

УДК 551.465.1

Численное моделирование вихревого переноса тепла в Мировом океане

К.В. Ушаков^{1,2}, Р.А. Ибраев^{2,1,3}

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

²Институт вычислительной математики РАН

³Московский физико-технический институт (государственный университет)

Мировой океан играет существенную роль в формировании климата Земли благодаря способности переносить тепло от тропиков в полярные районы. Среднее климатическое распределение меридионального переноса тепла (МПТ) в Мировом океане и его крупных бассейнах достаточно подробно изучено по данным гидрографических и спутниковых наблюдений. Однако его вихревая составляющая и временная изменчивость недоступны исследованиям по данным разрезов из-за их в целом низкого разрешения, а спутниковые наблюдения не дают информации о распределении теплопереноса по глубине. Считается, что в глобальном масштабе мезомасштабные вихри играют незначительную роль в переносе тепла, но в определённых районах их вклад может быть существенным [1]. В частности, вихревой перенос может компенсировать перенос среднего течения. Для ряда течений (Антарктического Циркумполярного, западных прибрежных течений) на долю вихрей приходится до 60% полной кинетической энергии. Единственным инструментом, способным воспроизвести в глобальном масштабе детальную структуру океанских вихрей, в том числе по вертикали, и её влияние на баланс тепла океана остаются модели общей циркуляции океана.

В данной работе используется современная российская модель общей циркуляции Мирового океана ИВМИО [2], с помощью которой поставлены численные эксперименты по воспроизведению изменчивости состояния океана. Вихревая составляющая МПТ Q_E может быть оценена как разность между полным переносом и его частью, обусловленной средним течением в данной точке:

$$Q_E = \iint \rho C_p \theta V dz dx - \iint \rho C_p \theta \langle V \rangle dz dx - \iint A_H \rho C_p \nabla \theta dz dx \quad (1)$$

где первые два члена составляют явно разрешаемый перенос тепла, последний соответствует параметризованному. Угловыми скобками обозначено осреднение по характерному временному периоду эволюции мезомасштабных вихрей, V – меридиональный компонент скорости течения, θ – потенциальная температура, ρ – плотность и C_p – теплоёмкость морской воды при постоянном давлении. Через A_H обозначен переменный коэффициент диффузии, используемый для параметризации подсеточного переноса тепла. Интегрирование производится по глубине и долготе в пределах рассматриваемого бассейна. В случае отсутствия (или по крайней мере малости) суммарного тока воды через рассматриваемое зональное сечение величина Q_E не зависит от выбора нуля температурной шкалы и может рассматриваться как объективная количественная характеристика. Поскольку большая часть энергии мезомасштабных вихрей соответствует элементам океанской циркуляции с характерными временами менее 100 суток [3], для вычисления вихревой и фоновой составляющей переноса тепла в (1) используем осреднение по 3-месячным интервалам. Таким образом мы учитываем большую часть вихревой изменчивости, равно как и более короткопериодную изменчивость слоя Экмана и волны тропической неустойчивости в районе экватора, но исключаем сезонную, внутригодовую и межгодовую изменчивость.

Применяемая численная модель общей циркуляции Мирового океана ИВМИО разработана для исследования циркуляции морских вод в широком диапазоне пространственных и временных масштабов. Полная система уравнений трёхмерной динамики океана в приближениях Буссинеска и гидростатики аппроксимирована методом конечных объёмов на сетке типа В в вертикальных z-координатах. Горизонтальная сетка трёхполярная с разрешением 0.25° в сферической части. Вертикальная дискретизация включает 49 горизонтов с шагом от 6 м в верхнем слое до 250 м в глубине. В данном эксперименте шаг по времени составляет 12 минут

для бароклинических процессов. Расчёт быстрой баротропной динамики выполняется отдельно путём решения системы уравнений мелкой воды с шагом 30 секунд. Для дополнительного обеспечения численной устойчивости в уравнениях для переноса импульса, температуры и солёности применяются бигармонические фильтры. Поверхность раздела воздух-вода свободная с описанием потоков тепла, импульса и воды по балк-формулам пограничного слоя CORE [4]. На твёрдых границах используется условие свободного проскальзывания и отсутствия потоков тепла и соли. Постановка эксперимента соответствует протоколу CORE-II, определяющему среднесуточные нисходящие радиационные потоки, среднемесячные осадки и речной сток, а также суточный ход параметров атмосферы (температуры, влажности и скорости ветра на высоте 10 м) за 60-летний период 1948-2007 гг. по данным реанализа и спутниковых наблюдений.

