

УДК 551.465.1

О РОЛИ ВИХРЕЙ В ГЛОБАЛЬНОМ МЕРИДИОНАЛЬНОМ ПЕРЕНОСЕ ТЕПЛА ОКЕАНА

К. В. Ушаков^{1,2,*}, член-корреспондент РАН Р. А. Ибраев^{1,2}

Поступило 09.11.2018 г.

С помощью вихреразрешающей модели выполнен расчёт вихревого меридионального переноса тепла (ВМПТ) в Мировом океане. Его распределение связано с интенсивными течениями и образует несколько характерных типов структур. Сравнение с результатами других моделей показывает, что для правильного воспроизведения ВМПТ предпочтительно явное описание вихревой динамики.

Ключевые слова: Мировой океан, вихреразрешающая модель, вихревой меридиональный перенос тепла.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524862243-246>

Мировой океан играет принципиальную роль в формировании климата Земли, перенося тепло от тропиков в полярные районы. Крупномасштабное распределение океанского меридионального переноса тепла (МПТ) достаточно подробно изучено по данным наблюдений. Однако составляющая МПТ, обусловленная мезомасштабными вихрями (ВМПТ), практически недоступна контактным измерениям в силу их низкого разрешения, а спутниковые снимки не дают информации о её распределении в глубине.

Вихри распространены повсеместно в океане, но их вклад в процессы переноса значителен главным образом в районах взаимодействия сильных течений с рельефом и между собой. В этих условиях вихревой перенос зачастую противоположен или перпендикулярен переносу среднего течения [1]. Более того, он может быть направлен от холодных вод к тёплым, что ограничивает применимость его параметризаций с положительным коэффициентом диффузии [2, 3]. Ряд работ связывает с воспроизведением вихрей важные характеристики моделей, такие как дрейф климата [4] и координаты отрыва западных прибрежных течений [5].

Со времени выхода в 2000 г. работы [6], в которой моделируется изменчивость уровня Атлантики, стало практически общепринятым требование горизон-

тального разрешения не ниже $0,1^\circ$, для того чтобы модель считалась вихреразрешающей. Благодаря развитию суперкомпьютеров такие модели получили возможность рассчитывать состояние всего Мирового океана.

Для вычисления моделью ВМПТ через выбранное зональное xz -сечение, как правило, применяется формула вида

$$Q_E = \iint \rho C_p \theta V dz dx - \iint \rho C_p \langle \theta \rangle \langle V \rangle dz dx - \iint A_H \rho C_p \frac{d\theta}{dy} dz dx. \quad (1)$$

Здесь V — меридиональная компонента скорости течения; θ — потенциальная температура; ρ — плотность; C_p — теплоёмкость морской воды; A_H — коэффициент диффузии, который может зависеть от свойств сетки или решения.

Первые два члена справа представляют собой разность явно описываемого МПТ и его части, обусловленной средним течением. Эта разность считается явно разрешаемым ВМПТ. Угловыми скобками обозначено осреднение по характерному периоду мезомасштабных вихрей, составляющему 1–3 месяца [1, 7]. Последний член соответствует параметризованному подсеточному МПТ. Детальное исследование предполагает его минимизацию для максимально явного описания океанской турбулентности вне пограничных слоёв. В нашей работе данный член пренебрежимо мал.

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова
Российской Академии наук, Москва

²Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука
Российской Академии наук, Москва

*E-mail: ushakov@ocean.ru

С помощью этой методики в [1, 2, 8] исследованы глобальные распределения ВМПТ с разрешением $0,25^\circ$. В [3, 9] с разрешением $0,125^\circ$ и $(1/12)^\circ$ соответственно рассмотрены отдельные океанские бассейны, а работа [10] приводит некоторые характеристики ВМПТ глобальной $0,1$ -градусной модели.

