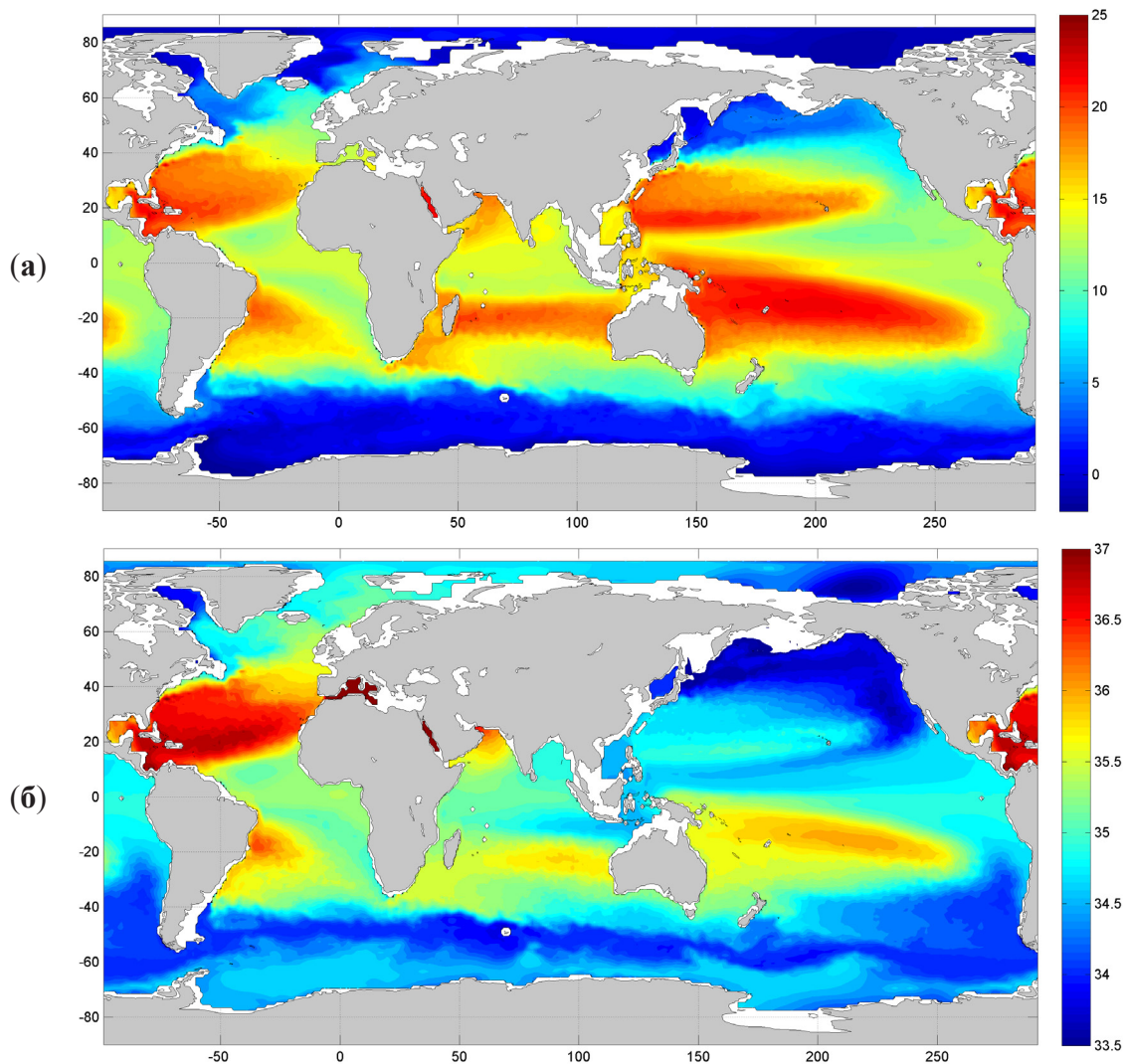


Рис. 4. Среднегодовое поле температуры (а) и солености (б) Мирового океана на горизонте 200 м по данным АМИГО.

