

УДК 551.465

ОБОБЩЕННЫЙ МЕТОД ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИИ (ОМЕГА)

© 1997 г. Ю. А. Иванов, К. В. Лебедев, А. С. Саркисян

Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН

Институт вычислительной математики РАН

Поступила в редакцию 16.05.97 г., после доработки 07.07.97 г.

При моделировании климата океана на основе исторических данных по температуре (T) и солёности (S) возникает проблема, связанная с отсутствием наблюдений в некоторых районах океана или их статистической недостоверностью. Традиционные подходы к решению этой проблемы связаны с применением методов объективной интерполяции и сглаживания полей T и S на акватории океана. В отличие от этих статистических методов в данной статье разработан обобщенный метод гидродинамической адаптации (ОМЕГА), который на основе модели общей циркуляции океана позволяет восстановить поля T и S в областях, не обеспеченных наблюдениями, и сохранить их в первоначальном виде для статистически обеспеченных наблюдениями областей. На заключительном этапе для получения сбалансированных полей температуры, солёности и течений на всей акватории океана проводятся расчеты по модели в режиме диагност-адаптация до выхода системы на квазистационарное состояние. Приведены результаты первых численных экспериментов по модели, иллюстрирующие эффективность ОМЕГА при восстановлении гидрофизических полей океана для двух районов северной Атлантики.

В настоящее время центральной проблемой океанологии является создание реалистичной модели климата океана, на основе которой можно было бы получить гидрофизические поля и определяющие параметры климатической системы. В работах [1, 2] был предложен метод гидродинамической адаптации (в первых публикациях он был назван полудиагностическим методом) для согласования с граничными условиями, рельефом дна и системой уравнений гидротермодинамики океана заданных из наблюдений полей температуры, солёности (плотности) и рассчитанных полей течений.

Модель общей циркуляции океана, в рамках которой осуществляется диагност и адаптация гидрофизических полей в данной работе, описывается полной системой уравнений гидротермодинамики океана в сферической системе координат, записанных в известных традиционных приближениях [3]. В качестве интегральной функции используется уровень океана, что существенно упрощает решение задачи в многосвязных областях океана и обладает рядом других преимуществ [2–5].

Численная реализация модели подробно описана в работах [4, 5]. Уравнение для уровня океана выводится в разностном виде из разностных аналогов полной нелинейной нестационарной системы уравнений движения и неразрывности и согласовано с разностными краевыми

условиями для скорости. Разностная задача для уровня представляется в виде эллиптического уравнения со смешанными производными и граничными условиями в виде косых производных от уровня – задача Пуанкаре [6]. Численная схема удовлетворяет основным законам сохранения, имеющим место в исходной постановке [7].

На основе анализа многочисленных расчетов гидрофизических полей методом гидродинамической адаптации в отдельных районах Мирового океана и в морях можно сделать следующие выводы: для получения в модели реалистичных гидрофизических полей важную роль играет совместный эффект бароклинности и рельефа дна (СЭБИР), который впервые был описан в работе А.С. Саркисяна [8] (в ряде последующих работ подчеркивается необходимость точного задания рельефа дна для правильного описания этого эффекта [9, 10]); скорости течений, полученные в результате адаптации, хорошо согласуются с данными инструментальных измерений течений [5, 11]; в адаптированных полях практически не содержится шума, который существенно проявляется при диагностических расчетах вследствие неполной гидродинамической сбалансированности полей [12]; процесс адаптации имеет диссипативно-волновой характер [13, 14]. Продолжительность процесса адаптации верхних слоев океана составляет в умеренных широ-

