



ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ СТРУЙНОГО ЗОНАЛЬНОГО ВЕТРОВОГО ТЕЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМБИНИРОВАННОЙ ДИССИПАЦИИ

А.Б. Федотов

Институт природно-технических систем,
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: fedotov57@mail.ru

В рамках численной модели двухслойного океана с глубиной слоев, соответствующей средним океаническим условиям, проведено исследование ветровой эволюции крупномасштабной циркуляции с одновременным использованием двух механизмов диссипации завихренности на подсеточных пространственных масштабах: спектральной фильтрации высших гармоник и обычной вязкости с очень маленьким коэффициентом под действием стационарного неоднородного внешнего потока завихренности, моделирующего воздействие ветра на океан. Эксперименты были проведены для двух значений интенсивности ветра, отдельно проанализированы временные и энергетические параметры изменения интенсивности циркуляции, отдельный акцент сделан на процессе формирования интенсивных вихревых рингов. Выделены основные временные масштабы колебаний энергии верхнего слоя.

Ключевые слова: синоптическая изменчивость, струйные течения, ветровые течения, вихри.

Поступила в редакцию 22.09.2023. После доработки: 10.11.2023.

Введение. В предыдущих работах по исследованию долгопериодных осцилляций океанической циркуляции в Северной Атлантике под действием ветра основное внимание было уделено амплитудным характеристикам структуры ветровой нагрузки и средним по расчетной области параметрам стратификации океана [1, 2]. При этом структура ветровой нагрузки была выбрана таким образом, что интенсивность ветрового воздействия на процессы в океане убывала до нуля при приближении к границе расчетной области. Вне зависимости от пространственной локализации ветровой нагрузки вблизи западного берега расчетной области формируется интенсивное меридиональное течение, при этом используемый диссипативный оператор в виде бигармонической вязкости не всегда адекватно описывает структуру течений при больших пространственных градиентах моделируемого поля относительной завихренности, свойства бигармонического оператора вязкости хорошо изучены в литературе и являются хрестоматийными

ми [3]. В данной работе исследован процесс развития струйного течения, формирующегося вблизи западного берега океана при использовании комбинированного оператора диссипации. Основная нагрузка возлагается на механизм спектральной фильтрации, при котором периодически обнуляются все амплитуды Фурье-гармоник для всех волновых чисел $k \geq k_f$, где $k = |\vec{k}|$, а k_f – граничное волновое число, определяющее режим фильтрации. При такой параметризации диссипативный оператор воздействует только на мелкомасштабную часть спектра энергии и энтропии, остальной спектральный динамический диапазон такому воздействию не подвергается, в отличие от использования бигармонической вязкости, которая одновременно с выполнением функции избежания накопления энергии на масштабах сравнимых с пространственным шагом расчетной сетки воздействует абсолютно на все гармоники структуры течений, хотя и в меньшей степени в сравнении с малыми масштабами. Дополнительно со спектральной фильтрацией в численную схему была

включена обычная вязкость с очень малым коэффициентом, что обеспечивало корректность решения уравнения адвекции, в особенности вблизи западной границы расчетной области при возрастании градиентов рассчитываемых физических полей.

Уравнения и описание модели. В расчетах использована модель эволюции потенциального вихря в двухслойной жидкости для случая глубин верхнего слоя 100 м, нижнего – 3870 м

$$\frac{\partial \omega_j}{\partial t} + J(\psi_j, \omega_j) + \beta \frac{\partial \psi_j}{\partial x} = -\lambda_j \cdot \omega_j \cdot \delta_{j2} + W_j \cdot \delta_{j1} + D_j, \quad (1)$$

$$\omega_j = \Delta \psi_j + F_j(\psi_i - \psi_j), \quad i=3-j, \quad (2)$$

где индекс j указывает номер слоя численной модели и изменяется от 1 до 2, где ψ_j – функция тока в слое j , ω_j – завихренность в слое j , λ_j – коэффициент придонного трения, δ_{ji} – символ Кронекера, $\delta_{ji} = 0$ при $i \neq j$ и $\delta_{ji} = 1$ при $i = j$, D_j – комбинированная диссипация, W_j – поток завихренности, генерируемой ветром, F_j – параметры стратификации для каждого из слоев, Δ – оператор Лапласа, при следующих параметрах стратификации $F_1 = 1933$, $F_2 = 50$, при этом масштаб Россби в размерном виде равен 86 км. Расчеты в каждом из численных экспериментов были выполнены для размерного модельного времени 365000 суток.