видны субтропические антициклонические круговороты, имеющие в разных океанах близкие значения температуры в центральных областях. Значения солёности в центрах субтропических круговоротов, напротив, существенно различаются от океана к океану (рис. 4б). Относительно низкая солёность северной части Тихого океана является следствием преобладания осадков над испарением. Высокая солёность вод тропической и субтропической Атлантики и Средиземного моря связана с осолонением поверхностных вод, вызванным интенсивным испарением в этих районах. На распределение солёности, кроме потоков влаги с поверхности и процессов перемешивания, существенное влияние оказывает циркуляция вод. В южной части океанов отчетливо выражено Антарктическое циркумполярное течение, положение которого хорошо прослеживается по минимуму солёности. В восточной части Индийского океана немного южнее экватора отчетливо виден язык пониженной солёности, сформировавшийся в результате поступления через Индонезийские проливы вод Тихого океана. Повышенная солёность на севере Атлантического океана связана с распространением теплых и соленых вод Гольфстрима различными ветвями САТ. Часть этих вод поступает затем через Фареро-Шетландский пролив в Арктический бассейн, давая начало Норвежскому течению, другая часть поворачивает на запад к Исландии, формируя течение Ирмингера.

Главной особенностью карт среднегодовой температуры и солёности на горизонте 700 м (рис. 5) является хорошо заметный язык теплых и соленых вод, сформировавшийся в результате переноса СМВ направленным в Атлантический океан придонным течением в Гибралтарском проливе (Филюшкин, Лебедев, Кожелупова, 2017). Сходные по величине высокие значения температуры и солёности на западе Северной Атлантики связаны с опусканием теплых высокосолёных поверхностных вод в субтропическом антициклоническом круговороте. Течение Курошио, в отличие от ярко выраженного Гольфстрима, на глубине 700 м сильно ослаблено, выделяется только в поле температуры (рис. 5а), отсутствуя на карте солёности (рис. 5б). В Индийском океане воды повышенной температуры и солёности наблюдаются в районе Красного моря и Персидского залива. Повышенные значения температуры и солёности в юго-западной части Индийского океана связаны с опусканием поверхностных вод в субтропическом антициклоническом круговороте.

Анализ представленных на рис. 6 карт среднегодовой температуры и солёности Мирового океана на горизонте 1000 м и их сравнение с картами для горизонта 700 м (рис. 5) показывают, что влияние теплых и соленых вод Флоридского течения и Гольфстрима на формирование термохалинных характеристик Северной Атлантики заметно ослабевает с глубиной; в Тихом океане следы течения Курошио в поле температуры становятся едва различимыми (рис. 6а) и полностью отсутствуют в поле солёности (рис. 6б). Воды повышенной температуры и солёности в северо-за-