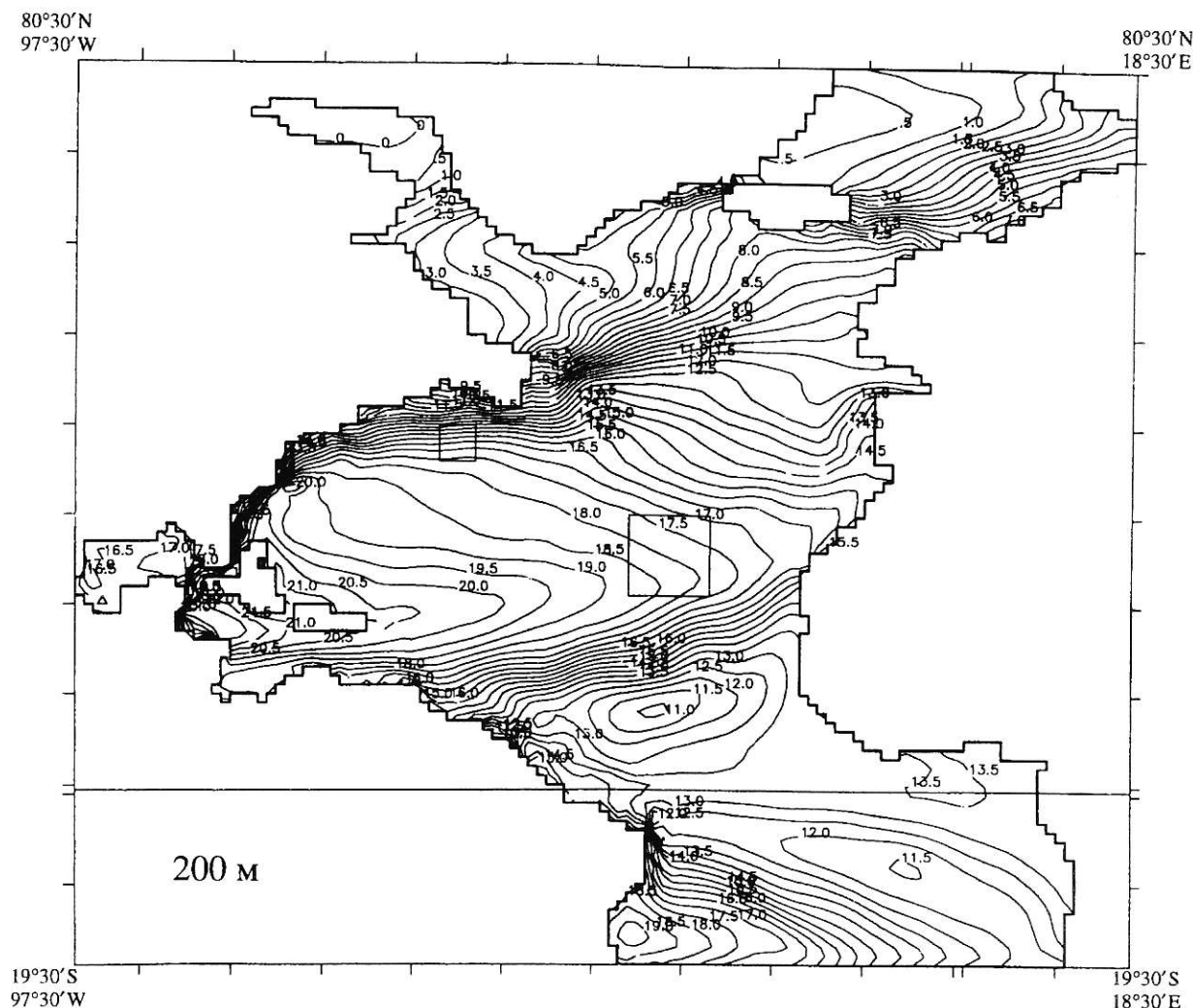


Рис. 1. Исходное поле температуры для северной Атлантики. Квадратами отмечены области, начальные гидрофизические поля в которых были искусственно деформированы.

тах несколько суток [11, 13, 15]; в экваториальной области продолжительность модельного адаптационного процесса значительно увеличивается и достигает нескольких месяцев [14, 15].

