

Модельные оценки меридионального переноса массы в Атлантике с применением методов усвоения данных наблюдений

Н.П. Тучкова¹, К.П. Беляев^{1,2}, Г.М. Михайлов¹, А. Н. Сальников^{1,3}

¹*Вычислительный центр им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН*

²*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН*

³*ФОУ ВПО "Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова", факультет ВМК*

Аннотация. В работе проводятся оценки меридионального потока массы, рассчитанные по совместной модели «океан-земля-атмосфера» института им. М.Планка с применением методов усвоения данных наблюдений. В качестве наблюдаемых данных использовались разрезы вдоль Атлантики за 1991-1995 гг из архивов Института Океанологии им. П.П.Ширшова РАН по температуре и солёности. Имеющиеся разрезы состоят из около 650 станций, на которых произведено от 100 до 3000 измерений от поверхности до дна. В процессе работы проводились оценки скоростей течений, как чисто модельные, так и с усвоением этих данных наблюдений. В качестве метода усвоения использовался обобщенный метод Калмана, описание которого содержится в работах авторов. В исследовании сделан акцент на климатические изменения процессов в океане. Была проведена оценка, как конкретные данные наблюдений влияют на долгопериодную изменчивость динамических величин в океане. Глубоководные данные экспериментов Института океанологии в южной части Атлантики представляют собой уникальный материал для изучения климатической изменчивости и влияния динамики Южной Атлантики на глобальные процессы в океане и атмосфере. Обработка экспериментов была выполнена на базе вычислительного кластера "Ломоносов-2" Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Ключевые слова: метод усвоения данных GKF, суперкомпьютер Ломоносов-2, кластерная система DKRZ Mistral, совместная модель MPI-ESM.

Model estimates of the meridional mass transfer in the Atlantic using the data assimilation methods

N.P. Tuchkova¹, K.P. Belyaev^{1,2}, G.M. Mikhailov¹, A.N. Salnikov^{1,3}

¹*Dorodnicyn Computing Center FRC CS C of RAS, Vavilov str, 40, 11933, Moscow, Russia*

²*Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Nahimovskiy pr. 36, 117218 Moscow, Russia*

³*Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia*

Abstract. The meridian mass flow estimates are calculated using the coupled ocean-earth-atmosphere model of the Max Planck Institute for Meteorology in conjunction with the data assimilation methods of observations data. As the observed data, sections along the Atlantic for 1991-1995 were used from the archives of the Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Science contained temperature and salinity profiles. The available sections have about 650 stations each of them contains from 100 up to 3000 measurements from the surface to the bottom. The estimates of the flow velocities were carried out both purely model (control) and with the assimilation of these observational data. As a method of assimilation, the generalized Kalman method (GKF) was utilized, its description is presented earlier by authors. The study focuses on climate change processes in the ocean. An assessment was made of how specific observations affect the long-term variability of the ocean dynamic parameters. The deep-water data of the experiments is a unique material for studying climatic variability and the influence of the dynamics of the South Atlantic on global processes in the ocean and the atmosphere. The numerical experiments were processed on the computational cluster "Lomonosov-2" of the Lomonosov Moscow State University.

Keywords: GKF data assimilation method, supercomputer Lomonosov-2, cluster system DKRZ Mistral, coupled model MPI-ESM.

Введение

При анализе динамики океана одним из важных направлений исследований является расчет потоков тепла и массы через выделенные границы для заданных областей и для океана в целом. Такие расчеты требуются для целого ряда задач, прежде всего для оценок баланса тепла и влаги, на которых строятся среднесрочные и долгосрочные прогнозы погоды и климатические сценарии. При этом важно отметить, что расчеты осуществляются по реальным данным с применением методов математического моделирования и на основе известных физических законов, выраженных в виде дифференциальных и интегро-дифференциальных уравнений. Каждое из составляющих в этих пунктах подвержено своим погрешностям, имеет свои

ошибки и неточности. Имеет место недостаток реальных данных, часто они недостоверны, бывают пропуски в рядах наблюдений, заметные погрешности и пр. Применяемые для расчетов модели и методы не полностью адекватны реальности, они основаны на различных приближениях и гипотезах, которые только приблизительно описывают реальность. Разностные приближения в дифференциальных моделях достаточно грубы, не описывают процессы на мелких и подсеточных масштабах. Все это требует развития и совершенствования методов анализа, чему и посвящено применение динамико-стохастических методов для усвоения данных наблюдений. В данной работе представлено применение авторского гибридного метода, реализованного на суперкомпьютере Ломоносов-2 для реальных наблюдений в Атлантике, проводимых в 1991-1995 гг.