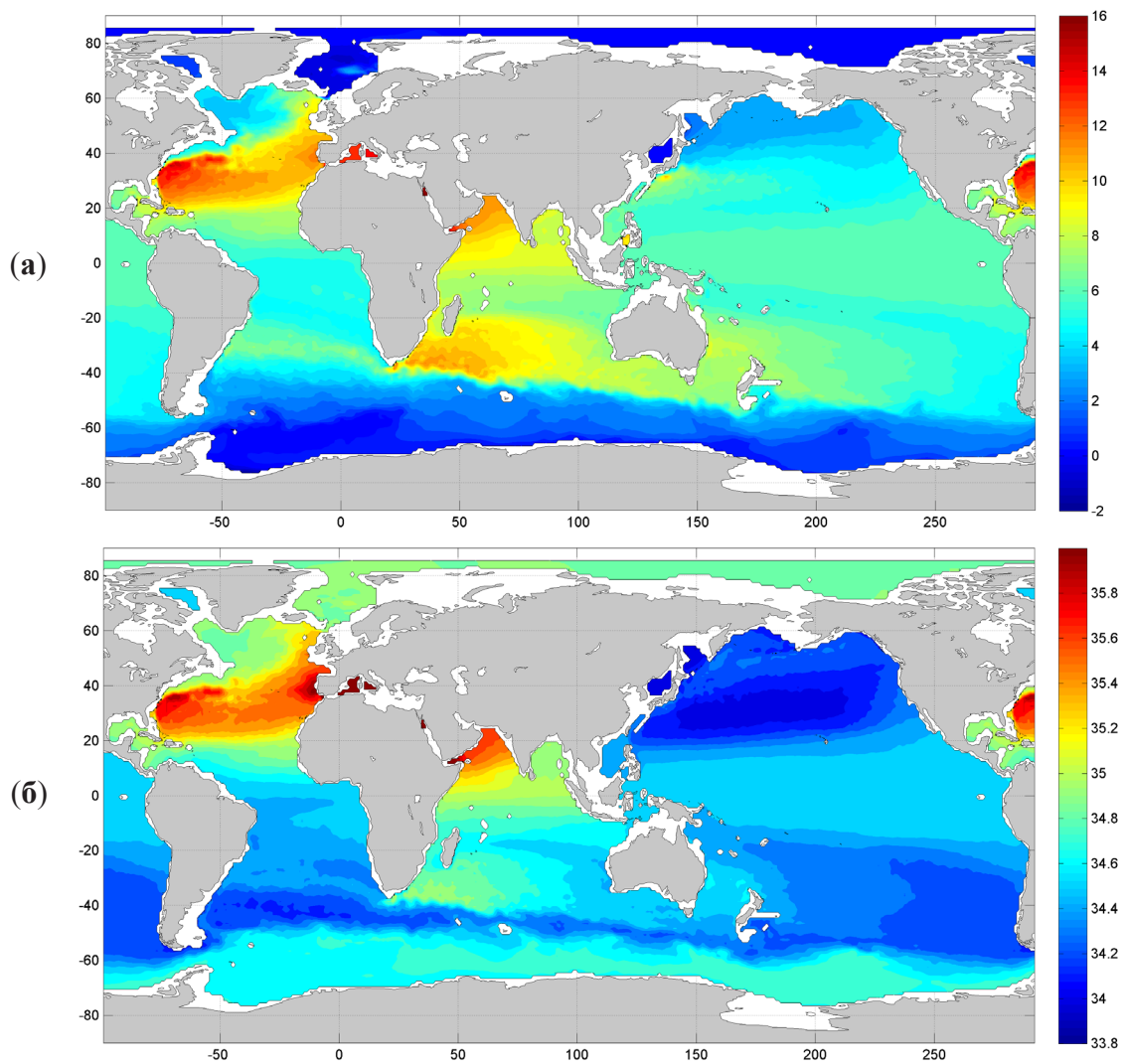


Рис. 5. Среднегодовое поле температуры (а) и солёности (б) Мирового океана на горизонте 700 м по данным АМИГО.

падной части Индийского океана, формирующиеся в районе Красного моря и Персидского залива, начинают уступать по величинам максимальных значений характеристик водам Северной Атлантики, сформировавшимся в районе Гибралтарского пролива. Интенсивность южного субтропического круговорота Индийского океана и температура в его центре близки величинам, наблюдающимся в субтропическом круговороте Северной Атлантики. При этом солёность в центре южного субтропического круговорота Индийского океана, в отличие от Северной Атлантики, оказывается близкой к фоновым значениям. Повышенная солёность, наблюдаемая на западе Северной Атлантики, объясняется распространением вплоть до Саргасова моря языка СМВ на этих глубинах (Филюшкин, Лебедев, Кожелупова, 2017).

Карты температуры и солёности для горизонта 2000 м, последнего из доступных по данным измерений Арго, показаны на рис. 7. На картах хорошо видно, что

