

УДК 004.032.24+519.63

ВЛИЯНИЕ УСВОЕНИЯ АНОМАЛИЙ УРОВНЯ ОКЕАНА В МОДЕЛИ НУСОМ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ СО СПУТНИКОВ В АТЛАНТИКЕ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОКЕАНА

© 2016 г. К. А. С. Танажура^{1,2,3}, Л. Н. Лима², К. Беляев^{2,4,5}

¹ Институт физики, Федеральный университет штата Байя, Сальвадор, Бразилия

² Научно-исследовательский центр геофизики и геологии,
Федеральный университет штата Байя, Сальвадор, Бразилия

³ Департамент по исследованиям океана, Калифорнийский университет, Санта Крус, США

⁴ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

⁵ Федеральный исследовательский центр прикладной математики
им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

e-mail: cast@ufba.br

e-mail: Leonasclima@gmail.com

e-mail: kb@sail.msk.ru

Поступила в редакцию 19.02.2015 г.

Данные наблюдений за аномалиями уровня океана, рассчитанные вдоль треков спутников Jason-1 и Jason-2 усваиваются в гидродинамическую модель океана НУСОМ (Hybrid-Coordinate Ocean Model), университет Майами, США. Используется известный метод усвоения данных наблюдений, так называемый Ансамблевый Метод Оптимальной Интерполяции, в английской аббревиатуре известный как EnOI. В работе исследуется влияние усвоения данных аномалий уровня океана на динамические характеристики океана, такие как скорости течений, давление и толщина слоя одинаковой плотности, которые рассчитываются в модели НУСОМ. Поведение анализируемых и прогностических величин модели сравнивается с контрольным расчетом, т.е. с поведением модельных переменных без усвоения, но при тех же начальных и граничных условиях. Результаты расчетов также сравниваются с другими модельными расчетами, выполненными в экспериментах НУСОМ NCODA (США), используя объективные методы сравнения. Исследования показывают, что усвоение данных аномалий уровня океана существенно меняет вертикальную структуру динамических характеристик модели и при определенных условиях дает существенные улучшения в 24-часовом прогнозе состояния океана. Эксперименты также показывают, что усвоенные поля уровня океана и других характеристик содержат ярко выраженную синоптическую компоненту и этим существенно отличаются от динамики, полученной в контрольном эксперименте. Проводится также количественный и качественный анализ динамики полученных в экспериментах полей на синоптических и мезомасштабах.

DOI: 10.7868/S0030157416030229

1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа продолжает исследования, результаты которых приведены в [4]. В данной работе анализируется то влияние, которое происходит благодаря усвоению данных наблюдений, а именно – усвоению аномалий уровня океана (АУО) на расчетные динамические характеристики океана, такие как скорости течений и толщина слоя постоянной плотности. Описание такого влияния очень важно, так как со спутников одновременно можно получить большой объем данных, покрывающих обширные зоны океана, и при этом динамические характеристики практически не наблюдаемы. Поэтому естественным образом нужно понимать и рассчитывать связи между на-

блюдаемыми характеристиками (в частности, АУО) и океанской динамикой – скоростью течений и слоями равной плотности. В настоящей работе усвоение осуществляется вдоль треков спутников в Атлантическом океане для АУО, которые рассматриваются как наиболее значимые характеристики для описания поверхностной и подповерхностной динамики океана.

В работе [4] показано влияние усвоения АУО на термохалинную структуру океана и проведено сравнение с наблюдаемыми профилями температуры и солёности, взятыми с закоренных буев эксперимента ПИРАТА (Pilot Research Array in the Tropical Atlantic) и дрейфтеров эксперимента АРГО. Но при этом остался “за кадром” очень важный

вопрос о влиянии усвоения АУО на ненаблюдаемые характеристики океана, такие как скорости течений, а также структуру вертикальных слоев океана, в частности, слоев постоянной плотности.

В настоящей работе показывается, как именно усвоение АУО влияет на структуру динамических характеристик океана и проводится количественная оценка такого влияния. Кроме того, результаты расчетов сравниваются с независимыми данными, полученными по модели HYCOM + NCODA в США (Майами) [6].