Диссипация в модели реализована, как отмечено выше, посредством периодической спектральной фильтрации одновременно с включением в расчетную схему малой вязкости, для нижнего слоя также используется придонное трение. Уравнения модели были стандартным образом приведены к безразмерному виду, и расчеты выполнялись в квадратной области с длиной стороны 2π . Положительные значения оси X соответствуют направлению на восток, положительные значения оси Y соответствуют направлению на север.

В модели ставятся граничные усло-

вия непротекания и скольжения.

Численная схема. Для решения основного уравнения задачи (1) применена схема Аракавы [3].

Решение системы уравнений (2) на каждом шаге выполнялось с помощью прямого метода интегрирования путем разложения полей функции тока и относительной завихренности по собственным функциям дифференциального оператора задачи для прямоугольных (квадратных) областей [4].

Структура ветрового воздействия представлена потоком завихренности, задаваемым выражением

$$W_1 = -W_0 \sin(y) \sin(x/2). \quad (3)$$

Численные эксперименты. Численные эксперименты выполнялись в квадратной расчетной области с разрешением $N=513$ узлов сетки по каждой из сторон квадрата. Эксперименты проводились при безразмерных параметрах $\beta = 1$, шаг по времени был равен 0,025 безразмерной единицы. Расчеты выполнены для параметров придонного трения $\lambda_2 = 0,04$, волнового числа фильтрации $k_f = (N-1)/4$ и интенсивности потока ветровой завихренности $W_0 = 0,00075$ в первой части эксперимента и $W_0 = 0,0005$ во второй его части.

Если размер расчетной области по аналогии с [1] принять равным 3840 км, то масштаб длины $L = 611$ км, тогда, при $\beta = 1,9 \cdot 10^{-11} \text{ м}^{-1} \text{ с}^{-1}$, масштаб скорости равен $U = 7,09 \text{ м/с}$, а масштаб времени $T = 1,0$ суток, пространственный шаг сетки расчетной области при данном разрешении равнялся 7,5 км. Как уже было указано выше, расчеты выполнялись с использованием комбинированной вязкости в качестве диссипативного члена уравнения (1), значения безразмерного коэффициента вязкости для обоих слоев $j = 1, 2$ в описанных ниже экспериментах было выбрано равным $1,0 \cdot 10^{-7}$.

В качестве начального поля для первого эксперимента было выбрано поле течений со сформированным струйным течением в окружении интенсивного поля вихрей (рис. 1).

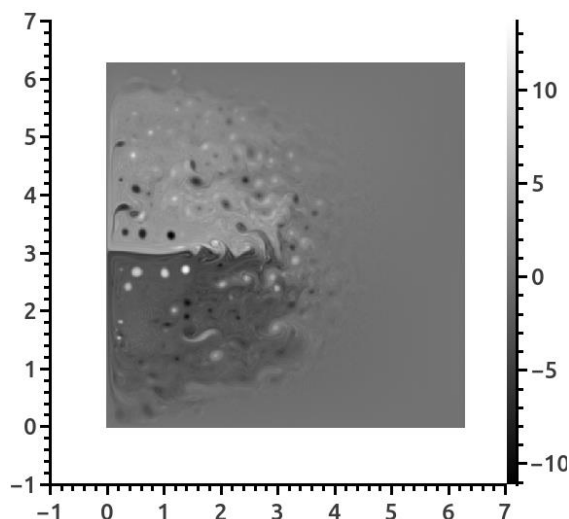


Рис. 1. Начальное поле завихренности верхнего слоя

Fig. 1. Initial vorticity field of upper layer

На рис. 2 и 3 ниже приведены результаты прогностических расчетов относительной завихренности верхнего слоя на 125000 и 315000 суток соответственно