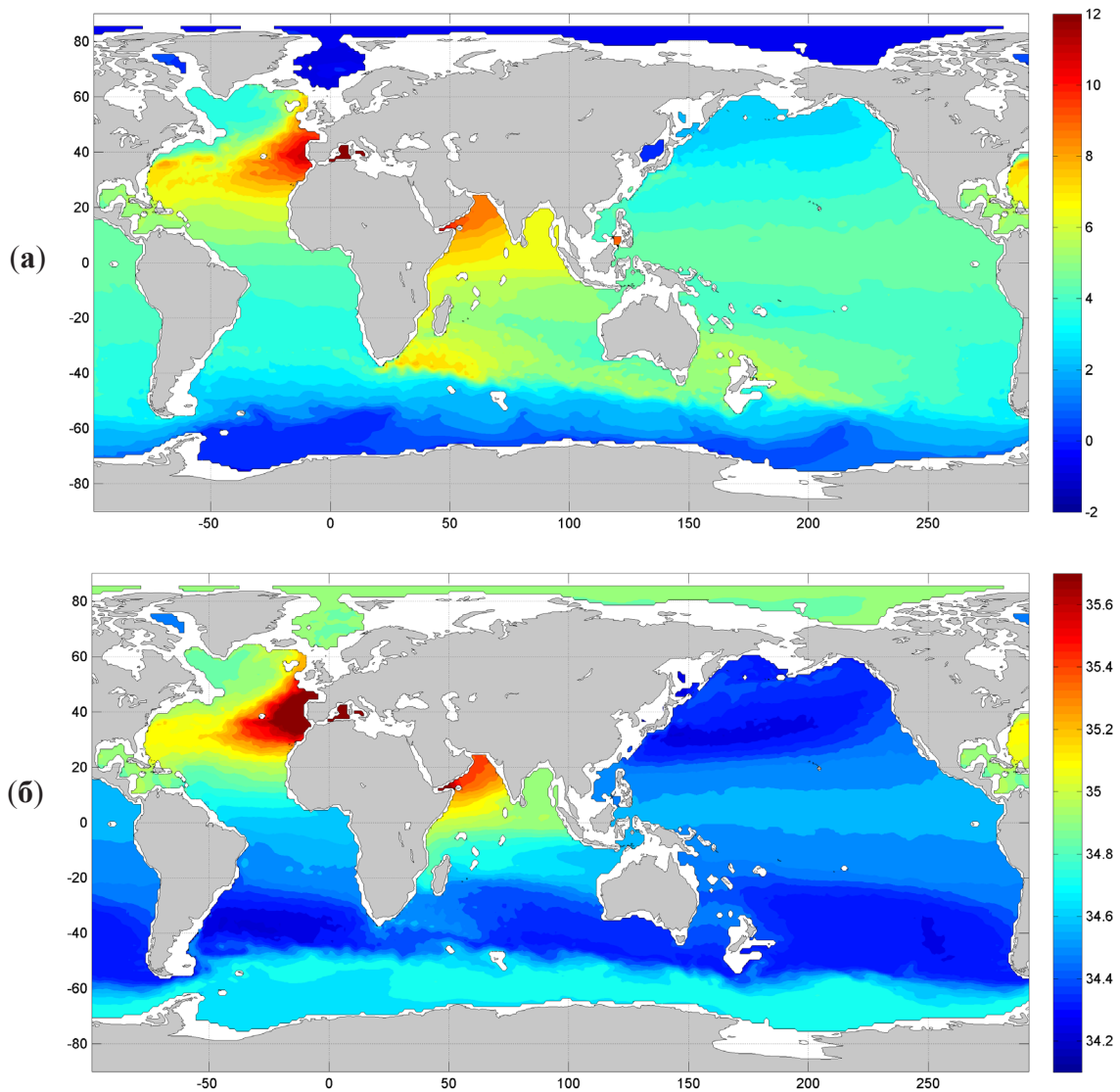


Рис. 6. Среднегодовое поле температуры (а) и солёности (б) Мирового океана на горизонте 1000 м по данным АМИГО.

ореол распространения вод повышенной температуры (рис. 7а) и солёности (рис. 7б), сформировавшихся в Атлантическом океане под влиянием СМВ, расширяется до экваториальной области южного полушария. Воды повышенной солёности распространяются далее на юг вдоль побережья Южной Америки и частично попадают в АЦТ, где их затухающий по мере распространения течения на восток след, хорошо заметный на протяжении всего циркумполярного кольца, начинает исчезать лишь при приближении к проливу Дрейка (рис. 7б). Воды повышенной температуры и солёности в северо-западной и юго-западной частях Индийского океана на глубине 2000 м выражены заметно слабее, чем на вышележащих горизонтах. Тихий океан на глубине 2000 м выглядит практически однородным как по температуре, так и по солёности.