Метод усвоения данных подробно описан в [4]. В настоящей работе отметим только тот факт, что при усвоении данных влияние наблюдений, в данном случае АУО, сказывается одновременно на всех расчетных величинах модели через построенные ковариационные функции. В этом состоит отличие от ряда других алгоритмов, в которых вначале корректируется одна или несколько расчетных величин, а затем после включения этой скорректированной величины в модель при дальнейшем расчете меняются все остальные модельные характеристики. В последнем случае изменения одной величины после усвоения и подстановки ее в модель вызывают фиктивные возмущения и нарушают баланс, в результате которого модели требуется определенное время на адаптацию.

В данной работе используется хорошо известная модель HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model), ее версия 2.14. Это так называемая изопикническая модель динамики океана, в которой весь океан от поверхности до дна разбивается на слои равной плотности. Таким образом, в качестве вертикальной координаты с индексом k все характеристики океана определяются в соответствующем этому индексу k -том слое плотности. Соответствующая схема базируется на оригинальных работах [5–6]. Структура вертикального разреза в модели показана на рис. 1.

При усвоении данных структура слоев меняется, при этом также меняются характеристики течений внутри слоя. Очень важно понять, как именно это происходит. В настоящей статье при усвоении данных АУО из архива АВИЗО на основе методики, подробно описанной в [4], проводится такая работа. В этом состоит предмет настоящего исследования.

Следует отметить, что работ по усвоению данных АУО со спутников и их влиянию на ненаблюдаемые непосредственно характеристики модели не так уж много. Связано это в основном с тем, что достаточно трудно оценить достоверность полученных в результате усвоения полей и тем более с чем — то сравнить. Отметим в связи с этим работы эксперимента HYCOM + NCODA [6], а также работы российских авторов [2, 3].

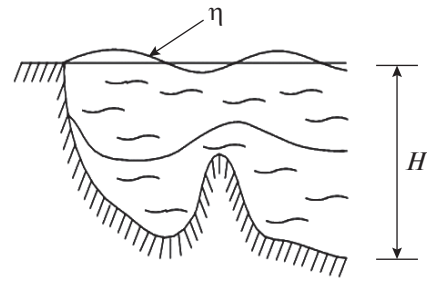


Рис. 1. Структура изопикн в модели HYCOM. Величина η обозначает уровень океана, величина H — глубину океана. Посередине показан раздел плотности.

2. ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ИХ РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперименты по усвоению данных спутниковых наблюдений начались 1 января 2011 г. и продолжались 90 дней. При этом коррекция осуществлялась последовательно через день, при использовании реальных наблюдений на день усвоения. Перед усвоением данные спутников фильтровались с помощью т.н. скользящего среднего, т.е. по формуле:

$$\bar{h}_i = (2k + 1)^{-1} \sum_{j=i-k}^{i+k} h_j,$$

где \bar{h}_i, h_j — соответственно уровень поверхности океана до и после фильтрации, i, j меняются от 1 до N_{obs} . В дальнейшем только фильтрованные значения \bar{h}_i использовались в экспериментах (рис. 2).

В этом параграфе будет показано влияние усвоения АУО на динамические величины модели, такие как горизонтальные компоненты скорости течений, поле давления и толщина слоя равной плотности (изопикны) океана. Поскольку модель HYCOM — это так называемая изопикническая модель, то толщина слоя равной плотности в каждой точки пространства есть величина переменная, меняющаяся также и во времени. Течения напрямую связаны с величиной уровня поверхности океана, поэтому естественно ожидать значимый эффект при усвоении этой величины (ее аномалии). На рис. 3 показано сечение абсолютной скорости течений в горизонтальной плоскости. Рис. 3(а, б) показывают карты течений на 20 и 200 м для анализа, рис. 3 (в, г) — для контроля, все величины рассчитаны на последний день интегрирования. Из рис. 3 видно, что усвоение существенно интенсифицирует течения в Гольфстриме, делает хорошо видимыми две ветви как на 20, так и на 200 м. Абсолютные скорости превышают 1 м/с. На рис. 3в и 3г, соответствующих контрольному эксперименту, эти скорости много скромнее; скорости, превышающие 1 м/с

