

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКЦИИ ОКЕАНА НА ПОТЕПЛЕНИЕ И ПОХОЛОДАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД

А. В. ЩЕРБАКОВ, В. В. МАЛАХОВА

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,  
Новосибирск, Россия  
e-mail: scherbak@sscc.ru*

The three-dimensional large scale geostrophic model of climate of World ocean with realistic topography is presented. The experiment on response of the model on variation surface temperature of ocean was carried out: at first warming on 1.5 grades in current 50 years, and then cooling on 1.5 grades. It has appeared, that ocean more strongly and longer reacts on cooling, than on warming.

Данные о палеоклимате [1] говорят о том, что климатические изменения носят периодический характер. Потепления сменяются похолоданиями и периоды этих колебаний изменяются от десятков до тысяч лет. В данной работе предпринята попытка промоделировать реакцию Мирового океана на изменчивость температуры поверхностных вод векового масштаба.

В работах авторов [2–4] приведено подробное описание используемой здесь квазигеострофической численной модели климата Мирового океана. Модель основана на решении трехмерных уравнений переноса тепла и соли на равномерной пятиградусной широтно-долготной сетке и неравномерной, сгущающейся к поверхности, сетке по вертикали. По горизонтальной координате применяется консервативная девятиточечная разностная схема второго порядка аппроксимации основанная на экстраполяции Ричардсона [5], по вертикальной координате используется вторая схема с разностями против потока, которая имеет первый порядок аппроксимации [6]. Компоненты вектора скорости определяются из линейных уравнений движения через интегральную функцию тока и найденные температуру и соленость. На поверхности океана заданы сезонно изменяющиеся температура, соленость и напряжение трения ветра. На боковых границах и дне океана заданы нулевые потоки тепла и соли и условия скольжения.

В работе [3] было показано, что увеличение разрешения по вертикальной координате при коэффициенте вертикальной турбулентной диффузии тепла и соли  $0.2 \text{ см}^2/\text{сек}$  приводит к более реальной средней температуре Мирового океана. При увеличении разрешения по вертикали от 12 до 24 и 36 расчетных горизонтов средняя температура соответственно уменьшается от 4.2 до 3.9 и 3.8 градуса. Это происходит за счет уменьшения схемной вязкости. Если учесть, что средняя температура Мирового океана по данным измерений [7] составляет 3.62 градуса, то можно заключить, что при увеличении разрешения имеет место сходимость средней температуры модельного Мирового океана к ее истинному значению. Однако при дальнейшем увеличении разрешения по вертикали до 72 расчетных горизонтов, средняя температура океана стала равна 3.5 градуса, что уже меньше истинного значения и указывает на заниженность коэффициента турбулентной диффузии тепла и соли.

Возможно, об этом же говорят средние вертикальные профили тепла при разном разрешении, которые приведены на рис. 1. В верхнем слое до 400–500 м рассчитанное поле тепла для всех вариантов разрешения оказывается более холодным в сравнении с наблюдениями. Эффект повышения разрешения особенно заметен для первого расчетного горизонта каждой сетки. При увеличении разрешения от 12 к 24, 36 и 72 уровням разница с данными наблюдений уменьшается соответственно от 3.5 градусов до 2.1, 1.4 и 0.6 градуса.

В слое от 100 до 1000 м разница оказывается небольшой между решениями на всех сетках. Для глубокого океана уменьшение схемной вязкости оказывается более значимым. Увеличение разрешения дает менее сглаженную кривую, в результате чего значение температуры на последнем расчетном горизонте с увеличением разрешения изменяется от более теплых значений к более холодным по сравнению с наблюдаемыми данными. В этом слое в моделях с 12 и 24 уровнями вода оказывается более теплой, чем должна быть, а при 36 и 72 уровнями более холодной.

Средние вертикальные профили солености при увеличении разрешения от 12 до 24 и 36 уровней приближаются к данным наблюдений, хотя в глубоком океане и незначительно. А увеличение разрешения до 72 расчетных горизонтов дает слабое улучшение только в верхнем слое, а глубже 1000 м улучшения

\*Работа поддержана Интеграционным грантом СО РАН № 00–76.