Задачей данной работы является изучение глобального распределения ВМПТ с помощью вихре-разрешающего моделирования. Мы используем модель Мирового океана ИВМИО с разрешением $0,1^\circ$, разработанную в ИВМ РАН и ИО РАН [11]. Она аппроксимирует систему уравнений трёхмерной динамики океана в приближениях Буссинеска и гид-

ростатики на трёхполярной локально-ортогональной сетке в вертикальных z -координатах с нелинейным кинематическим условием на свободной поверхности. Благодаря явным схемам по времени модель эффективно реализована на массивно-параллельных компьютерах [12]. В формуле (1) применено осреднение по 90 сут. Расчёты проведены на пять лет (1978–1982 гг.), анализируется средний МПТ за последние четыре года. Подробнее постановка численного эксперимента описана в [13].

Распределение модельного ВМПТ, проинтегрированного по глубине, показано на рис. 1 в единицах ватт на метр дуги параллели. Его значения велики

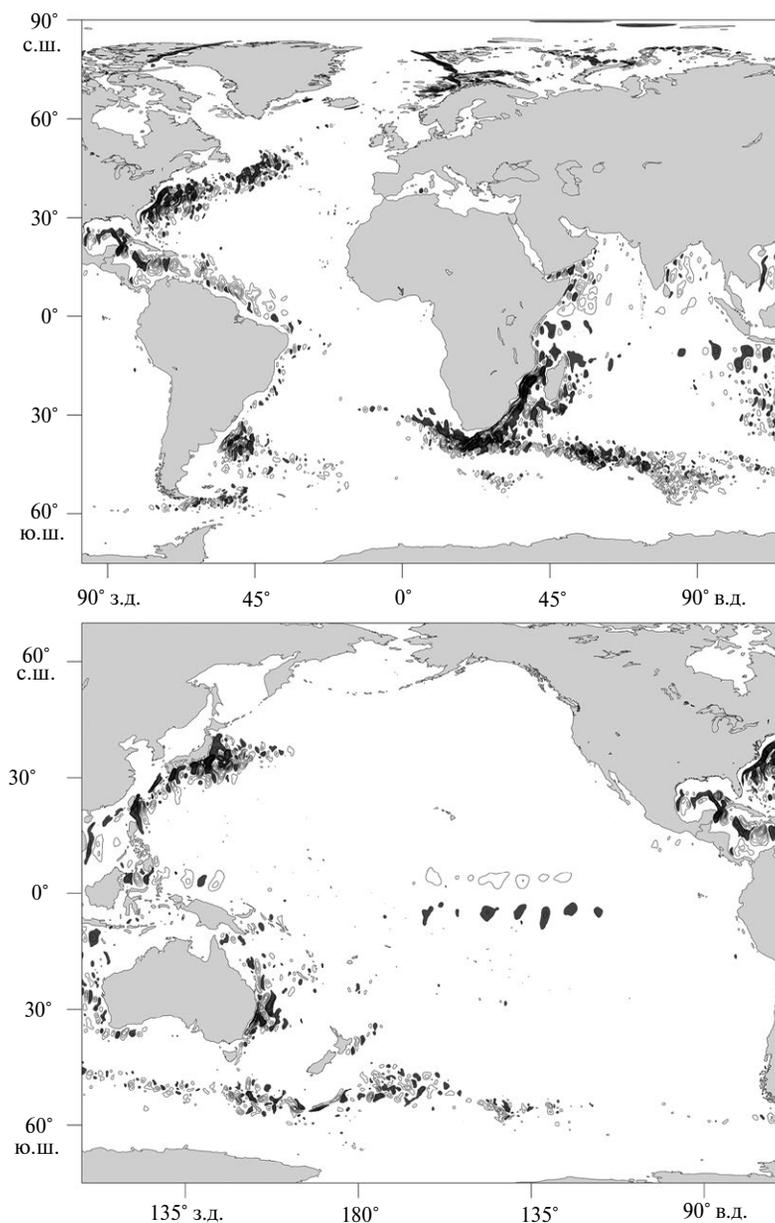


Рис. 1. Локальный ВМПТ всей толщи океана. Ненулевые изолинии проведены через $0,5 \cdot 10^8$ Вт/м, положительные контуры затемнены.