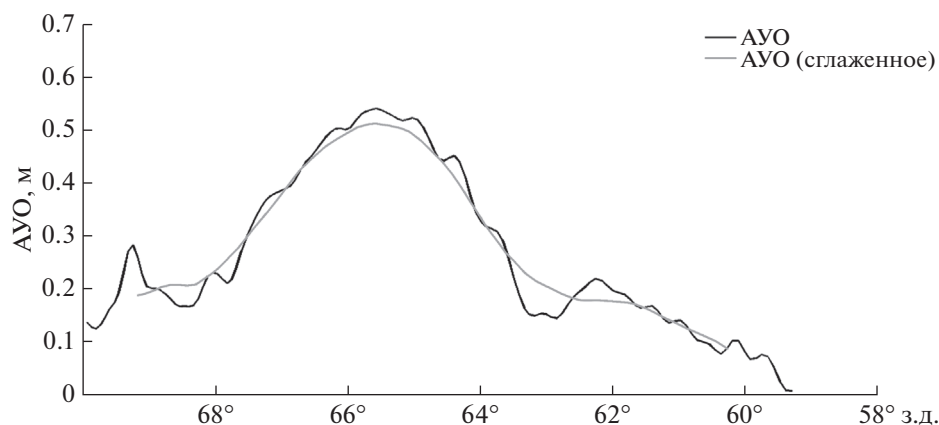


Рис. 2. Поведение исходной и сглаженной величин АУО вдоль трека в последний день интегрирования 3.04.2011 г.

видны только в Северной зоне Бразильского течения. С другой стороны, скорости для экваториального течения на поверхности в контрольном эксперименте видны лучше, их значения лежат около величины 60 см/с, в отличие от результата усвоения, где они меньше 50 см/с. Основные структурные особенности результатов обоих экспериментов очень похожи. Полученные результаты также хорошо соотносятся с расчетами по другим моделям [1].

На рис. 4 показаны вертикальные сечения зональной скорости вдоль экватора: (а) — анализ, (б) — контроль и (в) — их разница. Можно видеть, что модель недооценивает подповерхностное противотечение относительно усвоения, при этом переоценивает поверхностное экваториальное течение. Разница “усвоение минус контроль” везде положительна, при этом максимум этой разницы находится около 15° з.д. и равен 0,5 м/с. Как усвоение, так и контрольный расчет показывают, что поверхностное течение вдоль экватора не проникает в район прибрежных вод Африки, а начинается примерно от 5° в.д. Это противоречит результатам расчетов по схеме НУСОМ-NCODA [6], приводимым ниже, однако соответствует результатам, полученным в работе [7].

Рис. 3 и 4 можно сравнить с рис. 5 сделанным по расчетам в исследовательском центре ВМС США, т.н. НУСОМ-NCODA анализ [6]. Аналогично рис. 3, рис. 5а показывает горизонтальные абсолютные скорости на 20 м, рис. 5б — вертикальный разрез зональной компоненты скорости вдоль экватора. Основные отличия от рис. 3 видны в зоне Гольфстрима и в экваториальной зоне. По НУСОМ+NCODA анализу, Гольфстрим состоит только из одной ветви, против той картины, что на рис. 3. Также, поверхностное экваториальное течение проникает до берегов Африки, но не подходит к берегам Бразилии — вдоль экватора. Численно, картина, показанная на рис. 5 более

соответствует усвоению, чем контрольному расчету. Оценка среднеквадратичного отклонения между скоростями течений (зональная компонента) для усвоения и контрольного расчета с расчетами по НУСОМ + NCODA (рис. 4а, 4б и 5б) дает 28 и 37% соответственно. Сами эти разности не показываются, т.к. все структуры видны на рис. 4 и 5б.

Особенностью модели НУСОМ является ее изопикническая структура — разбиение вертикали на слои равной плотности (рис. 1) [5]. Поэтому представляет особый интерес оценить влияние усвоения АУО на изменение этой структуры. На рис. 6 показаны усвоение и контроль толщины слоев для каждого из 21 слоя вдоль экватора, рис. 6а соответствует анализу и рис. 6б — контролю. Основная разница видна для уровня 6, который становится более тонким и удлиненным в результате усвоения. Кроме того, усвоение приводит к некоторой хаотичности всей внутренней зоны между 6 и 12 уровнями. Ядро малой толщины в верхней части рис. 6 соответствующему 5- и 6-му уровню уменьшается. Поскольку ядро становится меньше, течения интенсифицируются и соответствующие скорости возрастают, что согласуется с предыдущими результатами. При этом гидростатическое давление слоя также возрастает, что приводит к интенсификации градиентных течений.