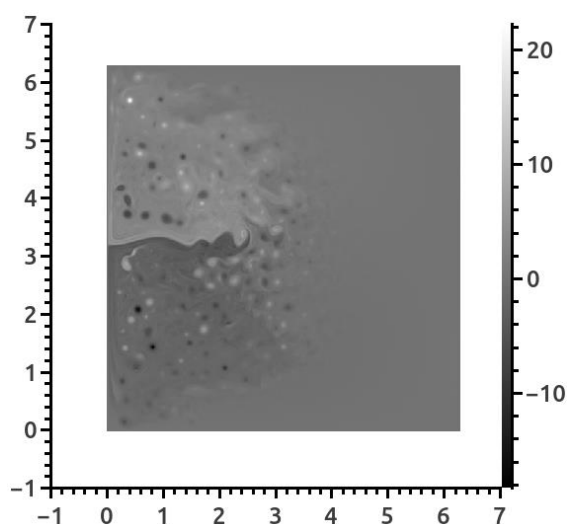


Рис. 2. Поле завихренности верхнего слоя для $t = 125000$ суток

Fig. 2. Vorticity field of upper layer for $t = 125000$ days

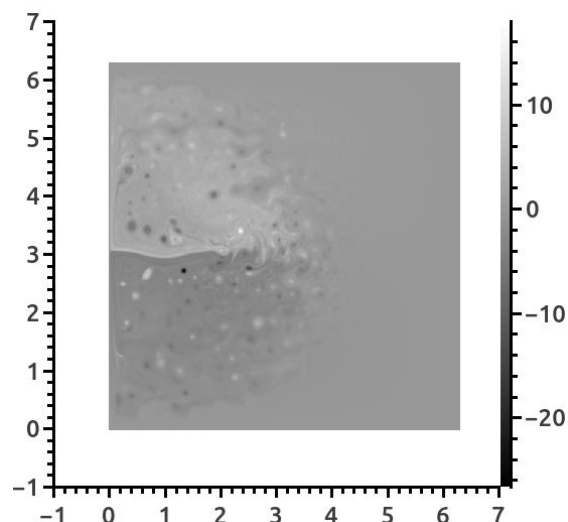


Рис. 3. Поле завихренности верхнего слоя для $t = 315000$ суток

Fig. 3. Vorticity field of upper layer for $t = 315000$ days

Временной ход кинетической энергии верхнего слоя (рис. 4) приведен для всего первого эксперимента длительностью 365000 суток или 1000 лет модельного времени, он демонстрирует интенсивные колебания значений энергии, при этом хорошо видно наличие колебаний очень длительного периода.

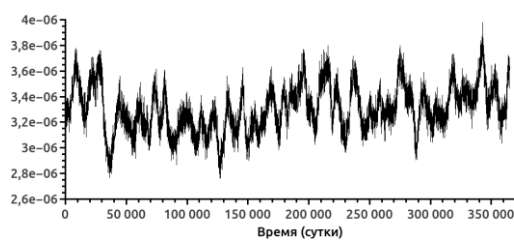


Рис. 4. Временной ход кинетической энергии верхнего слоя для первого эксперимента

Fig. 4. Time course of kinetic energy of upper layer for the first experiment

На рис. 5 приведена периодограмма временного хода данной кинетической энергии (по оси абсцисс десятичный логарифм времени в годах), различимы периоды приблизительно в 30, 60 и 150 лет, пик соответствующий 500 годам во внимание не принимаем.

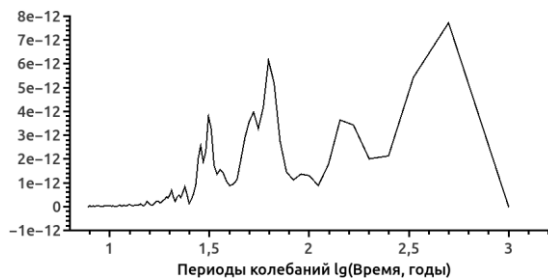


Рис. 5. Периодограмма временного хода кинетической энергии верхнего слоя
Fig. 5. Periodogram of time course of kinetic tnerge of upper layer

Сравнение полей завихренности верхнего слоя для начала эксперимента и для модельного времени 315000 суток (рис. 1 и 3) показывает резкое отличие полей относительной завихренности, а именно, в поле вихрей, окружающих струйное течение на заключительной стадии расчетов, формируются вихри с амплитудой значительно превышающей амплитудные значения завихренности в струйном течении, при том, что в пространственных спектрах энергии верхнего слоя выраженные отличия отсутствуют (рис. 6).

