

УДК 551.465

## О НЕОБХОДИМОСТИ СОЗДАНИЯ СЕРИЙ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ РАСЧЕТНЫХ АТЛАСОВ (СОКРАТ)<sup>1</sup>

© 2016 г. А. С. Саркисян

Институт вычислительной математики РАН, Москва

e-mail: sarkis.inm@yandex.ru

Поступила в редакцию 05.03.2016 г.

В работе, для создания серий атласов под общим названием СОКРАТ, предложена методика интегрирования системы уравнений динамики океана (ЗДРЕМ) таким образом, чтобы можно было приспособить циркуляцию нижних слоев океана к верхним и избежать при этом сглаживания интенсивности последних из-за длительного интегрирования или из-за грубого разрешения. Приводятся примеры конкретных расчетов автора с небольшой группой коллег. В этих результатах сохранились реалистичные физические особенности циркуляции вод благодаря короткому периоду интегрирования и высокому разрешению. Показано, что вследствие длительного интегрирования и/или моделирования с грубым разрешением практически “пропадает” самое главное в динамике океана — интенсивные вдольбереговые течения, т.е. навязывается чуждое океану несуществующее “установившееся” физическое стояние.

DOI: 10.7868/S0030157416050129

Амбициозность заглавия требует, чтобы, прежде чем привести пример электронного варианта такого атласа, было объяснено, в чем идея и каково ее отличие от известных программ и научно-исследовательских работ по моделированию климатических характеристик океана. Современные специалисты по численному моделированию обычно стартуют от данных школы Левитуса [10, 14], проводят длительные расчеты, стремясь достичь установления во всей толще океана. Отметим, что характерное время изменения гидрологических полей больших глубин на порядок больше чем верхних слоев, т.е. установившегося состояния во всей толще модельного океана не бывает, но дело не только в этом. Быстрые изменения, приводящие к реалистичным полям (в особенности верхних слоев океана), происходят в первые недели, месяцы модельного времени интегрирования, а расчеты на десятилетия и столетия, на мой взгляд, “съедают” уже созданное. Модельный тренд сильно искажает гидрологию верхних слоев, ибо модель быстро достигает уровня своей некомпетентности (из-за недостатков, присущих любой современной модели), фильтрует поля температуры ( $T$ ) и солёности ( $S$ ), успев лишь слегка “разбудить” нижние слои. По этой причине стандартное длительное интегрирование считаю нецелесообразным, хотя формально это математически правильно. На мой взгляд, су-

ществует два пути выхода: во-первых, усовершенствование моделей (в частности выполнение расчетов с высоким разрешением) — но это постоянный и бесконечный процесс; во-вторых, усовершенствование методики интегрирования — это легче. Например, метод временного “замораживания” статистически достоверных данных, заполнения пустот модельной интерполяцией и т.д.

Успешные попытки такого рода сделаны в [5, 3]. Другие варианты по методике замораживания будут сделаны в ближайшем будущем. А пока в данной работе ограничиваемся методом кратковременного интегрирования и ссылкой на расчеты с высоким разрешением для создания первых вариантов атласов.

Во избежание недоразумений в качестве объектов для критики я избрал одну собственную статью и две работы близких мне коллег.

Есть еще одна причина зачем “модельеры” выполняют длительное интегрирование — это стремление показать, что результаты расчетов хорошо согласуются (некоторые используют слово “совпадают”) с данными измерений. Но когда это бывало, чтобы результаты расчетов не сошлись с данными измерений? Никогда, независимо от качества модели. Нужно только благосклонное желание автора, и скудные данные измерений будут подогнаны к результатам расчетов. Приведу два примера: очень старой статьи и новейшей работы, которая будет издана в этом году. Первая работа по численному моделированию

<sup>1</sup> Статья публикуется в связи с 90-летием А.С. Саркисяна.