3. ВЫВОДЫ

Данная работа показывает, что усвоение АУО существенно влияет на поведение всех расчетных характеристик в модели НУСОМ. Более значимо оно сказывается на динамических характеристиках, таких как скорости течений, толщина слоя, давление, менее значимо, но не пренебрежимо мало — для трассеров, как температура и соленость. Исследование показало, что даже непрямое влияние АУО после нескольких последова-

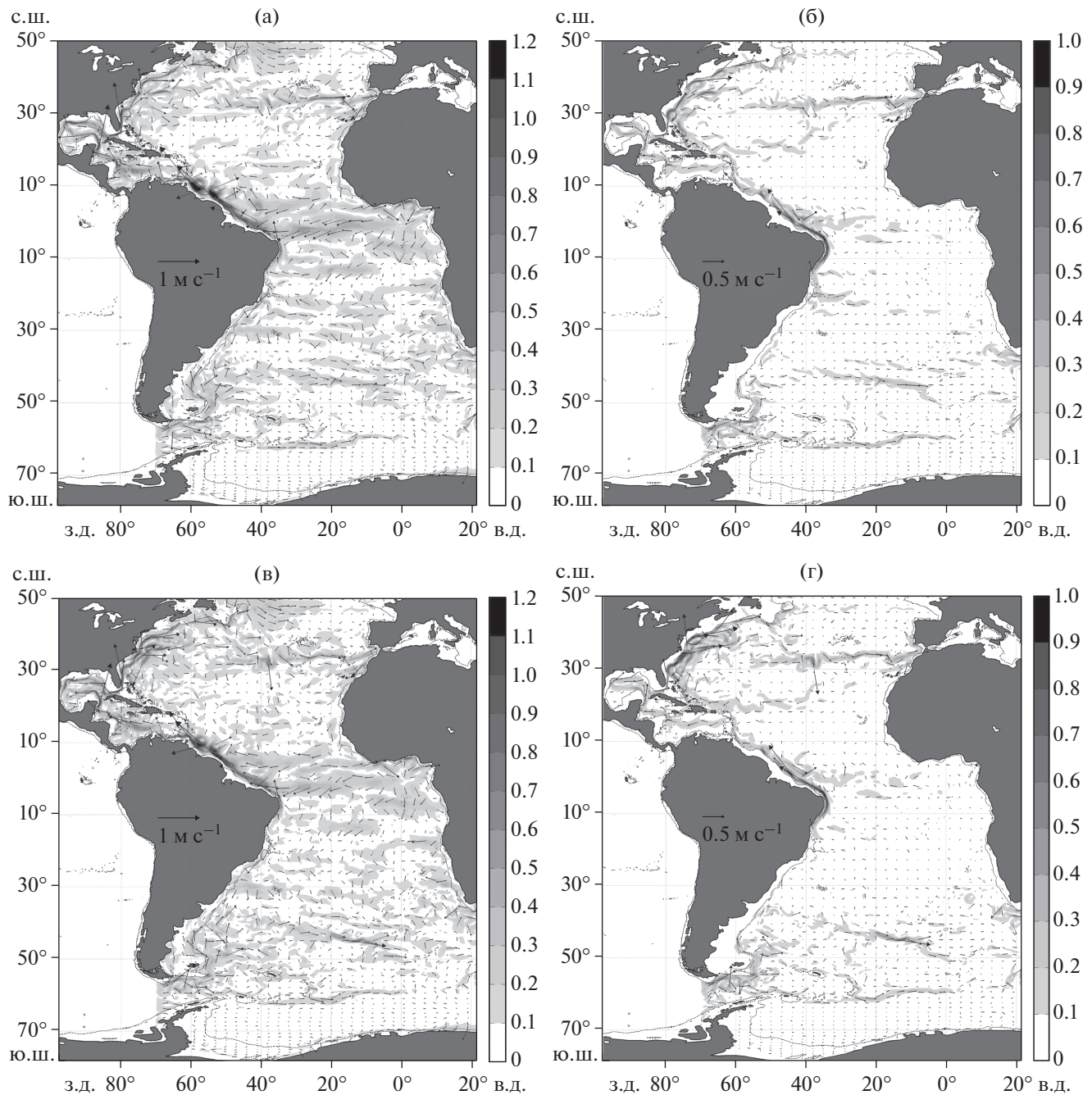


Рис. 3. Абсолютные скорости течений в горизонтальной плоскости на 3.04.2011 г. (а) – анализ 20 м, (б) – анализ 200 м, (в) – контроль 20 м, (г) – контроль 200 м.