При описании климата океана на основе модели общей циркуляции океана, работающей в режиме диагноз-адаптация, используются климатические массивы данных гидрологических наблюдений. В 1994 г. под руководством С. Левитуса [16, 17] был создан климатический массив практически всех данных наблюдений температуры и солёности в Мировом океане. Данные наблюдений были осреднены в одноградусных квадратах. Однако в ряде районов Мирового океана средние по квадратам оказались статистически не обеспеченными или вовсе отсутствовали. Поэтому полученный одноградусный массив был подвергнут применению процедур

сглаживания и объективному анализу. В результате были получены полные массивы данных температуры и солёности. Однако они приобрели и существенный недостаток: гидрологические поля оказались в значительной степени сглаженными. В отличие от этого статистического подхода к восстановлению гидрофизических полей в районах, не обеспеченных данными наблюдений, мы предлагаем использовать Обобщенный метод гидродинамической адаптации (ОМЕГА).

Суть метода состоит в следующем.

1. Акватория океана разбивается на области, где осредненные по квадратам данные T и S статистически обеспечены, и области, где наблюдения отсутствуют или статистически не обеспечены.

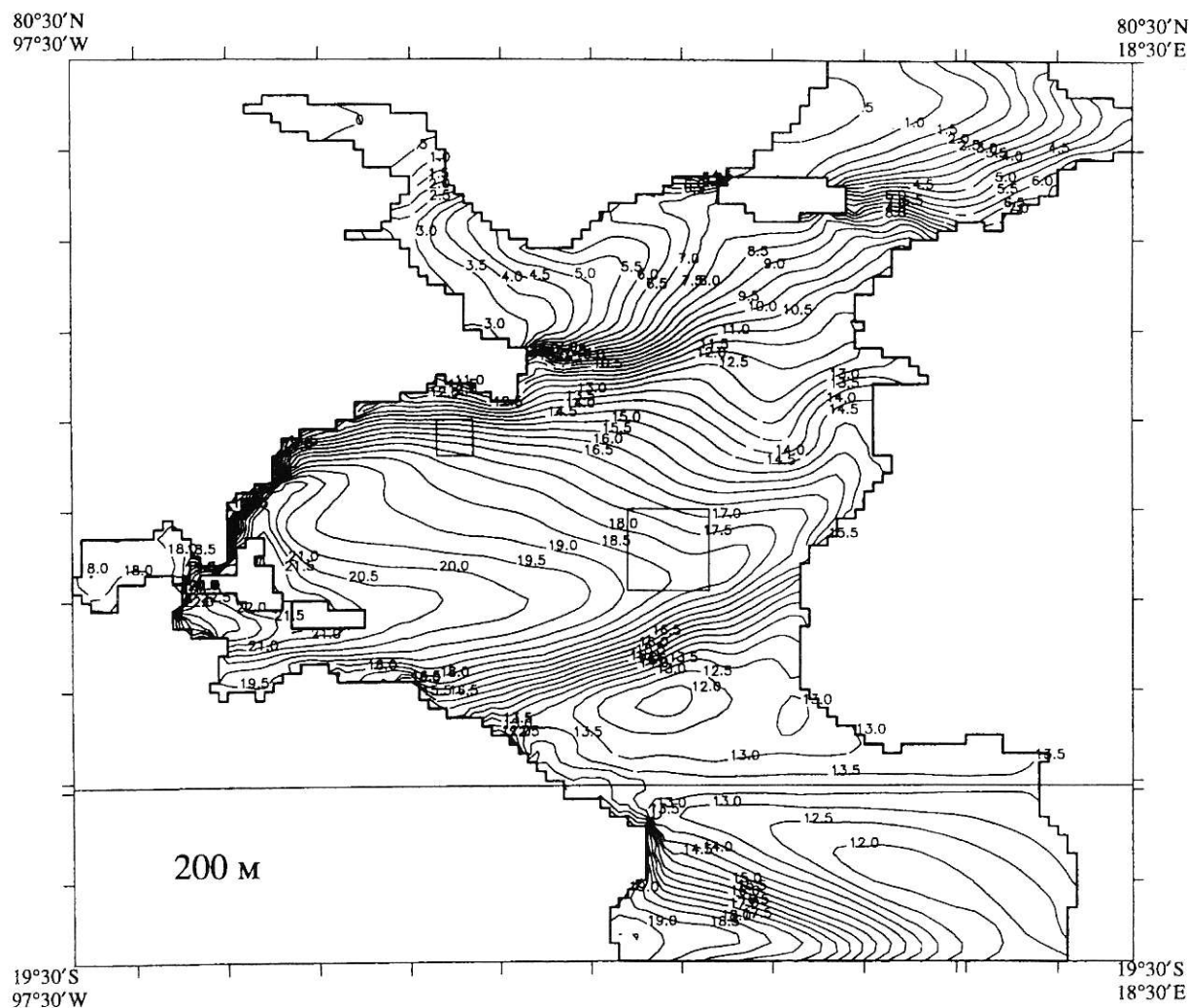


Рис. 2. Поле температуры для северной Атлантики после "классической" адаптации за 180 суток модельного времени.