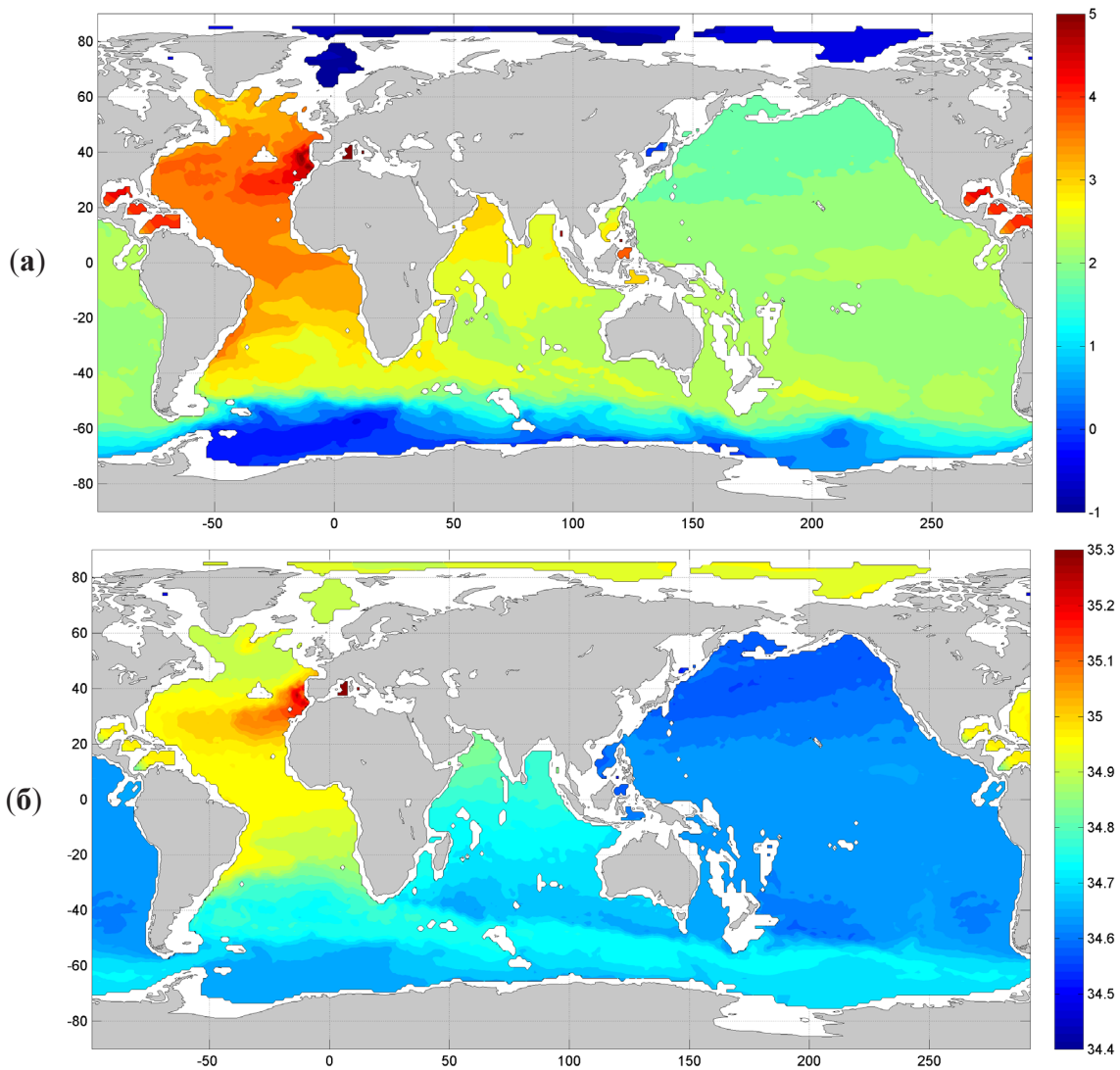


Рис. 7. Среднегодовое поле температуры (а) и солёности (б) Мирового океана на горизонте 2000 м по данным АМИГО.

Заключение

В статье представлены результаты расчетов по разработанной в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН Арго-Модели Исследования Глобального Океана (АМИГО), которая состоит из блока вариационной интерполяции на регулярную сетку данных профилирования дрейфующих измерителей Арго и блока модельной гидродинамической адаптации вариационно проинтерполированных полей. Разработанная методика позволяет получать по нерегулярно расположенным данным измерений Арго полный набор океанографических характеристик: температуру, солёность, плотность и скорость течений. Выполненные расчеты представ-

лены ежемесячными, сезонными, годовыми и среднеклиматическими полями на одноградусной сетке и охватывают 10-летний период с 2005 по 2014 гг. Пространственное разрешение данных в базе составляет 1 градус по долготе и широте, временное – 1 месяц.

Использование Арго-модели АМИГО позволило, с одной стороны, систематизировать случайные наблюдения свободно дрейфующих поплавков Арго с помощью вариационной методики интерполяции наблюдений на регулярную одноградусную сетку, а, с другой стороны, на этой основе произвести сложные расчеты изменчивости расходов и переносов тепла и соли течениями при крупномасштабном водообмене.

В результате расчетов по Арго-модели получились следующие средние значения межокеанского водообмена: перенос из Тихого океана в Индийский составил $15,4 \pm 3$ Св, водообмен Тихого океана с Арктикой – $0,63 \pm 0,57$ Св. Полученные величины хорошо согласуются с известными оценками, полученными на основании прямых многолетних измерений.