тельных усвоений существенно интенсифицирует модельную динамику океана, особенно в синоптическом и мезомасштабе. Также, исследование показало, что необходимо скорректировать начальное смещение между наблюдениями и расчетными величинами.

Динамические величины весьма чувствительны к усвоению данных АУО. Интенсификация течений достигает 30% и даже больше по сравнению с контрольным расчетом. Если это пересчи-

тать в энергетические характеристики, то разность может достигнуть 100 и более процентов. Также, усвоение АУО значительно обогащает характер движений, добавляя дополнительные свойства в динамику среднемасштабных вихрей, меандров, коротковолновых движений океана.

Усвоение данных АУО – необходимая часть оперативной системы усвоения данных при прогнозах состояния океана, которая важна как с теоретической, так и с практической точек зрения.

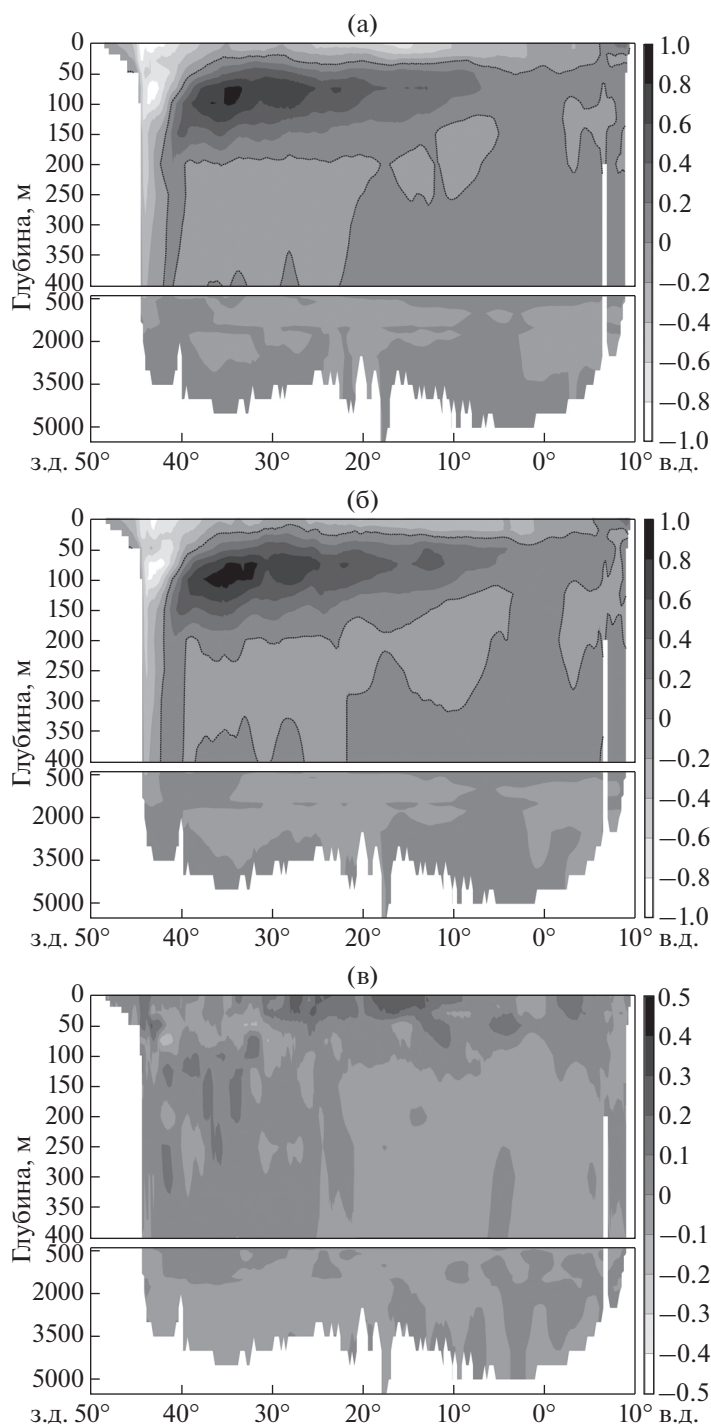


Рис. 4. Вертикальные сечения скорости зональной компоненты течения вдоль экватора на 3.04.2011 г. (а) – контроль, (б) – анализ, (в) – разность анализ минус контроль.