© А. В. Щербаков, В. В. Малахова, 2001.

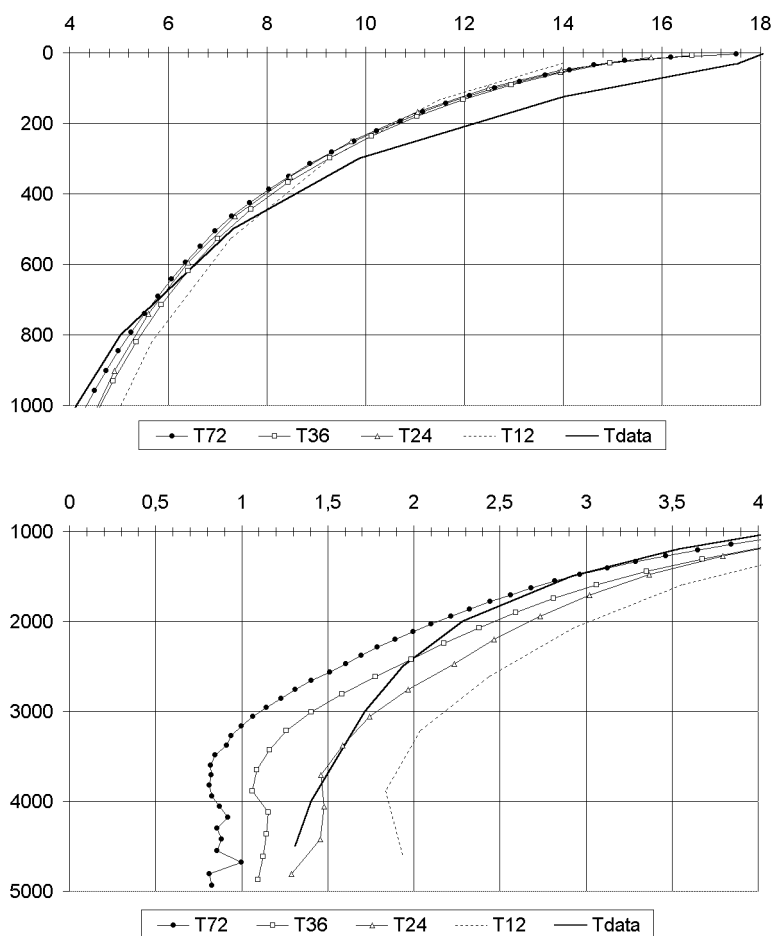


Рис. 1. Средние вертикальные профили температуры в модели океана с 12, 24, 36 и 72 уровнями в слое от 0 до 1000 м (верхний рисунок) и в слое от 1000 м до 5000 м (нижний рисунок).