2. В областях, не обеспеченных данными наблюдений, значения T и S задаются средними (по горизонтам) значениями для всей области или путем линейной интерполяции между точками, в которых наблюдения статистически обеспечены.

3. В областях, обеспеченных данными наблюдений, задаются наблюдаемые статистически обеспеченные поля T и S .

4. Для получения полей течений проводится диагностический расчет для всей акватории океана.

5. Данные диагноза и поля T и S используются как начальные условия и проводится адаптационный расчет. В настоящей работе время адаптации составляло 10 суток модельного времени.

6. Делается серия расчетов диагноз-адаптация (пункты 3, 4, 5), при этом в областях, статистически обеспеченных данными, поля T и S пе-

риодически восстанавливаются (пункт 3), оставаясь таким образом неизменными. В областях, не обеспеченных данными, температура и соленость берутся из предыдущего адаптационного расчета (пункт 5). Критерием окончания серии подобных расчетов служит выход решения в восстанавливаемых областях на квазистационарный режим. Таким образом завершается восстановление полей T и S в областях, не обеспеченных наблюдениями. То есть при применении ОМЕГА гидродинамическое приспособление происходит фактически только в областях, где данные измерений отсутствовали или их было мало.

7. На заключительном этапе для согласования климатических полей проводится диагноз и адаптация до выхода решения для всей акватории океана на квазистационарное состояние.