океана [7] понравилась И.А. Кибелю (научный руководитель диссертации, основным содержанием которой является указанная статья), В.Б. Штокману, П.С. Линейкину (официальные оппоненты защиты диссертации) и ряду других ученых (перечисленные фамилии не нуждаются в моих комплиментах). Даже спустя три десятилетия об этой работе положительно отзывался Семтнер [13]. В статье я писал, что, если принять глубину бароклинного слоя океана порядка 1 км, то по рассчитанному значению  $\psi$  получается расход Гольфстрима в 70–90 Св. На деле бароклинность океана ни при чем, ибо это модель плоскодонного однородного океана. Мы теперь знаем, что в такой простой модели расход Гольфстрима при учете реального рельефа дна получится в несколько раз меньше, следовательно, задание глубины в 1 км – это подгонка для получения расхода Гольфстрима, кажущегося реалистичным.

Две другие работы [1, 9] выполнены высококвалифицированными специалистами по вычислительной математике (один из соавторов этих статей – мой ученик), модель у них современного высокого уровня. Их расчеты, в частности, показали эффект перехода к высокому разрешению. Однако длительное модельное время интегрирования (80 лет) и или грубое разрешение сгладило изолинии уровня океана и других характеристик до неестественно зональных и подавило интенсивные прибрежные течения (например, Гольфстрим). Но это не единственный и не главный недостаток. Авторы естественно обсуждают вопрос о степени близости их результатов к данным наблюдений или отличия от них. В принципе это хорошо, но что такое “данные наблюдений”? Приведенная работа [11] действительно очень интересна, но, из-за скудности данных измерений карта уровня сглажена. На деле это именно крупномасштабные данные измерений (при стандартной обработке) и сглаживание качественно согласуются с фильтрованными результатами длительных расчетов и/или расчетов с грубым разрешением. Но авторы работ [1, 9] ведь поступают как многие из известных ученых “модельеров”. Таким, на мой взгляд, недостатком обладает большинство работ со стандартным интегрированием на длительный срок и грубым разрешением.

Остановимся конкретно на обосновании заглавия этой статьи. Зачем нужно создавать Атласы? Считаю, что это моральная обязанность океанологов. Существующие атласы либо безнадежно устарели, как, например, пудовые тома Атласа Океанов конца 70-х и начала 80-х годов прошлого века, либо малоинформативны, либо грубого разрешения, и по существу нет надобности их обсуждать. Единственная серия атласов, на которой стоит подробнее остановиться и которая заслуживает конструктивной критики и совершен-

ствования – это серия WOA, начало которой положил Левитус [10, 14].

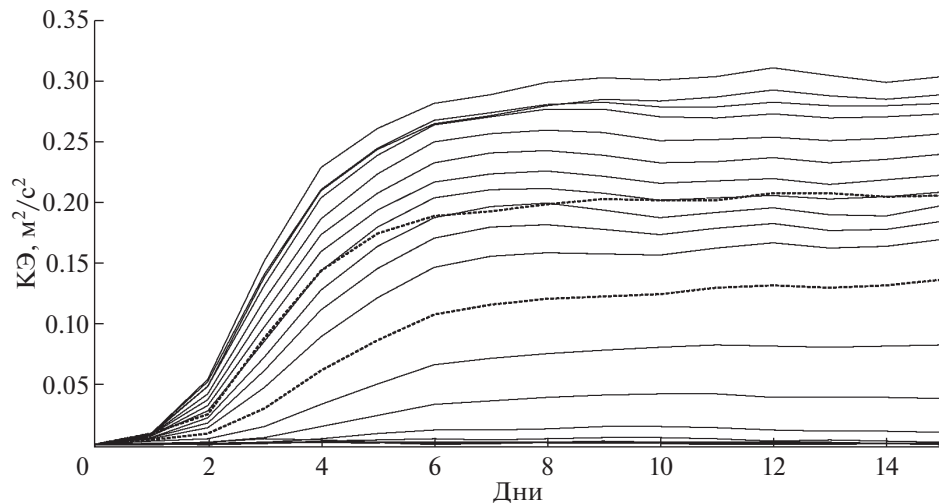
Эта серия десятилетиями служила и еще долго будет служить мировому океанологическому сообществу. Следовательно, любой новый атлас должен показать, какие недостатки серий WOA устраняются, тогда и будет ясно, зачем было “огород городить”.