В работе сделан акцент на климатические изменения процессов в океане. Глубоководных станций мало, каждая из них представляет большой интерес, и важно оценить, как конкретные данные наблюдений влияют на долгопериодную изменчивость динамических величин в океане. Следует отметить, что глубоководные эксперименты Институтом океанологии в южной части Атлантики после 1995 г не проводились, поэтому важно использовать имеющийся уникальный материал.

Модельные эксперименты

В процессе численных экспериментов получены оценки меридионального переноса водных масс по результатам математического моделирования с усвоением данных наблюдений с особым акцентом на перенос Антарктических Донных Вод (ААДВ). В качестве математической модели использована глобальная совместная модель MPI-ESM (Earth System Model [1]), которая установлена в настоящий момент на суперкомпьютере в Германском Вычислительном Центре (DKRZ, Гамбург, Германия). Использовалась ее версия высокого разрешения в 0.2° по океану, то есть около 20 км. Для усвоения данных разработан оригинальный алгоритм, обобщающий схемы Калмана, известные в литературе как фильтр Калмана [2], протестированный для океанских моделей и детально описанный в [3]. Преимущества данного алгоритма в том, что он учитывает не только разницу между моделью и данными наблюдений, но и тенденцию (временную производную) как в модели, так и в данных наблюдений.

В работе были усвоены 6 разрезов профилей температуры и солёности от поверхности (0-6 м) до дна (до 5720 м), всего около 650 станций, выполненных судами Института Океанологии им. П.П.Ширшова РАН под руководством проф. Морозова Е.Г. Схемы разрезов показаны на рис.1.

Общая схема эксперимента была следующей: сначала модель разгонялась на 150 лет. А именно, в качестве начальных данных (initial conditions) для океанской части использовались средние "исторические" значения температуры и солёности 1850 г. из атласов наблюдений [4]. Для атмосферной части из

архивов брались соответствующие значения (аэрозоли, озон и др.). С этим начальными условиями проводилась интеграция с интервалами расчетов от месяца до года для накопления рестартовых значений. Таким образом, модель выводилась на стационарный счет, а значения рестартов (характеристики океана и атмосферы) архивировались и из них формировались массивы для статистической обработки.

Далее на суперкомпьютере Ломоносов-2 с условного 1900 г. проводился расчет до 1993 г. и усвоение данных на один момент времени, условный 1993 г., хотя реально разрезы выполнялись в течение нескольких месяцев.