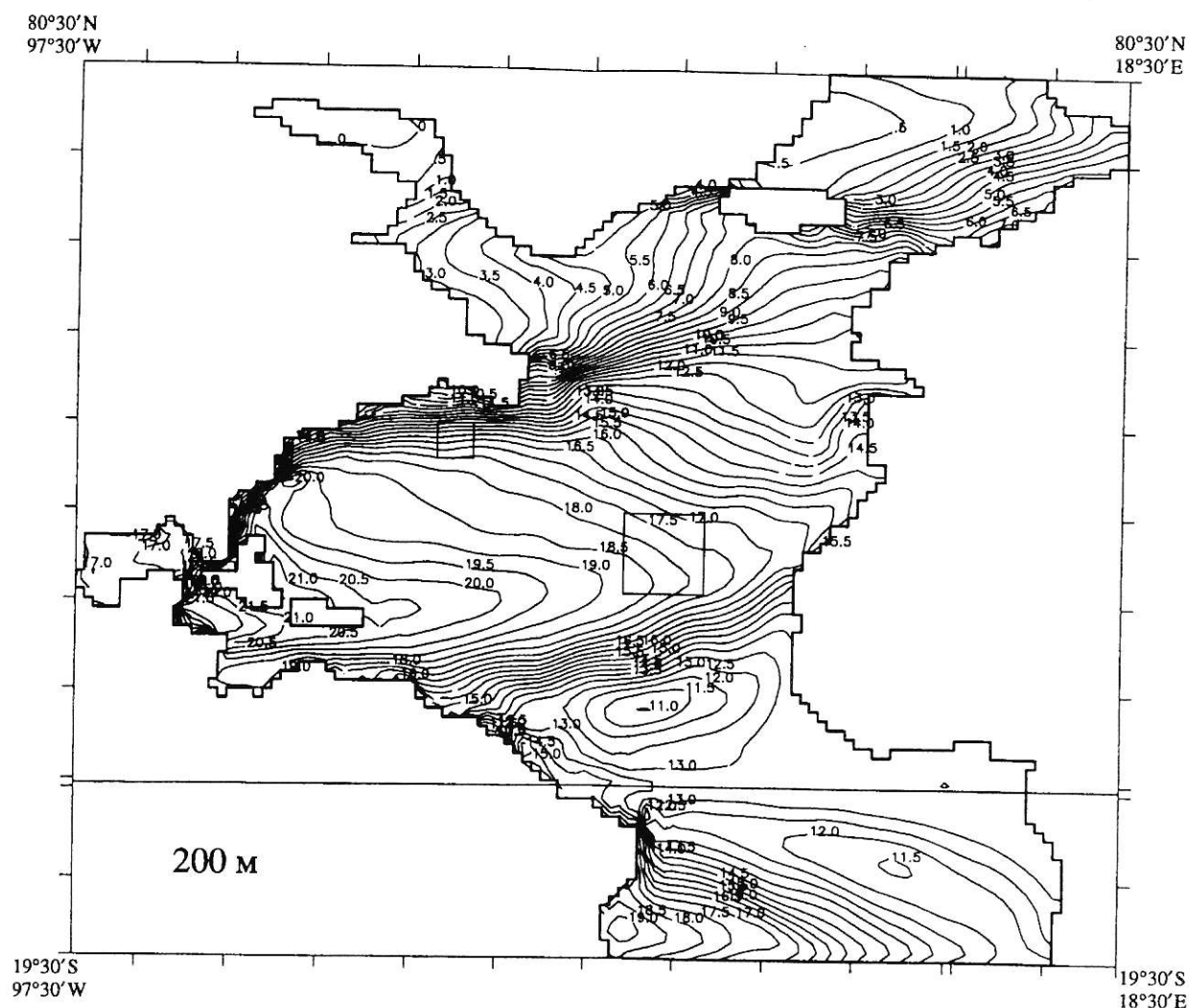


Рис. 3. Поле температуры для северной Атлантики после ОМЕГА (180 суток).

Следует отметить, что ОМЕГА может применяться и в случаях, когда одна часть горизонтов хорошо обеспечена данными, а другая нет, или, например, данных по температуре много, а по солёности мало.

Для демонстрации возможностей предлагаемого в работе метода была проведена серия численных экспериментов по модельному восстановлению гидрофизических полей для двух районов северной Атлантики. В качестве начальных полей были взяты среднегодовые климатические поля из массива Левитуса World Ocean Atlas 1994 [16, 17]. На основе предварительных тестов при адаптационных расчетах были приняты следующие коэффициенты горизонтального и вертикального турбулентного обмена: для импульса 6×10^7 и $10 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, для тепла и соли 2×10^7 и $1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, и выбраны две области для восстановления гидрофизических полей обобщенным методом гидродина-

мической адаптации (рис. 1). Первая – девятиградусный квадрат, расположенный в срединной части северной Атлантики и ограниченный координатами 21.5°N – 30.5°N и 27.5°W – 36.5°W , характеризуется слабыми течениями. Вторая – четырехградусный квадрат, расположенный непосредственно в струе Северо-Атлантического течения и ограниченный координатами 36.5°N – 40.5°N и 53.5°W – 57.5°W , напротив, характеризуется достаточно интенсивным течением. В этих районах значения температуры и солёности были заданы на основе линейной интерполяции между средними значениями для северной и южной границ областей, т.е. были искусственно деформированы и взяты в качестве начальных условий в задаче модельного восстановления гидрофизических полей.