Основной недостаток атласов WOA – это отсутствие карт циркуляции Мирового океана. Создание карт течений и будет основной целью серии СОКРАТ. Вторым по серьезности недостатком серий WOA является отсутствие прямого учета рельефа дна. Косвенно данные измерений  $T$ ,  $S$  содержат влияние рельефа дна, но, как увидим ниже, этого совсем недостаточно. При построении карт WOA авторы обрабатывают данные  $T$  и  $S$  независимо друг от друга, что тоже недостаток. Карты серии СОКРАТ будут построены на основе современных хорошо развитых трехмерных, нелинейных, нестационарных (3DPEM) численных моделей Мирового океана, обладающих к тому же высоким разрешением. Таким требованиям удовлетворяют ряд зарубежных моделей. Из российских для этой цели подходит пока только модель Ибраева [2], по которой и будет получена основная часть нижеследующих результатов. По этой модели будут получены скорость течения ( $u$ ,  $v$ ,  $w$ ), урвенная поверхность Мирового океана  $\zeta$ ,  $T$ ,  $S$ , с учетом рельефа дна (шаг сетки  $0.1^\circ$ , число вертикальных уровней – 49) и надлежащих граничных условий при интегрировании на совсем короткое модельное время. Критерий остановки расчета основан на следующих соображениях.

Как известно, большая часть реально существующих в океанах интенсивных течений “прижаты” к побережьям материков (как западным, так и восточным) [12]. Многочисленными диагностическими и адаптационными расчетами показано, что в (приведенном здесь в упрощенном виде) уравнении для уровня за это главным образом ответственны два подчеркнутых члена – СЭБИР и БАРБЭ (бароклинный бета-эффект):

$$\frac{1}{2\alpha} \Delta \zeta + J(H, \zeta) + \frac{H\beta}{f} \frac{\partial \zeta}{\partial x} = \frac{1}{\rho_0 g} \text{rot}_z \bar{\tau} - \underbrace{- \frac{1}{\rho_0} \int_0^H J(H, \rho) dz}_{\text{СЭБИР}} - \underbrace{\frac{\beta}{\rho_0 f} \int_0^H (H - z) \frac{\partial \rho}{\partial x} dz}_{\text{БАРБЭ}}.$$

Это означает, что нужно на побережьях выделить, например, 10–15 районов хорошо известных интенсивных течений и при интегрировании следить в них за какой-либо важной характеристикой (градиент плотности, модуль скорости и т.д.). Практика показывает, что за короткое модельное



**Рис. 1.** Временной ход кинетической энергии единицы массы воды  $\frac{u^2 + v^2}{2} (\text{м}^2/\text{с}^2)$  на различных горизонтах в районе интенсивного прибрежного Агульясского течения [2]. (Показан каждый второй горизонт, пунктирные линии соответствуют поверхности и глубине 550 м).

время (от нескольких недель до нескольких месяцев) и при достаточно высоком разрешении (шаг по горизонтам не больше  $0.1^\circ$ ) избранный индикатор достигает максимума, начинает колебательное движение, а при дальнейшем длительном расчете проявляются такие нежелательные факторы, как недостатки модели, погрешности граничных условий, модельный тренд и т.д. В момент достижения первого максимума целесообразно прекратить расчеты и результатом считать либо значения характеристик за этот момент, либо их среднее за некоторый небольшой последний промежуток времени.

Это “крамола” с формально математической точки зрения, а, следовательно, с точки зрения модельеров (а их большинство), продолжающих расчеты до победы, до “установления” и, увы, до сильного сглаживания, до нереально гладких полей  $T$ ,  $S$ ,  $\rho$ , когда серьезное значение придают феноменологическим коэффициентам, гармоническим, бигармоническим “мешалкам”, как бы изображающим турбулентность. Кстати, после перехода от производных к конечным разностям таких (но скрытых) мешалок уже хватает в виде вычислительной вязкости. Считаю, как сказано выше, что современные модели при длительном интегрировании доходят до уровня своей некомпетентности. Модели лучше использовать не столько как создатели, сколько как интерполянты (лучшие интерполянты).