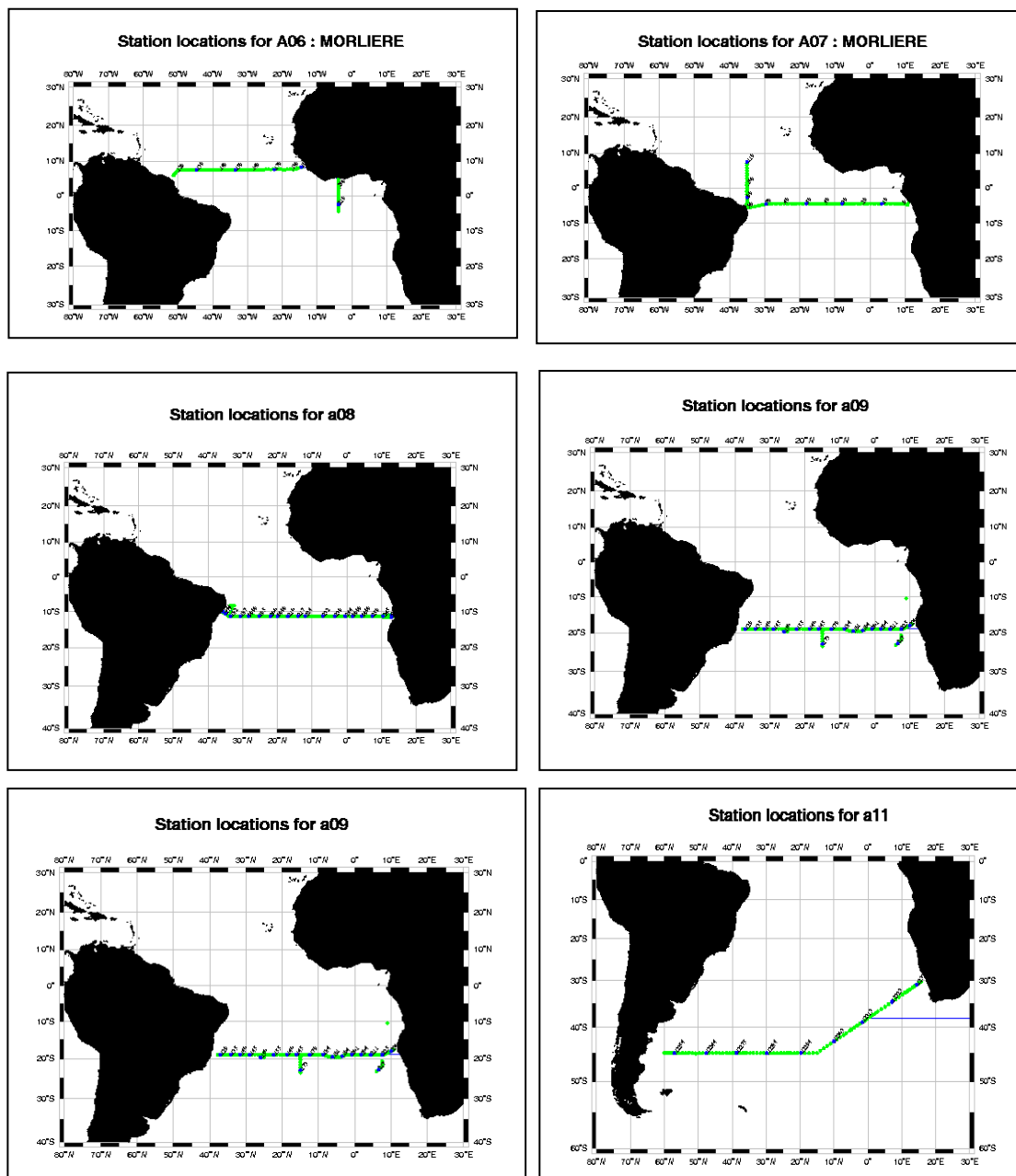
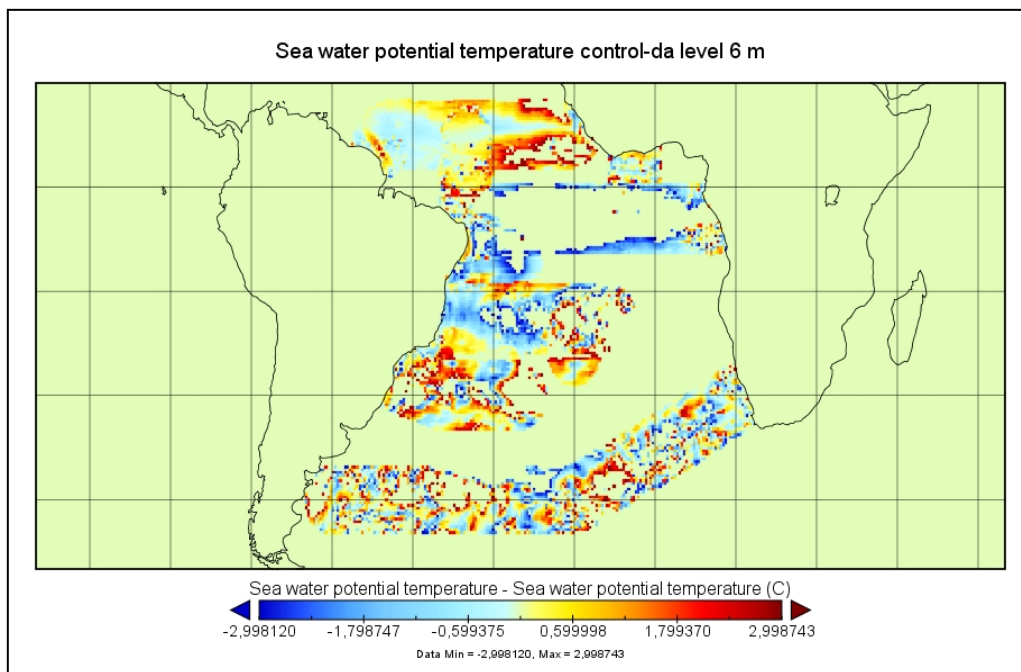