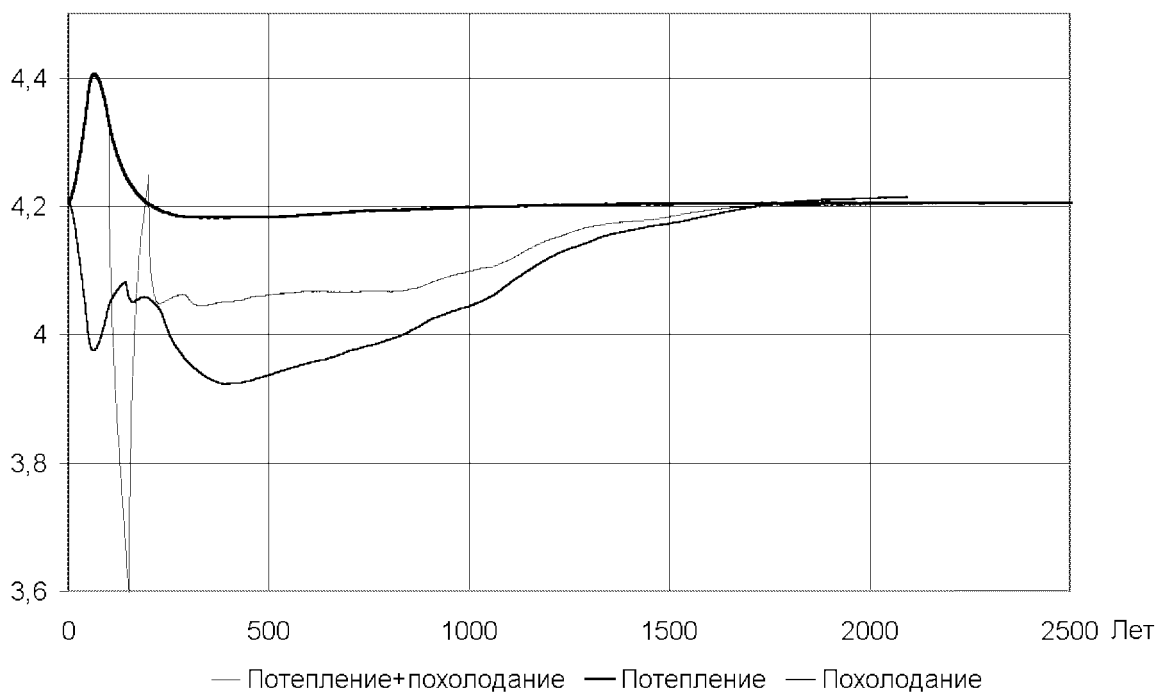


Рис. 2. Изменение средней температуры океана при “Потеплении”, “Похолодании” и “Потеплении-похолодании”.

нет. Причиной этого является, как показано в [4], отсутствие в модели параметризации высокосолёных средиземноморских вод.

Поэтому дальнейшие эксперименты по изучению реакции модели климата Мирового океана на колебания поверхностной температуры океана векового масштаба проводились с учетом параметризации высокосолёных средиземноморских вод [4]. Прделаны три эксперимента на сетке с разрешением 24 уровня по вертикали. Все эксперименты начинаются с одинакового климатического состояния, которое было получено в результате длительного интегрирования до квазиустановления со временем порядка 5000 лет [4].

В эксперименте “Потепление” сезонно изменяющаяся поверхностная температура океана в каждой точке широтно-долготной сетки, за исключением областей покрытых льдом, повышается на 0.03 градуса ежегодно в течение 50 лет, а затем также на 0.03 градуса понижается до первоначальных значений в течение 50 лет.