Но кто прав? Как быть? Кто судья? Единственным судьей могут служить статистически достоверные данные измерений. Их немного, но они есть. Например, “змея” Гольфстрима со скоро-

стью 1–1.5 м/с, полученная измерениями и осреднением за 20 лет лагранжевой скорости [6]. Такие большие величины скорости течения получаются за короткий промежуток времени интегрирования и/или при высоком разрешении и оказываются подавленными — за длительный.

Перейдем к конкретным примерам расчетов, результаты которых могут быть использованы как первые пробные варианты СОКРАТа.

Параллельно с данной работой, в двух номерах журнала “Известия РАН. Физика атмосферы и океана” будут изданы две статьи [1, 4], авторами которых являются мои единомышленники. В первой из них представлены некоторые результаты кратковременной адаптации данных WOA-09 вместе с расчетами всех физических характеристик Мирового океана. Именно, приводятся только “некоторые” из результатов, выполненные для всего Мирового океана численного эксперимента с шагом в  $0.1^\circ$  на 49 горизонтах — целиком это огромная информация, которую можно хранить, представлять, распространять только в электронном виде.

Здесь представим лишь три рисунка из результатов расчетов, выполненных по модели [2]. На рис. 1 представлен временной ход средней для избранной области Агульясского течения кинетической энергии. Видно, что двух недель модельного времени было достаточно для достижения первого максимума скорости течения. Колебательные движения хорошо заметны в верхних слоях и не доходят до больших глубин.

Более яркое впечатление оставляет рис. 2, изображающий ту же характеристику для района

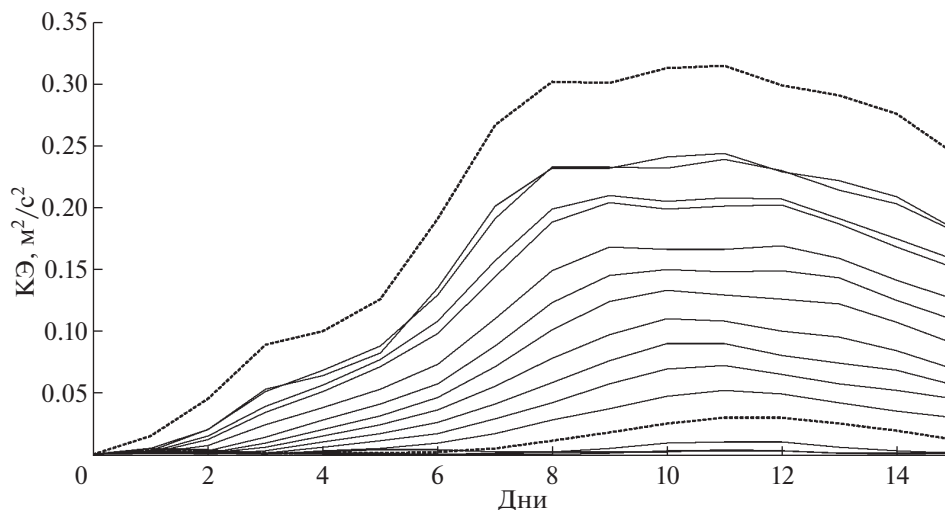


Рис. 2. Временной ход кинетической энергии единицы массы воды  $\frac{u^2 + v^2}{2}$  (м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>) на различных в районе интенсивного прибрежного Бразильского течения [2].

Бразильского течения. Поведение кинетической энергии здесь отличается от Агульяского — почти синхронное изменение во всей толще океана с убывающей ко дну амплитудой. Причем тех двух недель здесь также хватило для остановки процесса интегрирования.