в западных прибрежных течениях и незначительны внутри океанских круговоротов. Для Гольфстрима и Куроиси характерны чередующиеся по знаку ВМПТ пульсации, переносящие тепло от оси течения к периферии, зачастую к более тёплым водам.

В Южном океане ВМПТ существен на северном фланге Антарктического Циркумполярного течения (АЦТ) и приблизительно следует поверхностным изотермам в Зоне Полярного фронта. Модель воспроизводит вихревую активность нескольких струй АЦТ, модулируемых топографией дна, что согласуется с [8].

Особенностью Агульясского течения оказалась сильная “струя” ВМПТ, по расположению и направлению приблизительно совпадающая со средней струей течения и созданная, по-видимому, его мандрированием. На её морской периферии ВМПТ имеет противоположный знак, что может объясняться образованием рингов. Структура ВМПТ струйного типа характерна также для Восточно-Австралийского течения, рингового — для Северо-Бразильского. Агульясские ринги распространяются в Атлантике на северо-запад, составляя важный фактор обмена с Индийским океаном.

Заметный вклад в МПТ вносит сходящийся к экватору ВМПТ волн тропической неустойчивости, отчасти компенсирующий расходящийся экмановский перенос, главным образом в Тихом океане. Здесь вихри нагревают известный “холодный язык” тихоокеанских вод.

Распределение зонально проинтегрированных МПТ и ВМПТ Мирового океана показано на рис. 2. Так, отрицательный (положительный) наклон графика означает адвективный нагрев (охлаждение) океана на данной широте.

В полосе 20° – 35° ю.ш. малость интеграла показывает, что отрицательный ВМПТ прибрежных течений практически компенсируется ВМПТ открытого моря. На 40° ю.ш., широте отражения Агульясского и смешения Бразильского и Фолклендского течений, вклад вихрей превосходит по модулю вклад среднего течения и достигает $-0,33$ ПВт. Южнее ВМПТ уменьшается и становится пренебрежимо малым примерно с 60° ю.ш. Аналогичное распределение получено в высокоразрешающих моделях [9, 10], в то время как более грубые [1, 2, 8] дают продолжение зоны ВМПТ дальше на юг.

Экваториальные экстремумы ВМПТ составляют $0,36$ ПВт на $1,7^{\circ}$ ю.ш. и $-0,67$ ПВт на $3,4^{\circ}$ с.ш. Величина южного пика почти поровну распределена между Индийским и Тихим океанами с вкладом Атлантики около $0,05$ ПВт. К северу преобладает вклад Тихого океана, равный $-0,41$ ПВт. Схожие результаты были получены в [1], но в нашем случае экстремумы оказались ближе к экватору, что лучше согласуется с данными радиометрии [14]. На $3,9^{\circ}$ ю.ш. расположен максимум вихревого переноса на север, созданный в основном Тихим океаном.

Далее от экватора находятся вторичные пики: $0,24$ ПВт на 11° ю.ш. и $-0,32$ ПВт на $13,7^{\circ}$ с.ш. Первый создан почти полностью Индийским океаном на северном фланге Южного Пассатного течения. Второй примерно на две трети определяется Атлантикой, в основном Северо-Бразильским и Карибским течениями.

На широтах западных прибрежных течений Северного полушария вихри в среднем переносят тепло на север. Вихревой меридиональный перенос тепла течений Куроиси и Северо-Тихоокеанского заметен в интервале 32° – 42° с.ш. с максимумом $0,07$ ПВт