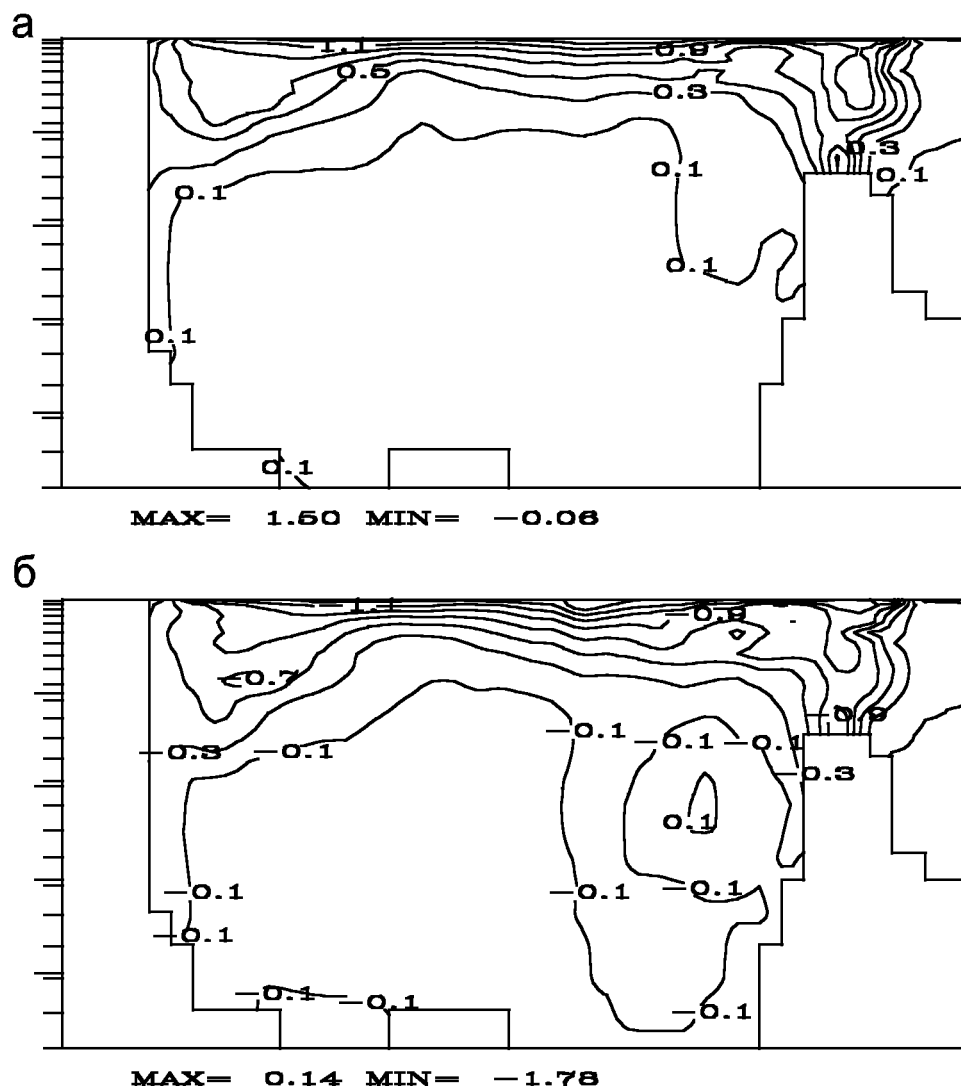


Рис. 3. Зонально средние отклонения тепла через 50 лет для а) “Потепления”, б) “Похолодания”.

В эксперименте “Похолодание” аналогичным образом температура поверхностных вод сначала понижается на 0.03 градуса ежегодно в течение 50 лет, а затем также на 0.03 градуса повышается до первоначальных значений в течение 50 лет.

В эксперименте “Потепление-похолодание” сначала аналогичным образом температура поверхностных вод повышается на 0.03 градуса ежегодно в течение 50 лет, а затем в течение 100 лет также на 0.03 градуса понижается, и наконец в следующие 50 лет с такой же скоростью повышается до первоначальных значений. Таким образом этот эксперимент объединяет вместе два предыдущих.

Изменение средней температуры Мирового океана для всех трех экспериментов приведено на рис. 2. В экспериментах “Потепление” и “Потепление-похолодание” средняя температура океана изменяется одинаково в первые 100 лет в силу идентичности экспериментов до этого момента. После окончания нагрева поверхностных вод через 50 лет средняя температура увеличилась на 0.2 градуса и в течение 10–20 лет продолжает еще медленно расти достигая максимальных значений. Далее в эксперименте “Потепление” во время 50 лет охлаждения поверхностных вод средняя температура медленно уменьшается и продолжает уменьшаться далее в течение еще 100 лет и после окончания охлаждения поверхностных вод до значений меньших исходных, и лишь потом очень медленно растет до начальных значений.