Однако несколько недель модельного времени вовсе не стандарт для остановки расчетов. На некоторых ключевых побережьях необходимы месяцы — месяцы, и только, а не десятилетия, не столетия. Все зависит от наклона континентального склона и градиента плотности, т.е. от СЭБИР и в меньшей степени от БАРБЭ. Различие процесса адаптации в отобранных районах требует повторить расчеты, проверить все (западные и восточные) избранные ключевые районы на предмет минимального времени адаптации верхних слоев океана, применить технику временного замораживания результатов верхних слоев при расчетах нижних, выполнить завершающую взаимную адаптацию верхних и нижних, и вариант СОКРАТа будет готов.

В заключение этой серии расчетов приведем один фрагмент результатов расчетов. На рис. 3 представлен уровень океана в районе Восточно-Австралийского течения. Видно, что за это короткое время интегрирования интенсивное градиентное течение успело сформироваться.

Здесь мы остановились только на идее и привели примеры, указывающие на реалистичность ее осуществления. Но еще перечислим совсем кратко три из результатов работ [4, 8].

1. Расчеты привели к драматическим изменениям карт атласа WOA за счет учета рельефа дна. Сгущение изолиний  $T$ ,  $S$  коррелирует с конти-

нентальным склоном, и можно судить по ним о районах интенсивных течений. Поэтому карты СОКРАТа помимо скорости течений будут содержать поля  $T$ ,  $S$ ,  $\zeta$ ,  $\rho$ , а возможно и химические характеристики, и могут зачастую служить альтернативой WOA.

2. Изолинии уровня, а также  $T$ ,  $S$  очень хорошо согласуются со “змеей” Гольфстрима.

3. Расчеты, выполненные для Северной Атлантики по другой совсем модели и с несколько другим шагом по горизонталю (0.25°) приводят к аналогичным результатам.

В работе [4] мы выполнили сравнение трех методов получения карт циркуляции на примере района Северной Атлантики. Это, во-первых, названная выше карта лагранжевой скорости, по которой нужно судить о качестве любой модели и любого результата расчетов; во-вторых, обычный метод адаптации, отмеченный выше, и, в-третьих, кратковременная адаптация с усвоением данных программы АРГО. Подчеркнем, что быстро растущая информация программы АРГО очень ценна, поэтому наша группа займется различными методами моделирования с использованием этой информации, что даст еще один вариант СОКРАТа.

Целью приведенных в данной работе расчетов было лишь показать, что предложенная идея построена не на пустом месте, а уже имеются различные варианты успешной “пробы пера”. По мере появления новых моделей, усовершенствования существующих, обогащения массива данных АРГО, будет целесообразно осуществить инновацию СОКРАТов. А пока должны быть атласы, демонстрирующие наше сегодняшнее понимание