В работе показано, что Арго-модель, несмотря на одноградусное разрешение, корректно описывает поступление арктической воды в море Лабрадор через Девисов пролив ($1,46 \pm 0,29$ Св) и средиземноморских вод в Атлантический океан через Гибралтарский пролив ($1,1 \pm 0,2$ Св). Полученные величины средних расходов в проливах Дейвиса и Гибралтар получились достаточно близкими измеренным среднемноголетним значениям.

Арго-модель позволила получить на основе данных измерений Арго достоверную картину распространения средиземноморских вод в Атлантическом океане на различных глубинах вплоть до горизонта 2000 м. Показана важная роль средиземноморских вод как основного источника тепла и соли на промежуточных глубинах Атлантического океана.

Выполненные расчеты показали, что предложенная методика модельных расчетов океанографических характеристик Мирового океана с использованием данных Арго позволяет существенно улучшить существующие климатические поля температуры и солёности.

Результаты выполненных расчетов, примеры которых приведены в статье, смогут служить основой для изучения и анализа текущего состояния климата Мирового океана и выделения внутриклиматических трендов последнего десятилетия.

Благодарности

Данные Арго были собраны и выложены в свободный доступ международной программой Argo при участии национальных программ (<http://www.argo.ucsd.edu>, <http://argo.jcommops.org>). Программа Argo является частью Глобальной инструментальной системы наблюдений за состоянием океана. Альтиметрическая информация подготовлена при помощи системы обработки

спутниковой альтиметрии Ssalto/Duacs и распространяется через Aviso при поддержке CNES (<http://www.aviso.altimetry.fr/duacs/>).

Работы по систематизации данных АМИГО выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ для научных организаций № 14-50-00095, анализ характеристик Южного океана поддержан грантом РНФ № 16-17-10149. База данных АМИГО находится в свободном доступе на сервере ИО РАН по адресу <http://argo.ocean.ru/>.

Литература

- Иванов Ю.А., Лебедев К.В., Саркисян А.С. Обобщенный метод гидродинамической адаптации (ОМЕГА) // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1997. Т. 33. № 6. С. 812–818.
- Курносова М.О., Лебедев К.В. Исследование изменчивости переносов в системе Куроисио на 35° с.ш., 147° в.д. по данным поплавков Argo и спутниковой альтиметрии // Докл. АН. 2014. Т. 458. № 2. С. 225–228.
- Лебедев К.В. Среднегодовой климат океана. 2. Интегральные характеристики климата Мирового океана (переносы массы, тепла, солей) // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1999. Т. 35. № 1. С. 96–106.
- Лебедев К.В. Арго-Модель Исследования Глобального Океана (АМИГО) // Океанология. 2016. Т. 56. № 2. С. 186–196.
- Лебедев К.В., Саркисян А.С., Никитин О.П. Сравнительный анализ поверхностной циркуляции Северной Атлантики, воспроизведенной тремя различными методами // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2016. Т. 52. № 4. С. 465–474.
- Саркисян А.С., Никитин О.П., Лебедев К.В. Физические характеристики Гольфстрима как индикатор качества моделирования циркуляции Мирового океана // . . . 2016. Т. 471. № 5. С. 595–598.
- Филлюшкин Б.Н., Лебедев К.В., Кожелупова Н.Г. Обнаружение промежуточных средиземноморских вод в Атлантическом океане по наблюдениям поплавков Argo // Океанология. 2017. Т. 57. № 6. С. 847–857.
- Antonov J.I., Seidov D., Boyer T.P., Locarnini R.A., Mishonov A.V., Garcia H.E., Baranova O.K., Zweng M.M., Johnson D.R. World Ocean Atlas 2009, Volume 2: Salinity // S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 69, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 2010. 184 p.
- Argo. Argo float data and metadata from Global Data Assembly Center (Argo GDAC) // SEANOE. 2000. <http://doi.org/10.17882/42182>.
- Bryden H.L., Candela J., Kinder T.H. Exchange through the Strait of Gibraltar // Prog. Oceanogr. 1994. Vol. 33. P. 201–248.
- Curry B., Lee C.M., Petrie B., Moritz R.E., Kwok R. Multiyear Volume, Liquid Freshwater, and Sea Ice Transports through Davis Strait, 2004–10 // J. Phys. Oceanogr. 2014. Vol. 44. No. 4. P. 1244–1266.
- Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen I., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // Quart. J. R. Meteorol. Soc. 2011. Vol. 137. P. 553–597.