Авторы благодарят проф. Алфонсо М. Пайва (Afonso M. Paiva) и проф. Жоао М.А.С. де Соуза (João M.A.C. de Souza), Федеральный Университет Рио де Жанейро, Бразилия за предоставление данных расчетов по разгону модели НУСОМ. Авторы выражают признательность к.ф.-м.н., с.н.с.

Н.П. Тучковой, Федеральный исследовательский центр информатики и управления РАН за помощь по подготовке данной статьи к печати. Первый автор выражает отдельную благодарность фонду CAPES, Министерства Образования Бразилии, государственной компании ПЕТРОБРАЗ

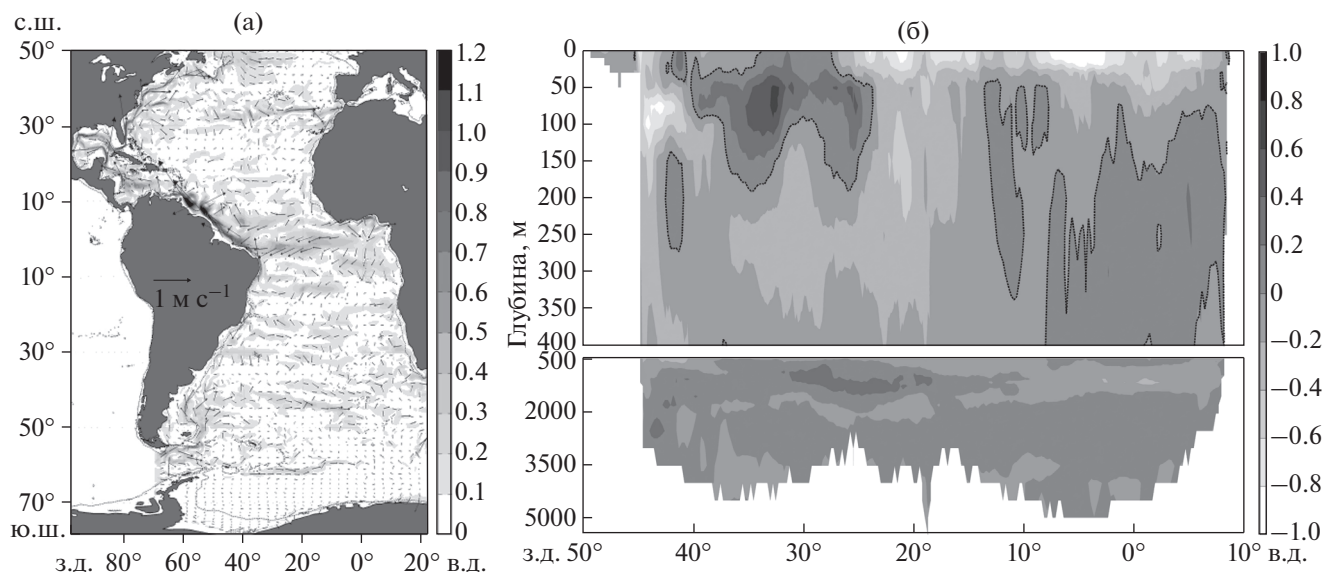


Рис. 5. Скорости течения по данным NCOM + NCODA анализа на 3.04 2011 г. (а) – 20 м, (б) – сечение зональной компоненты скорости вдоль экватора.