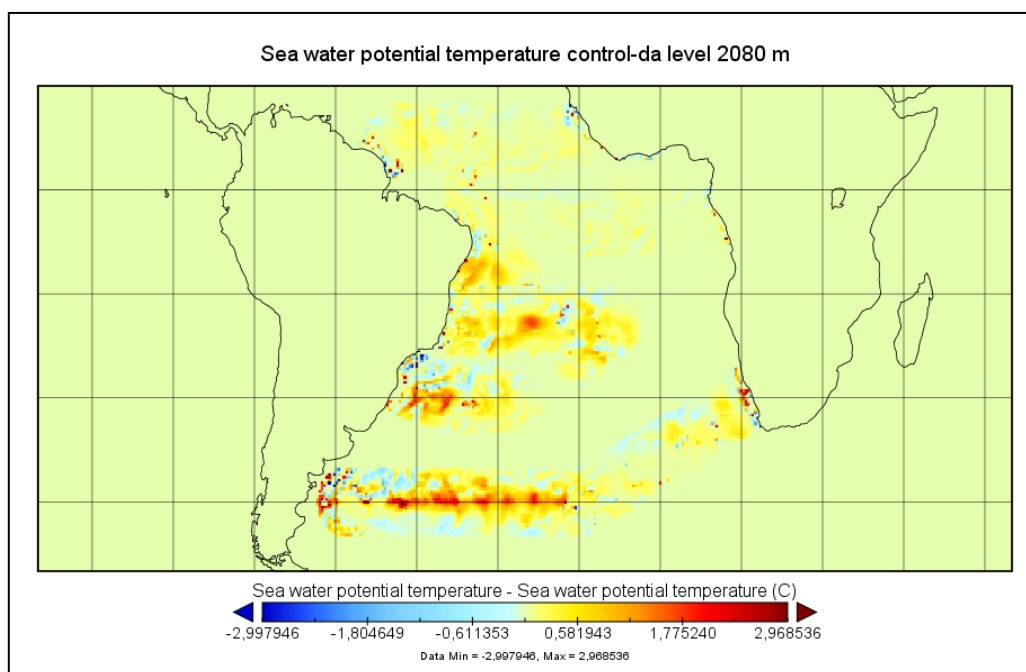
Рис. 1. Схемы расположения станций глубоководных экспериментов ИО РАН

В предыдущих исследованиях [5], было установлено, что для авторского гибридного метода усвоения достаточно массива порядка 50 значений по каждой характеристике океана (температура, соленость, горизонтальные и вертикальные скорости, уровень океана и др.). Полученный расчет поля сравнивался с аналогичным расчетом, но без усвоения, контрольным расчетом.

На рис. 2 показана разница в полях температуры на различных уровнях (горизонтах).



(a)



(б)

Рис. 2. Разница полей потенциальной температуры контрольного значения и усвоенных данных на глубине: а) 6 м; б) 2080 м

Рис. 2а показывает разницу на поверхности (6 м), рис. 2б - на уровне 2080 м. Хорошо видно, что, несмотря на то, что сам разрез имеет стандартную форму линии, эта разница имеет заметно выраженный анизотропный характер и показывает сложное взаимодействие полей различных характеристик при усвоении данных. На больших глубинах данных наблюдений в экспериментах было значительно меньше, что видно из разницы наблюдаемых и модельных характеристик.