Было выполнено два численных эксперимента. В первом (рис. 2) для восстановления полей делалась “классическая” процедура гидродинами-

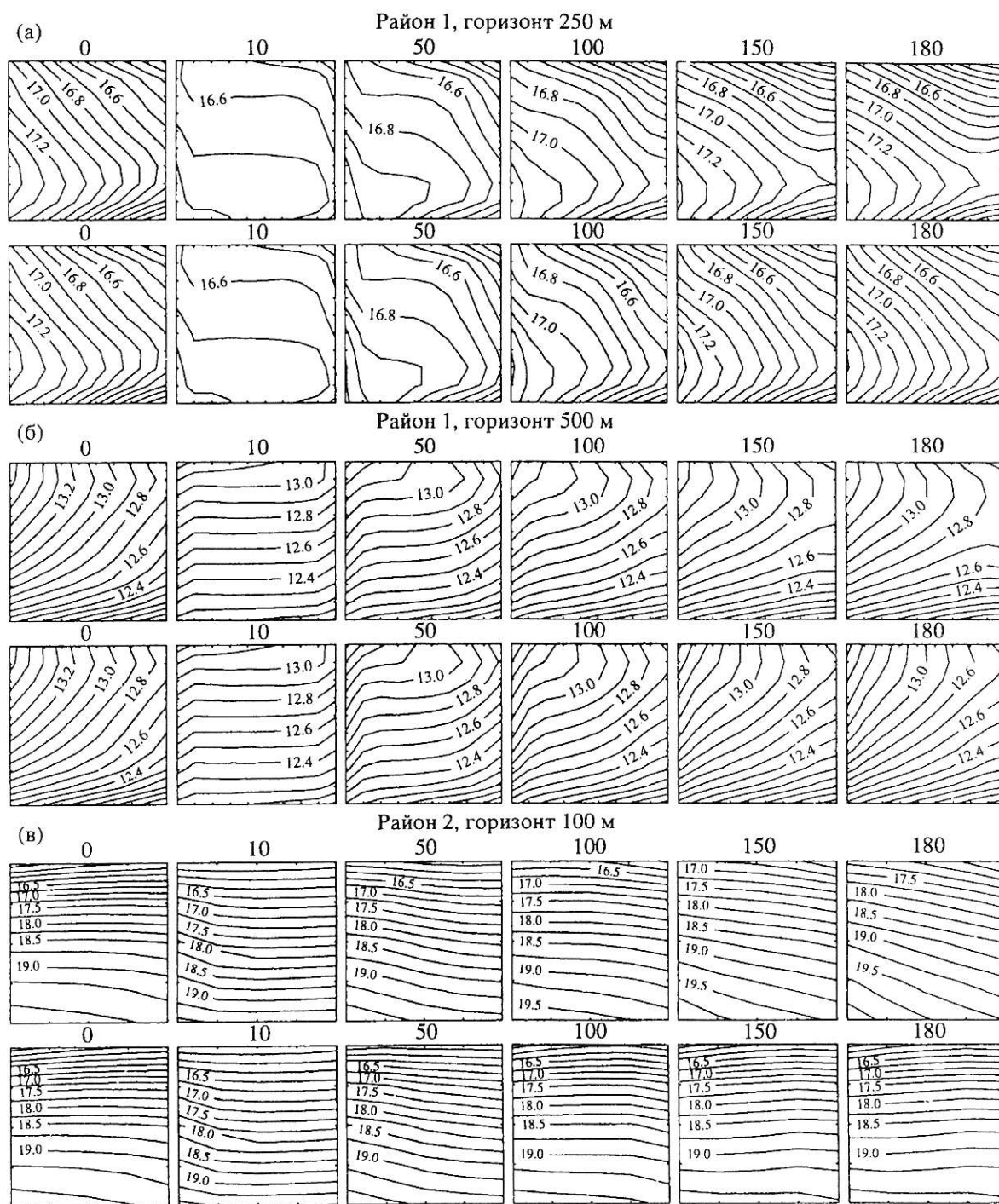


Рис. 4. Эволюция полей температуры для района 1 горизонт 250 м (а), 500 м (б) и района 2 горизонт 100 м (в). Цифры в верхней части рисунка обозначают длительность адаптации и ОМЕГА в сутках, цифра 0 соответствует исходным недеформированным полям.