Модель достаточно хорошо воспроизводит характеристики глобального МПТ (рис. 1). Расхождения с данными [3] приблизительно составляют величину неопределённости наблюдений и межгодовой изменчивости МПТ (0.15 ПВт в районе 20°N для Атлантики по данным [4] и 0.25 ПВт в районах максимума абсолютной величины глобального МПТ по данным [5]). Наличие положительных величин МПТ в районе 40°S является открытым вопросом. В частности, оно присутствует в климатологии судовых наблюдений [6]. По максимумам интенсивности вихревого переноса тепла результаты расчёта модели ИВМ-ИО превзошли данные [3], что, согласно этой же работе, вполне правдоподобно, т.к. эти данные занижены по сравнению с оценками по массивам спутниковой альтиметрии.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН И.ЗП, проект «Исследование трёхмерных характеристик мезомасштабных вихрей и их роли в меридиональном переносе тепла Мирового океана».

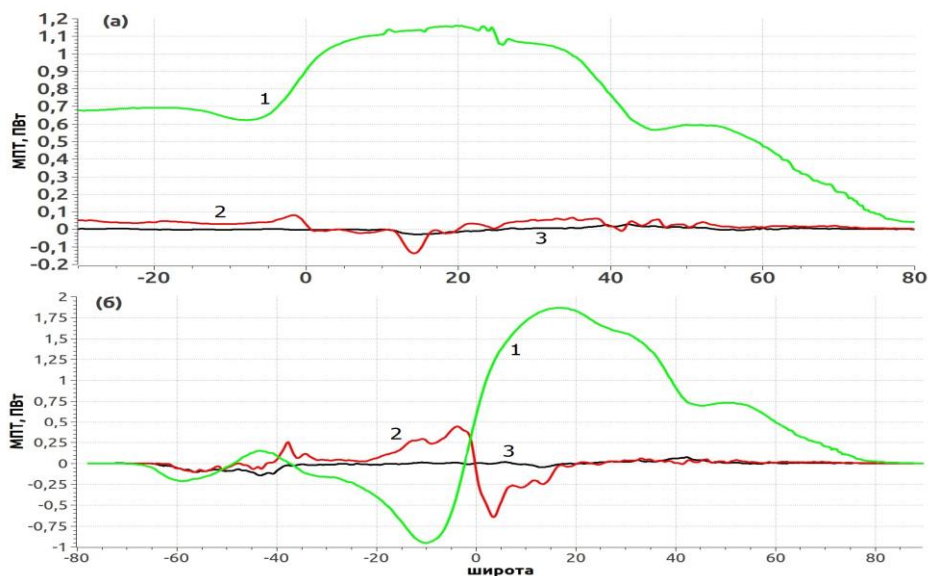


Рис. 1. Распределение МПТ по широте в Атлантическом океане (а) и Мировом океане (б). 1 – полная величина, 2 – явно разрешаемая вихревая составляющая, 3 – параметризованная вихревая составляющая.

Литература

1. Jayne, S. R., Marotzke J. The oceanic eddy heat transport // J. Phys. Oceanogr. 2002. V.32. P. 3328–3345.
2. Ибраев Р.А., Хабеев Р.Н., Ушаков К.В. Вихреразрешающая $1/10^\circ$ модель Мирового океана // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 1. С. 45-55.
3. Volkov D.L., T. Lee, L.Fu. Eddy-induced meridional heat transport in the ocean // Geoph. Res. Let. 2008. V. 35. L20601.
4. Large W., Yeager S. The global climatology of an interannually varying air–sea flux data set // Clim. Dyn. 2009. V. 33. N 2-3. P. 341-364.
5. Trenberth K., Caron J. Estimates of meridional atmosphere and ocean heat transports // J. Clim. 2001. V. 14. P. 3433–3443.
6. Da Silva A.M., Young C., Levitus S. Atlas of surface marine data. NOAA Atlas NESDIS 6, 1994.