- Ducet N., Le Traon P.Y., Reverdin G.* Global high-resolution mapping of ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and -2 // *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105. No. C8. P. 19477–19498.
- Furue R., Takatama K., Sasaki H., Schneider N., Nonaka M., Taguchi B.* Impacts of sea-surface salinity in an eddy-resolving semi-global OGCM // *Ocean Modelling.* 2018. Vol. 122. P. 36–56. doi:10.1016/j.ocemod. 2017.11.004.
- Lebedev K.V., DeCarlo S., Hacker P.W., Maximenko N.A., Potemra J.T., Shen Y.* Argo Products at the Asia-Pacific Data-Research Center // *Eos Trans. AGU.* 2010. Vol. 91. No. 26. Ocean Sci. Meet. Suppl., Abstract IT25A-01.
- Lebedev K.V., Yoshinari H., Maximenko N.A., Hacker P.W.* YoMaHa'07: Velocity data assessed from trajectories of Argo floats at parking level and at the sea surface // *IPRC Technical Note.* 2007. No. 4(2). 16 p.
- Locarnini R.A., Mishonov A.V., Antonov J.I., Boyer T.P., Garcia H.E., Baranova O.K., Zweng M.M., Johnson D.R.* World Ocean Atlas 2009, Volume 1: Temperature // S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 68, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 2010. 184 p.
- Roach A.T., Aagaard K., Pease C.H., Salo S.A., Weingartner T., Pavlov V., Kulakov M.* Direct measurements of transport and water properties through the Bering Strait // *J. Geophys. Res.* 1995. Vol. 100, N C9. P. 18443–18457.
- Sasaki Y.N., Schneider N., Maximenko N., Lebedev K.* Observational evidence for propagation of decadal spiciness anomalies in the North Pacific // *Geophys. Res. Lett.* 2010. Vol. 37. L07708, doi:10.1029/2010GL042716.
- Soto-Navarro J., Criado-Aldeanueva F., García-Lafuente J., Sánchez-Román A.* Estimation of the Atlantic inflow through the Strait of Gibraltar from climatological and in situ data // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. C10023. doi:10.1029/2010JC006302.
- Sprintall J., Wijffels S.E., Molcard R., Jaya I.* Direct estimates of the Indonesian Throughflow entering the Indian Ocean: 2004–2006 // *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 144, C07001. doi:10.1029/2008JC005257.

THE ARGO-BASED MODEL FOR INVESTIGATION OF THE GLOBAL OCEAN: A SYNTHESIS OF OBSERVATIONS AND NUMERICAL MODELING

K.V. Lebedev¹

¹*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36, Nakhimovskiy prospect, Moscow, 117997, Russia, e-mail: KLebedev@ocean.ru*

Submitted 15.11.2017, accepted 25.12.2017

We present the newly developed at the Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences Argo-Based Model for Investigation of the Global Ocean (AMIGO), which consists of a block for variational interpolation of the profiles of drifting Argo floats to a regular grid and a block for model hydrodynamic adjustment of variationally interpolated fields. Such a technique makes it possible to obtain a complete set of oceanographic characteristics from irregularly located Argo measurements: temperature, salinity, density, and current velocity. The calculations cover the 10-year period from 2005 to 2014; the data are represented as monthly, seasonal, and annual means and climatological fields with the one degree spatial resolution.

Keywords: ocean, modeling, climate, circulation, ocean currents, transports, Argo floats.