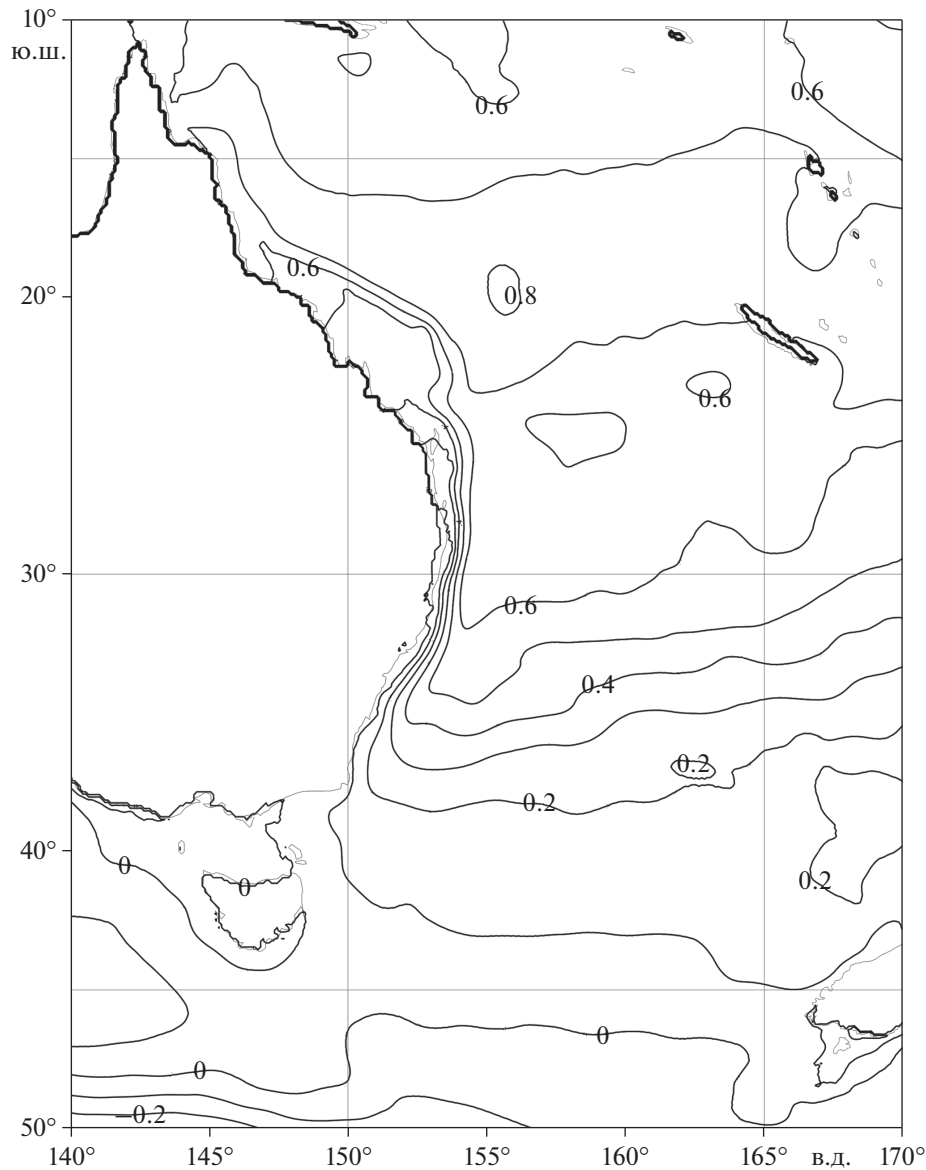


Рис. 3. Уровенная поверхность океана в районе Восточно-Австралийского течения по модельным расчетам [2].

общей циркуляции вод Мирового океана. Перспективной же задачей является получение информации о глубинной циркуляции, но не за счет сглаживания результатов, достигнутых для верхних слоев, и вовсе не за счет грубого разрешения. Например, признав достигнутые достаточно высокие градиенты  $T$ ,  $S$ ,  $\rho$ ,  $\zeta$  и скорости течений верхних слоев реалистичными, временно заморозить их, выполнять расчеты для нижних горизонтов длительное время, заставив нижние слои приспособиться к ним. Затем, разморозив верхние, выполнить на сравнительно короткое модельное время совместные для всей толщи адаптационные расчеты. Таким путем будут достигнуты установление и сохранены почти полностью большие

градиенты характеристик, полученные для верхних слоев.

Есть еще одна цель призыва к расчетам с высоким разрешением, кратковременным интегрированием и, наконец, к изданию атласов серии СОКРАТ. Дело в том, что основная часть интенсивных течений сосредоточена именно в прибрежных слоях, и это должно быть отражено в атласах со специально высоким разрешением в этих районах. Только таким путем будет показано качество моделирования крупномасштабной циркуляции. В противном случае выводы о физических процессах океана, на мой взгляд, вряд ли надежны.

Чтобы англоязычные читатели, ученые легко понимали, что мы имеем в виду, записывая или произнося аббревиатуру СОКРАТ, целесообразно перевести заглавие этой статьи на английский язык в форме Series of Oceanographic Climatic Research Atlases (SOCRAT).