ческой адаптации [12]. Во втором (рис. 3) был использован предлагаемый в данной работе обобщенный метод гидродинамической адаптации, в рамках которого было выполнено 17 адаптационных расчетов длительностью 10 суток каждый.

Из сравнения этих рисунков между собой и с исходными полями (рис. 1) нетрудно видеть, что поля, восстановленные в результате применения ОМЕГА, оказываются очень близкими к исходным. Применение “классической” адаптационной

процедуры позволяет восстановить основные качественные особенности гидрофизических полей. Однако из-за того, что для восстановления полей требуется достаточно большое модельное время (около полугода), полученные таким способом поля с одной стороны оказываются заметно более сглаженными, чем исходные, с другой – в некоторых областях океана вне районов восстановления происходят качественные изменения структуры гидрофизических полей, особенно заметные в районе средних широт в западной и восточной областях Атлантики в виде вытянутых “языков” изолиний. Это связано не только с неточной параметризацией процессов турбулентности, которая начинает значительно сказываться при длительной адаптации полей, но также и с тем, что начальное возмущение, заданное в области, при длительном интегрировании начинает распространяться в окружающие область точки и приводит к деформации и порче полей в соседних с этой областью районах (рис. 2). ОМЕГА же, напротив, препятствует распространению возмущений из восстанавливаемой области в окрестные точки (рис. 3).

На рис. 4 представлена эволюция во времени процесса восстановления поля температуры для различных горизонтов в обоих выбранных для численных экспериментов квадратах. В каждой паре рисунков верхний ряд – это простая адаптация, нижний – это ОМЕГА. Видно, что в течение первых примерно 50 суток модельного времени (это время, необходимое для восстановления основной качественной структуры полей) в обоих случаях восстановление полей идет сходным образом. В дальнейшем классическая адаптация ведет не только к размыванию и уменьшению плотностных градиентов и соответственно скоростей течений, но и к изменению некоторых качественных особенностей полей.

Следует отметить, что на глубинных горизонтах процесс восстановления гидрофизических полей идет медленнее, чем в верхних слоях океана, и, соответственно, для восстановления полей на нижних горизонтах требуется проведение более длительных расчетов. Это естественным образом вытекает из того факта, что, как правило, в океане скорость течений убывает с глубиной. Поэтому применение ОМЕГА может включать на определенном этапе расчетов, когда в верхних слоях океана восстановление полей завершено (дальнейшее интегрирование уже не приводит к заметным изменениям), фиксацию восстановленных полей верхнего слоя.

Таким образом, показано, что предложенный обобщенный метод гидродинамической адаптации (ОМЕГА) может успешно использоваться для восстановления гидрофизических полей океана в рай-

онах отсутствия данных наблюдений или их недостаточной статистической обеспеченности.