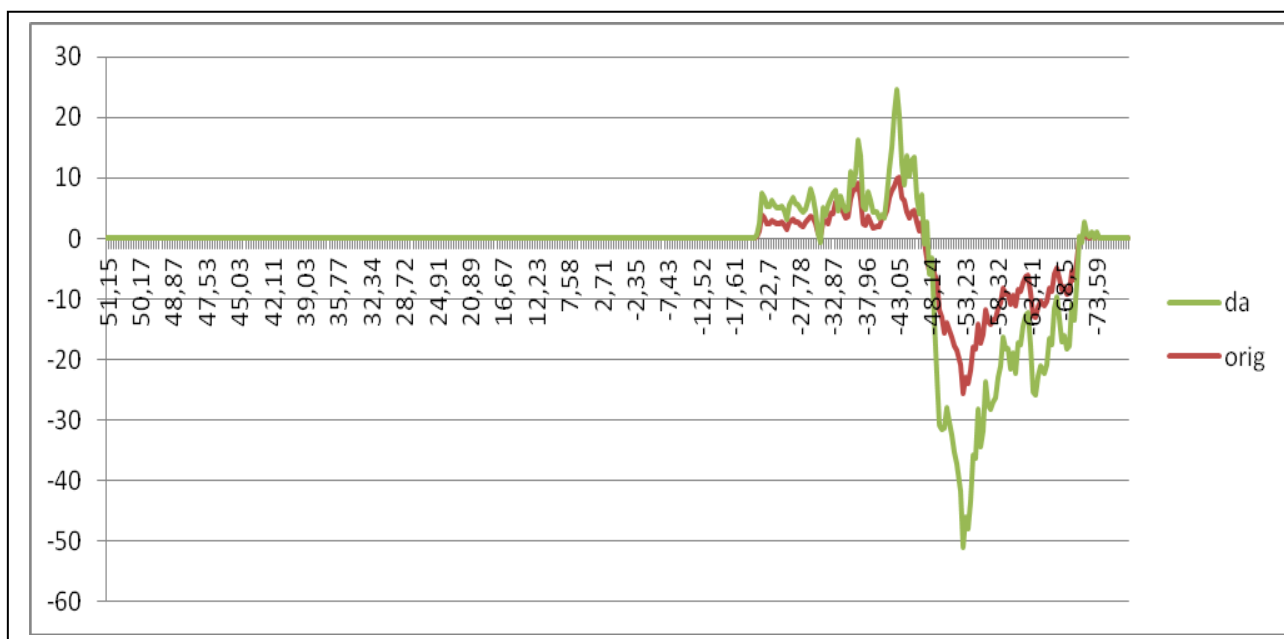
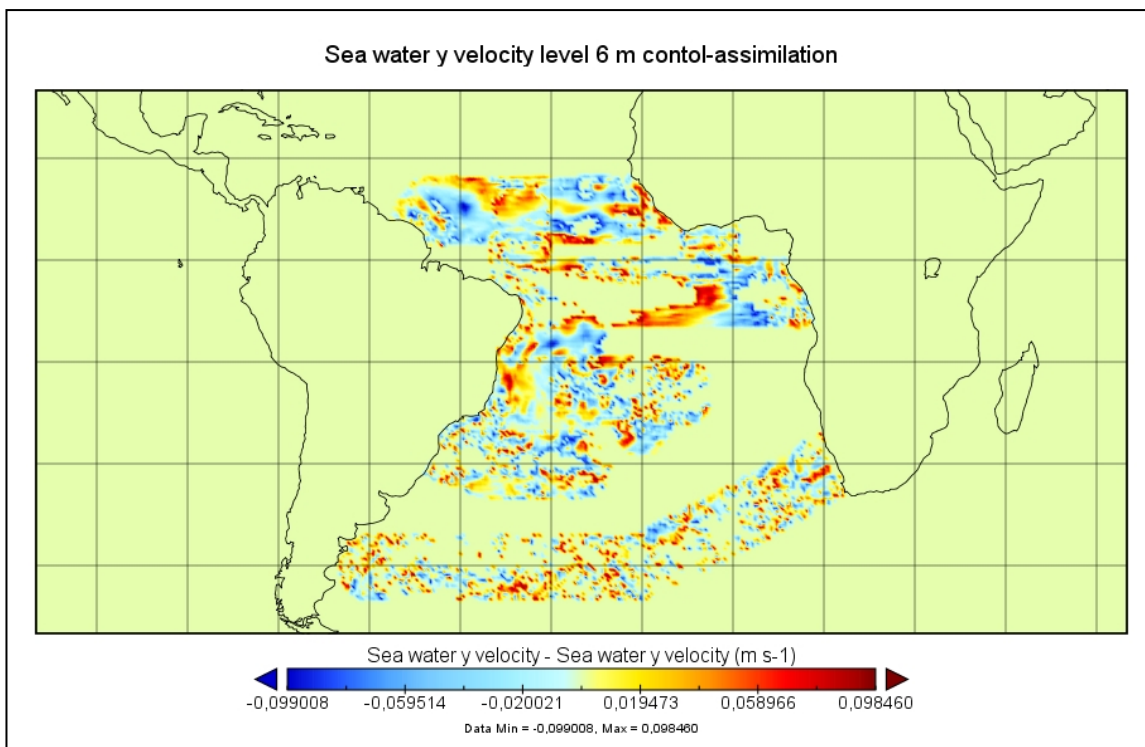