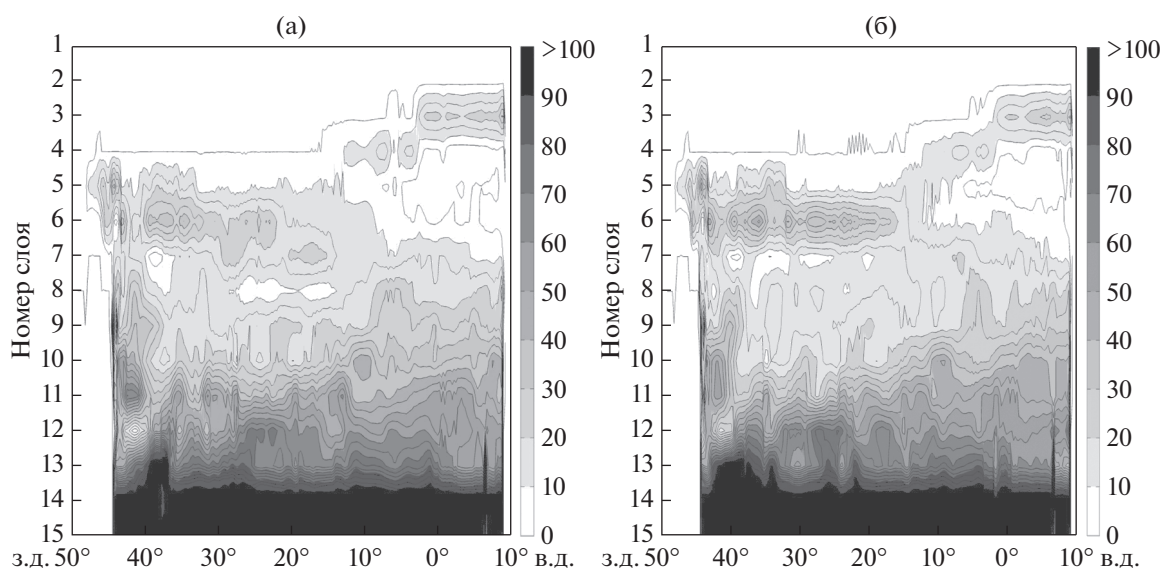


Рис. 6. Толщина слоев равной плотности вдоль экватора на 3.04. 2011 г. (а) – контроль, (б) – анализ.

(PetroBraz), Бразилия, и Национальному фонду Бразилии по нефти, натуральному газу и биотопливу (Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), Brazil). Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 14-11-434).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дианский Н.А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. М.: Физматлит, 2013. 273 с.
2. Дорофеев В.Л., Коротяев Г.К. Ассимиляция данных спутниковой альтиметрии в вихререзающей модели циркуляции Черного моря // Морск. гидрофиз. журн. 2004. № 1. С. 52–68.
3. Кныш В.В., Демышев С.Г., Коротяев Г.К., Саркисян А.С. Методика и результаты ассимиляции климатических данных по температуре, солёности и уровню в численной модели циркуляции Черного моря // Изв. РАН. Физ. атм. и океана. 2007. Т.43. № 3. С. 398–412.
4. Танажура К.А.С., Лима Л.Н., Беляев К.П. Усвоение аномалий уровня океана в гидродинамической модели NCOM по данным наблюдений со спутников в Атлантике // Океанология. 2015. Т. 55. № 5. С. 738–750.

5. *Bleck R., Boudra D.R.* Initial testing of a numerical ocean circulation model using a hybrid quasi isopycnal vertical coordinate // *J. Phys. Oceanogr.* 1981. V. 11. P. 755–770.
6. *Chassignet E.P., Hurlburt H., Metzger E.J. et al.* US GO-DAE: Global Ocean Prediction with the HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) // *Oceanography*. 2009. V. 22. P. 64–75.
7. *Tanajura C.A.S., Belyaev K.* On oceanic impact of data assimilation method in a coupled ocean-land-atmosphere model over Atlantic // *Ocean Dyn.* 2002. V. 52. № 3. P. 23–32.

Impact of Assimilation of Satellite Surface Height Anomalies Data into the Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) over the Atlantic Ocean on Oceanic Dynamics

C. A. S. Tanajura, L. N. Lima, K. Belyaev

Observed along-track data of sea surface height anomalies (SSHA) over the Atlantic Ocean from the satellites Jason-1 and Jason-2 were assimilated into the Hybrid-Coordinate Ocean Model (HYCOM) with the Ensemble Optimal Interpolation scheme (EnOI). The impact of assimilation of SSHA focused on oceanic dynamics was investigated. The time series of analyzed and forecasted values were compared with a model free run with the same forcing but without assimilation. Also, the results were compared with independent run, the so-called HYCOM + NCODA analysis from NAVY USA. The study shows that the assimilation technique with some modifications allowed substantial improvement in the ocean 24 h prediction by reducing the forecast errors in comparison with the free run. It is also shown that the analyzed sea surface fields contain meso-scale and synoptic variability which are poorly seen in the free run.