Авторы выражают благодарность В.Б. Залесному за полезное обсуждение работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 96-05-65279).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sarkisyan A.S., Demin Yu.L. A semidiagnostic method of sea currents calculation // Large-scale oceanographic experiments in the WCRP publication series, Tokyo, 1983. V. 2. № 1. P. 201–214.
2. Саркисян А.С. О некоторых итогах и проблемах моделирования океана // Океанология. 1996. Т. 36. № 5. С. 647–658.
3. Иванов Ю.А., Лебедев К.В. Моделирование реакции северной Атлантики на нестационарное воздействие ветра // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 1996. Т. 32. № 5. С. 672–679.
4. Демин Ю.Л., Ибраев Р.А. Численная модель расчета течений и уровня в многосвязных областях океана. Препринт № 183. М.: ОВМ АН СССР, 1988. 26 с.
5. Ибраев Р.А. Реконструкция климатических характеристик течения Гольфстрим // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 1993. Т. 29. № 6. С. 803–814.
6. Марчук Г.И. О численном решении задачи Пуанкаре для океанической циркуляции // Докл. АН СССР. 1969. Т. 185. № 5. С. 1041–1044.
7. Bryan K. A numerical method for the study of the circulation of the World Ocean // J. Comput. Phys. 1969. V. 4. № 3. P. 347–376.
8. Саркисян А.С. О недостатках бароклинных моделей океанической циркуляции // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1969. Т. 5. № 8. С. 818–836.
9. Sheng J., Thompson K.R. A robust method for diagnosing regional shelf circulation from scattered density profiles // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. № C10. P. 25, 647–25, 659.
10. Ezer T., Mellor G.L., Greatbatch R.J. On the interpen-tadal variability of the North Atlantic Ocean: Model simulated changes in transport, meridional heat flux and coastal sea level between 1955–1959 and 1970–1974 // J. Geophys. Res. 1995. V. 100. № C6. P. 10, 559–10, 566.
11. Демин Ю.Л., Иванов Ю.А., Лебедев К.В., Усыченко И.Г. Расчет поля течений по модели диагноза и адаптации для района “Мегалополигона” // Океанология. 1990. Т. 30. № 4. С. 554–561.
12. Саркисян А.С. Моделирование динамики океана // СПб.: Гидрометеиздат, 1991. 306 с.
13. Демин Ю.Л., Иванов Ю.А., Лебедев К.В., Усыченко И.Г. Апробация численной модели динамики океана по данным измерений в эксперименте “Ме-

- гаполигон-87" // Эксперимент "Мегаполигон". М.: Наука, 1992. С. 319–330.
14. Булушев М.Г., Саркисян А.С. Энергетика начальной стадии адаптации экваториальных течений // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 1996. Т. 32. № 5. С. 600–612.
 15. Григорьян К.Г., Иванов Ю.А., Лебедев К.В., Саркисян А.С. Среднегодовой климат океана. Ч. 1. Циркуляция вод Мирового океана // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 1998. Т. 34. В печати.
 16. Levitus S., Burgett R., Boyer T.P. World Ocean Atlas 1994 // U.S. Govt. Print. Off. Washington, D.C., 1994. V. 3: Salinity. 99 p.
 17. Levitus S., Boyer T.P. World Ocean Atlas 1994 // U.S. Govt. Print. Off. Washington, D.C., 1994. V. 4: Temperature. 117 p.

Generalized Hydrodynamic Adjustment Method (GHDAM)

Yu. A. Ivanov*, K. V. Lebedev*, and A. S. Sarkisyan**

* Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Nakhimovskii pr. 36, Moscow, 117851 Russia

** Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, Leninskii pr. 32a, Moscow, 117334 Russia

Received May 16, 1997; in final form, July 7, 1997

Abstract—Modeling the ocean climate from historical data on temperature (T) and salinity (S) brings up the problem associated with the absence of observations in some regions of the ocean or their statistical unreliability. Traditional approaches to solving this problem are the use of methods of objective interpolation and smoothing of the fields T and S in the ocean area. A generalized hydrodynamic adjustment method (GHDAM) is presented in this paper. Unlike the above statistical methods, it is based on a model of the ocean general circulation and allows the reconstruction of T - and S -fields in unobserved areas and their retention in the initial form for the areas statistically provided with observations. To obtain balanced fields of temperature, salinity, and currents in the overall area of the ocean, model computations are performed within the diagnosis–adjustment regime until the system arrives at a quasi-stationary state. Results of the first numerical experiments carried out using the model that illustrate the efficiency of the GHDAM in reconstructing hydrophysical fields of the ocean for two regions of the North Atlantic are cited.