Рис. 3. Картина переноса ААДВ до (красная кривая) и после усвоения (зеленая линия) на горизонтах от 3395 м до дна 5720 м при потенциальной температуре меньше 1.9°C

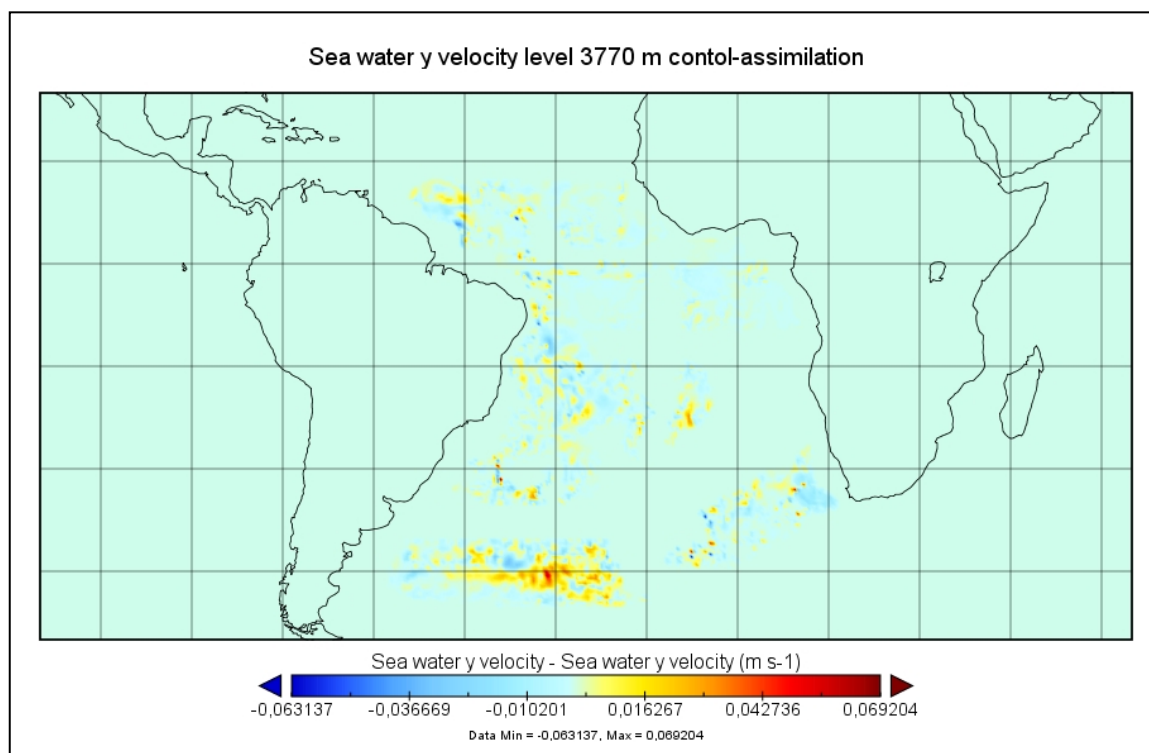
На рис. 3 показан меридиональный перенос массы в Южной Атлантике. Меридиональный перенос водных масс рассчитывался как общий, так и отдельно для массы ААДВ, которая выделялась по критерию ТП < 1.9°C, где ТП обозначает потенциальную температуру воды.

В работе проводились и анализировались соответствующие оценки с усвоением данных и сравнивались с контрольными оценками без усвоения данных наблюдений. Известно, что регионы экспериментов, где отбирались пробы воды для сбора наблюдений, отличаются особым влиянием на климат планеты. По результатам исследований можно сделать вывод, что расчет переносов тепла и массы в глубоких слоях океана с использованием методов усвоения может существенно скорректировать имеющиеся к настоящему времени оценки.

На рис. 4 показано, как изменилось значение вертикальных скоростей, характеризующих перенос водных масс, после усвоения данных наблюдений.



(a)



(б)

Рис. 4. Разница скоростей контрольного значения и усвоенных данных на глубине: а) 6 м; б) 3770 м

Заключение

Проведенные численные эксперименты позволяют сделать вывод, что модельные климатические поля после усвоения данных наблюдений соответствуют природным тенденциям.

Проанализирована физическая и математическая состоятельность применяемого в работе метода, а также его практическая реализуемость в сравнении с другими аналогичными методами.