References

- Antonov J.I., Seidov D., Boyer T.P., Locarnini R.A., Mishonov A.V., Garcia H.E., Baranova O.K., Zweng M.M., Johnson D.R., World Ocean Atlas 2009, Volume 2: Salinity, S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 69, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 2010, 184 p.
- Argo. Argo float data and metadata from Global Data Assembly Center (Argo GDAC), *SEANOE*, 2000, <http://doi.org/10.17882/42182>.
- Bryden H.L., Candela J., Kinder T.H., Exchange through the Strait of Gibraltar, *Prog. Oceanogr.*, 1994, Vol. 33, pp. 201–248.
- Curry B., Lee C.M., Petrie B., Moritz R.E., Kwok R., Multiyear Volume, Liquid Freshwater, and Sea Ice Transports through Davis Strait, 2004–10, *J. Phys. Oceanogr.*, 2014, Vol. 44, No. 4, pp. 1244–1266.
- Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen L., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F., The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system, *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 2011, Vol. 137, pp. 553–597.
- Ducet N., Le Traon P.Y., Reverdin G., Global high-resolution mapping of ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and -2, *J. Geophys. Res.*, 2000, Vol. 105, No. C8, pp. 19477–19498.
- Filyushkin B.N., Lebedev K.V., Kozhelupova N.G., Detection of intermediate Mediterranean waters in the Atlantic Ocean by ARGO floats data, *Oceanology*, 2017, Vol. 57, No. 6, pp. 763–771.
- Furue R., Takatama K., Sasaki H., Schneider N., Nonaka M., Taguchi B., Impacts of sea-surface salinity in an eddy-resolving semi-global OGCM, *Ocean Modelling*, 2018, Vol. 122, pp. 36–56, doi:10.1016/j.ocemod.2017.11.004.
- Ivanov Yu.A., Lebedev K.V., Sarkisyan A.S., Generalized hydrodynamic adjustment method (GHDAM), *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 1997, Vol. 33, No. 6, pp. 752–757.
- Kurnosova M. O., Lebedev K.V., Study of transport variations in the Kuroshio extension system at 35°N, 147°E based on the data of Argo floats and satellite altimetry, *Doklady Earth Sciences*, 2014, Vol. 458, No. 1, pp. 1154–1157.
- Lebedev K.V., An argo-based model for investigation of the Global Ocean (AMIGO), *Oceanology*, 2016, Vol. 56, No. 2, pp. 172–181.
- Lebedev K.V., Average annual climate of the ocean. Part 2: Integral characteristics of the world ocean climate (mass, heat, and salt transports), *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 1999, Vol. 35, No. 1, pp. 87–96.
- Lebedev K.V., DeCarlo S., Hacker P.W., Maximenko N.A., Potemra J.T., Shen Y., Argo Products at the Asia-Pacific Data-Research Center, *EOS Trans. AGU*, 2010, Vol. 91, No. 26, Ocean Sci. Meet. Suppl., Abstract IT25A-01.
- Lebedev K.V., Sarkisyan A.S., Nikitin O.P., Comparative analysis of the North Atlantic surface circulation reproduced by three different methods, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, Vol. 52, No. 4, pp. 410–417.
- Lebedev K.V., Yoshinari H., Maximenko N.A., Hacker P.W., Velocity data assessed from trajectories of Argo floats at parking level and at the sea surface, *IPRC Technical Note*, 2007, No. 4(2), 16 p.

- Locarnini R.A., Mishonov A.V., Antonov J.I., Boyer T.P., Garcia H.E., Baranova O.K., Zweng M.M., Johnson D.R.*, World Ocean Atlas 2009, Volume 1: Temperature, S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 68, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 2010, 184 p.
- Roach A.T., Aagaard K., Pease C.H., Salo S.A., Weingartner T., Pavlov V., Kulakov M.*, Direct measurements of transport and water properties through the Bering Strait, *J. Geophys. Res.*, 1995, Vol. 100, N C9, pp. 18443–18457.
- Sarkisyan A.S., Nikitin O.P., Lebedev K.V.*, Physical characteristics of the Gulf Stream as an indicator of the quality of large-scale circulation modeling, *Doklady Earth Sciences*, 2016, Vol. 471, No. 2, pp. 1288–1291.
- Sasaki Y.N., Schneider N., Maximenko N., Lebedev K.*, Observational evidence for propagation of decadal spiciness anomalies in the North Pacific, *Geophys. Res. Lett.*, 2010, Vol. 37, L07708, doi:10.1029/2010GL042716.
- Soto-Navarro J., Criado-Aldeanueva F., García-Lafuente J., Sánchez-Román A.*, Estimation of the Atlantic inflow through the Strait of Gibraltar from climatological and in situ data, *J. Geophys. Res.*, 2010, Vol. 115, C10023, doi:10.1029/2010JC006302.
- Sprintall J., Wijffels S.E., Molcard R., Jaya I.*, Direct estimates of the Indonesian Throughflow entering the Indian Ocean: 2004–2006, *J. Geophys. Res.*, 2009, Vol. 144, C07001, doi:10.1029/2008JC005257.