Работа выполнена в ФГБУ “Гидрометцентр России” при финансовой поддержке РНФ (№ 14-37-00053 “Комплексный прогноз гидрометеорологических процессов в Арктике”).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Залесный В.Б., Агошков В.И., Шутяев В.П. и др.* Задачи численного моделирования гидродинамики океана свариационной ассимиляцией данных наблюдений // Изв. РАН. Физ. атм. и океана. 2016. Т. 52. № 4. С. 488–500.
2. *Ибраев Р.А., Хабеев Р.Н., Ушаков К.В.* Вихререзшающая 1/10° модель Мирового океана // Изв. РАН. Физ. атм. и океана. 2012. Т. 48. № 1. С. 45–55.
3. *Иванов Ю.А., Лебедев К.В., Саркисян А.С.* Обобщенный метод гидродинамической адаптации (ОМЕГА) // Изв. РАН. Физ. атм. и океана. 1997. Т. 33. № 6. С. 812–818
4. *Лебедев К.В., Саркисян А.С., Никитин О.П.* Анализ поверхностной циркуляции Северной Атлантики, полученной тремя различными методами (дрифтеры, модельные расчеты по данным WOA-09 и АРГО) // Изв. РАН. Физ. атм. и океана. 2016. № 4. С. 465–474.
5. *Левитус С., Саркисян А.С.* Динамические характеристики океана, полученные путем синтеза климатических данных и информации программы ВОСЕ // Изв. РАН. Физ. атм. и океана. 2001. Т. 37. № 4. С. 534–546
6. *Никитин О.П.* Карты поверхностных течений на основе данных дрейфующих буев // Метеоспектр. 2011. № 2. С. 77–81.
7. *Саркисян А.С.* Расчет стационарных ветровых течений в океане // Изв. АН СССР. Геофизика. 1954. № 6. С. 554–561.
8. *Саркисян А.С., Ушаков К.В., Архипкин В.С., Горбушкин А.Р.* Реконструкция гидрологических полей и восстановление циркуляции вод Мирового океана // Изв. РАН. Физ. атм. и океана. 2016. № 5 (в печати).
9. *Яковлев Н.Г., Володин Е.М., Грицун А.С.* Воспроизведение уровня Мирового океана в модели климата ИВМ РАН: Влияние пространственного разрешения по горизонтали (Воспроизведение уровня Мирового океана и его естественной изменчивости в модели климата ИВМ РАН) // Изв. РАН. Физ. атм. и океана. 2016 (в печати).
10. *Locarnini R. A., Mishonov A.V., J. I. Antonov J.J. et al.* World Ocean Atlas 2013. V. 1: Temperature / Eds. Levitus S., Mishonov A. NOAA Atlas NESDIS 73, 40 p.
11. *Rio M.-H., Schaeffer P., Moreaux G. et al.* A new Mean Dynamic Topography computed over the global ocean from GRACE data, altimetry and in-situ measurements // Poster communication at OceanObs09 symposium, 21–25 September 2009, Venice. 2009. [www.aviso.oceanobs.com/fr/donnees/produits/produits-auxiliaires/mdt/index.html](http://www.aviso.oceanobs.com/fr/donnees/produits/produits-auxiliaires/mdt/index.html).
12. *Schott G.* Weltkarte zur Übersicht der Meeresströmungen // Ann. Hydrogr. und met. Meteorol. 1943.
13. *Semtner A.J.* History and Methodology of Modelling the Circulation of the World Ocean // Advanced Physical Oceanographic Numerical Modelling / Ed. D’Brien J.J. D. Reidel Publishing Company, 1986. P. 23–32.
14. *Zweng M.M., J.R. Reagan J.I., Antonov R.A. et al.* World Ocean Atlas 2013. V. 2. Salinity / Eds. Levitus S., Mishonov A. NOAA Atlas NESDIS 74. 39 p.

## On Necessity of Creation Series of Oceanographic Climatic Research Atlases (SOCRAT)

A. S. Sarkisyan

The idea for creation of SOCRAT is proposed by special technic of 3DPEM integration. The essence of the method is to integrate the numerical system of equations for a short model-time, to “freeze” the upper layers data. Then to adapt the lower layers circulation to frozen data and finally to make mutual adjustment of all layers by short time of integration. That helps to avoid the unnecessary filtering the upper layers data when creating the lower layers circulation by longer model time of integration. Examples of calculations with a small group of colleagues which keep the upper layer circulation in intense condition are presented.