Показано, что применение методов усвоения существенно корректирует количественно и качественно характеристики модельных физических полей. Это замечено не только для непосредственно наблюдаемых и используемых в процессе усвоения величин, но и для косвенных оценок, таких как перенос тепла и массы. Полученные поправки могут быть весьма значимыми и достигать 70-80% от модельных расчетов без усвоения.

Краткосрочные прогнозы в данном контексте не строились, а изучалась исключительно климатическая (долгосрочная) изменчивость. Оценки точности для краткосрочных прогнозов в Южной Атлантике дать невозможно, так как отсутствуют синоптические данные в глубинных слоях для этого региона.

Работа ведется в рамках тем государственного задания «Математические методы анализа данных и прогнозирования» (ФИЦ ИУ РАН) и № 0149-2018-0003 (ИО РАН).

Литература

1. Jungclaus J.H., Fischer N., Haak H., Lohmann K., Marotzke J., Matei D., Mikolajewicz U., Notz D., Storch J.S. Characteristics of the ocean simulations in the Max Planck Institute Ocean Model (MPIOM) the ocean component of the MPI-Earth system model // JAMES. — 2013, Issue 2. — P. 422-446. <https://doi.org/10.1002/jame.20023>.
2. Kalnay E., Ota Y., Miyoshi T., Liu J. A simpler formulation of forecast sensitivity to observations: application to ensemble Kalman filters // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. — 2012. — 64:1. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v64i0.18462>.
3. Belyaev K.P., Kirchner I., Kuleshov A.A., Tuchkova N.P. Numerical Realization of Hybrid Data Assimilation Algorithm in Ensemble Experiments with the MPIESM Coupled Model. In: Velarde M., Tarakanov R., Marchenko A. (eds). The Ocean in Motion. Springer Oceanography. — 2018. — P. 447-459. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4_27.
4. Antonov J.I., D. Seidov T.P., Boyer R.A. Locarnini, A. V. Mishonov, H. E. Garcia, O. K. Baranova, M. M. Zweng, and D. R. Johnson, 2010. World Ocean Atlas 2009. — V. 2: Salinity. S. Levitus (ed.) NOAA Atlas NESDIS 69, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. — P. 184 URL:ftp://ftp.nodc.noaa.gov/pub/WOA09/DOC/woa09_vol2_text.pdf.

5. Kaurkin M.N., Ibraev R.A., Belyaev K.P. Data assimilation in the ocean circulation model of high spatial resolution using the methods of parallel programming // *Russian Meteorology and Hydrology*. — 2016. — V. 41. — Issue 7. — P. 479-486. <https://doi.org/10.3103/S1068373916070050>.

References

1. Jungclaus J.H., Fischer N., Haak H., Lohmann K., Marotzke J., Matei D., Mikolajewicz U., Notz D., Storch J.S. Characteristics of the ocean simulations in the Max Planck Institute Ocean Model (MPIOM) the ocean component of the MPI-Earth system model // *JAMES*. — 2013, Issue 2. — P. 422-446. <https://doi.org/10.1002/jame.20023>.
2. Kalnay E., Ota Y., Miyoshi T., Liu J. A simpler formulation of forecast sensitivity to observations: application to ensemble Kalman filters // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. — 2012. — 64:1. URL:<https://doi.org/10.3402/tellusa.v64i0.18462>.
3. Belyaev K.P., Kirchner I., Kuleshov A.A., Tuchkova N.P. Numerical Realization of Hybrid Data Assimilation Algorithm in Ensemble Experiments with the MPIESM Coupled Model. In: Velarde M., Tarakanov R., Marchenko A. (eds). *The Ocean in Motion*. Springer Oceanography. — 2018. — P. 447-459. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4_27.
4. Antonov J.I., D. Seidov T.P., Boyer R.A. Locarnini, A. V. Mishonov, H. E. Garcia, O. K. Baranova, M. M. Zweng, and D. R. Johnson, 2010. *World Ocean Atlas 2009*. — V. 2: Salinity. S. Levitus (ed.) NOAA Atlas NESDIS 69, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. — P. 184 ftp://ftp.nodc.noaa.gov/pub/WOA09/DOC/woa09_vol2_text.pdf.
5. Kaurkin M.N., Ibraev R.A., Belyaev K.P. Data assimilation in the ocean circulation model of high spatial resolution using the methods of parallel programming // *Russian Meteorology and Hydrology*. — 2016. — V. 41. — Issue 7. — P. 479-486. <https://doi.org/10.3103/S1068373916070050>.