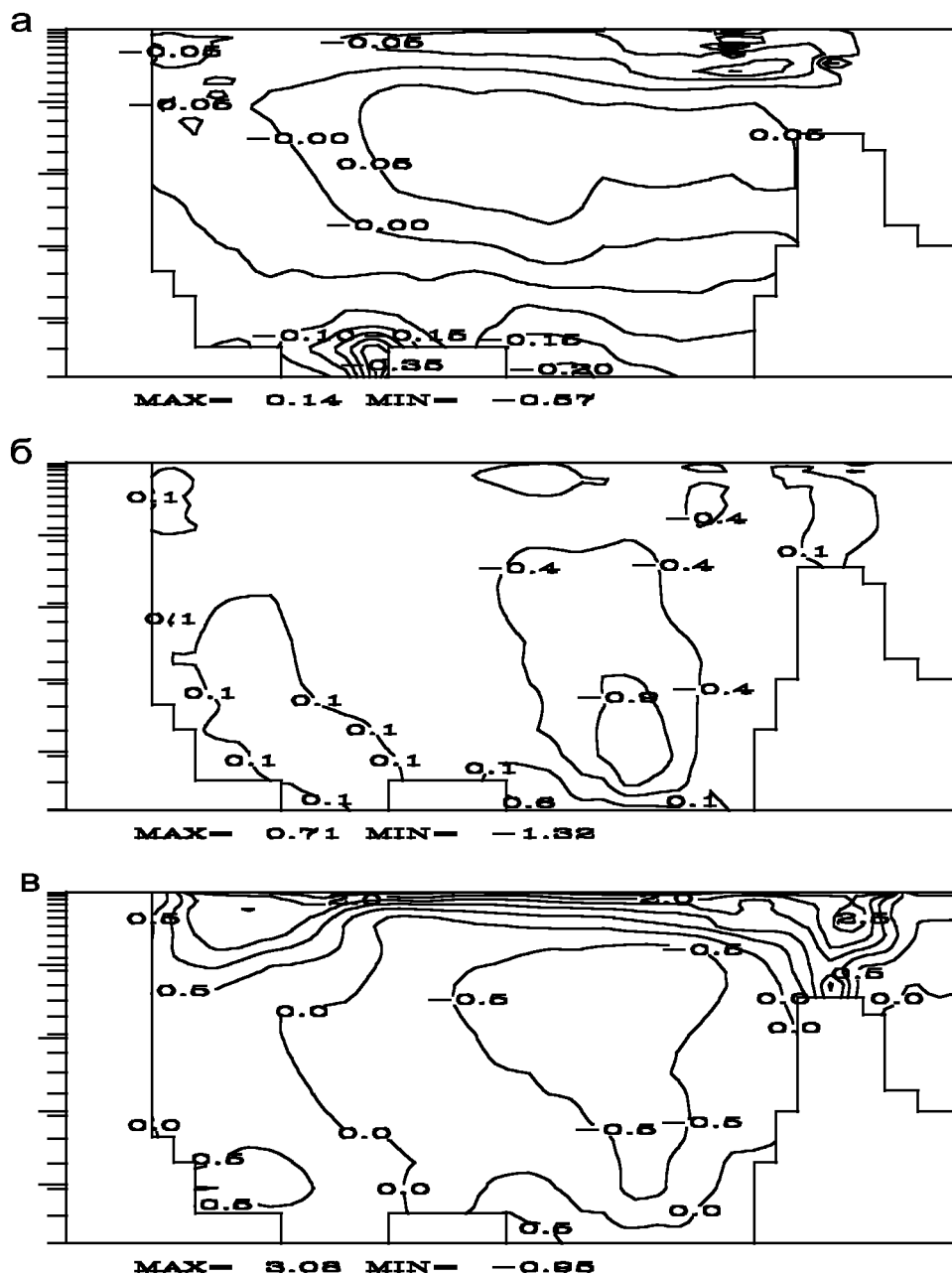


Рис. 4. Зонально средние отклонения тепла через 200 лет для а) “Потепления”, б) “Потепления+Похолодания”, в) “Похолодания”.

Сложнее ведет себя средняя температуры океана в эксперименте “Похолодание”, с началом охлаждения поверхностных вод медленно уменьшается примерно на 0.2 градуса, после окончания охлаждения продолжает еще 10–20 лет медленно охлаждаться, хотя поверхностные воды уже начали прогреваться. Затем средняя температура увеличивается вместе с увеличением температуры поверхностных вод и продолжает

увеличиваться еще 40 лет после того как температуры поверхностных вод достигла начальных значений. Далее после кратковременного в несколько лет понижения и десятилетнего повышения продолжается длительное понижение средней температуры в течение 200 лет. И только после этого средняя температура океана начинает увеличиваться и через 1600 лет приближается к первоначальным значениям.