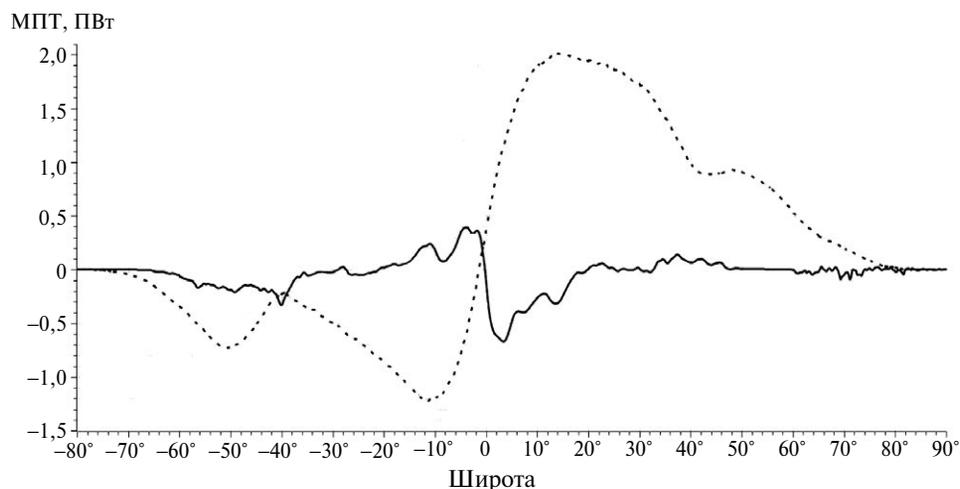


Рис. 2. Зональный интеграл вихревого (сплошная линия) и полного (штриховая) МПТ Мирового океана.

(не показан), причём для Тихого океана эта величина составляет существенную часть МПТ на данной широте. Заметный ВМПТ Гольфстрима и Северо-Атлантического течений простирается до 48° с.ш. и достигает 0,09 ПВт. Отдельного исследования заслуживает Атлантический сектор Арктики, где получены значимые (от –0,08 до 0,03 ПВт) величины ВМПТ на пути следования атлантических вод.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149–2018–0001) при частичной поддержке РФФИ (проект 16–05–01101).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Volkov D.L., Lee T., Fu L.-L. // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. L20601.
2. Jayne S.R., Marotzke J. // *J. Phys. Oceanogr.* 2002. V. 32. P. 3328–3345.
3. Yim B.Y., Noh Y., Qiu B., et al. // *J. Phys. Oceanogr.* 2010. V. 40. P. 340–353.
4. Delworth T.L., Rosati A., Anderson W., et al. // *J. Climate.* 2012. V. 25. P. 2755–2781.
5. Williams S., Petersen M., Hecht M., et al. // *Computer Graphics Forum.* 2012. V. 31. P. 1125–1134.
6. Smith R.D., Maltrud M.E., Bryan F.O., et al. // *J. Phys. Oceanogr.* 2000. V. 30. P. 1532–1561.
7. Гилл А. Динамика атмосферы и океана. М: Мир, 1986. Т. 2. 415 с.
8. Volkov D.L., Fu L.-L., Lee T. // *Ocean Dyn.* 2010. V. 60. P. 791–801.
9. Meijers A.J., Bindoff N.L., Roberts J.L. // *J. Phys. Oceanogr.* 2007. V. 37. P. 277–295.
10. Griffies S.M., Winton M., Anderson W.G., et al. // *J. Clim.* 2015. V. 28. P. 952–977.
11. Ибраев Р.А., Хабеев Р.Н., Ушаков К.В. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2012. Т. 48. № 1. С. 45–55.
12. Kalmykov V.V., Ibrayev R.A., Kaurkin M.N., et al. // *Geosci. Model Dev.* 2018. V. 11. № 10. P. 3983–3997.
13. Ushakov K.V., Ibrayev R.A. // *Rus. J. Earth Sci.* 2018. V. 18. ES1004.
14. Roberts M.J., Clayton A., Demory M., et al. // *J. Climate.* 2009. V. 22. P. 2541–2556.

ON THE ROLE OF EDDIES IN THE GLOBAL OCEAN MERIDIONAL HEAT TRANSPORT

K. V. Ushakov^{1,2}, Corresponding Member of the RAS R. A. Ibrayev^{2,1}

¹*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

²*Marchuk Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

Received November 09, 2018

By means of an eddy-resolving model, calculation of the eddy meridional heat transport (EMHT) in the World Ocean has been performed. Its distribution is associated with intense currents and forms several characteristic types of structures. Comparison with results of other models shows that for the correct reproduction of EMHT, an explicit description of the eddy dynamics is preferable.

Keywords: World Ocean, eddy-resolving model, eddy meridional heat transport.