Таким образом модель океана на потепление поверхностных вод отвечает кратковременным повышением средней температуры на 0.2 градуса, а далее через срок порядка 300–500 лет практически достигает исходного состояния. Реакция модели океана на похолодание длится более 1600 лет и восстановление идет значительно медленнее.

Видимо это связано с условиями обоих экспериментов и механизмом проникновения теплового возмущения в глубокий океан. Основным механизмом проникновения теплового сигнала в глубокий океан в модели является конвективное перемешивание. Повсеместное потепление поверхностных вод не препятствует осенне-зимнему конвективному перемешиванию. Конвекция, как и ранее, происходит в высоких широтах всех океанов и транспортирует более теплую воду в глубокие слои океана, рис. 3. Аналогичный результат получен в работе [8], где предполагалось увеличение температуры атмосферы в восстанавливающих граничных условиях на 2.9 градуса за 50 лет.

Повсеместное охлаждение поверхностных вод не только усиливает процесс формирования неустойчивой стратификации, но еще и увеличивает их пространственные размеры в сторону субтропиков. На меридиональной плоскости, рис. 3, зонально средние отклонения тепла через 50 лет для “Потепления” и “Похолодания” качественно похожи, отличаясь только знаком аномалии, однако похолодание распространяется на большую глубину в северном полушарии, практически до дна.

На рис. 4. приведены те же отклонения через 200 лет эксперимента для всех трех вариантов. Здесь уже все поля качественно разные. Если в варианте “Потепление” положительная аномалия тепла уменьшилась до 0.05 градуса, то в варианте “Похолодание” практически весь океан охвачен более теплыми или более холодными аномалиями, с отрицательным экстремумом -1.2 градуса у дна в северном полушарии. Причем, видно, что в варианте “Похолодание” океан теплеет в высокоширотных областях формирования донных вод.

Таким образом можно заключить, что модель океана сильнее и дольше реагирует на похолодание, чем на потепление.

## Список литературы

- [1] Котляков В. М. Скважина на станции Восток рассказывает о прошлом климате Земли. ГНТП “Глобальные изменения природной среды и климата”. Избранные научные труды под редакцией Лаверова Н.П. М., 1997. С. 281–291.
- [2] ЩЕРБАКОВ А. В., МАЛАХОВА В. В., АНЦЫЗ Е. Н. Численная модель Мирового океана с учетом Ледовитого океана. Препринт ВЦ СО АН СССР, № 1106. 1997. 29 с.
- [3] SCHERBAKOV A. V., MALAKHOVA V. V. On the sensitivity The World ocean model to the vertical resolution // Bull. NCC. Ser. Num. Mod. Atmosphere, Ocean and Environment Studies // 1999. Iss. 5. P. 41–53.
- [4] SCHERBAKOV A. V., MALAKHOVA V. V. On the deep water formation in the World Ocean model Bull. NCC. Ser. Num. Model. Atmosph., Ocean and Environment Studies. 2000. Iss. 5. P. 69–75.
- [5] ЩЕРБАКОВ А. В., МОИСЕЕВ В. М. Разностная схема для адвективно-диффузионного уравнения. Новосибирск, 1985. 17 с. (Препринт / АН ССР. Сиб. отд-ние. ВЦ; № 631).
- [6] РОУЧ П. Вычислительная гидромеханика. М.: Мир, 1980.
- [7] LEVITUS S. 1982: Climatological Atlas of the World Ocean. NOAA Prof. Paper, 13, U.S. Govt. Printing Office, 173 p.
- [8] MIKOLAJEWICZ U., SANTER B., MAIER-REIMER E. Ocean response to greenhouse warming, Report No. 49, Max-Planck-Institut fur Meteorologie, Hamburg, 13 p. 1990.