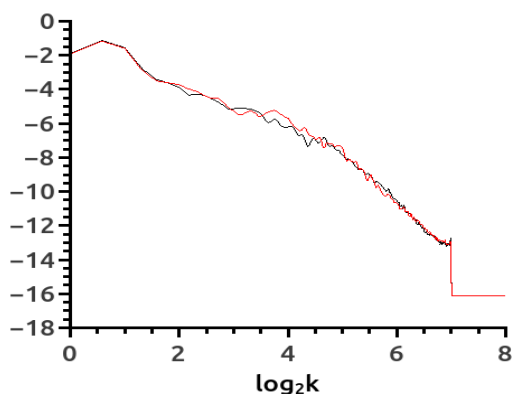


Рис. 6. Пространственные спектры энергии, красный $t = 0$, черный $t = 315000$ суток
Fig. 6. Space energy spectra, red $t = 0$, black $t = 315000$ days

При проведении второго эксперимента интенсивность ветровой нагрузки была уменьшена в 1,5 раза и проведен анализ эволюции структуры течений по аналогии с вышеизложенным. Начальное поле для второго эксперимента при-

ведено на рис. 7, результаты прогностических расчетов второго эксперимента — на рис. 8 и 9.

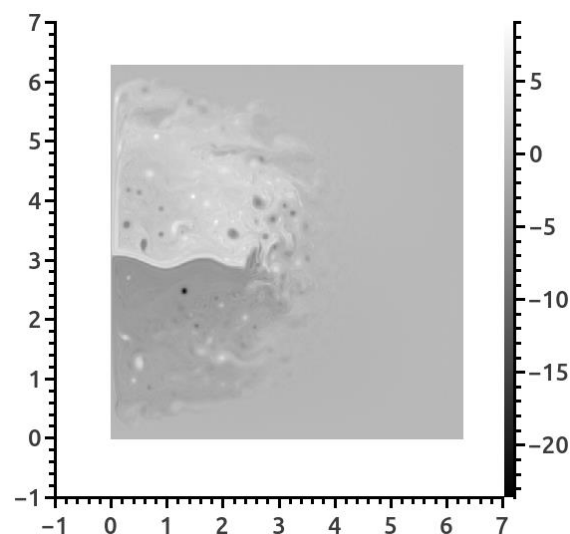


Рис. 7. Начальное поле завихренности верхнего слоя
Fig. 7. Initial vorticity field of upper layer

Сравнение полей завихренности и временных ходов первого (рис. 2 и 3) и второго (рис. 8 и 9) экспериментов демонстрирует резкое усиление меандрирования основной струи течения.

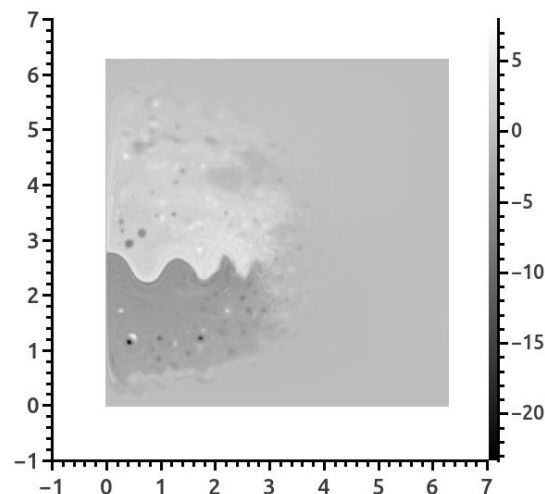


Рис. 8. Поле завихренности верхнего слоя для $t = 125000$ суток
Fig. 8. Vorticity field of upper layer for $t = 125000$ days

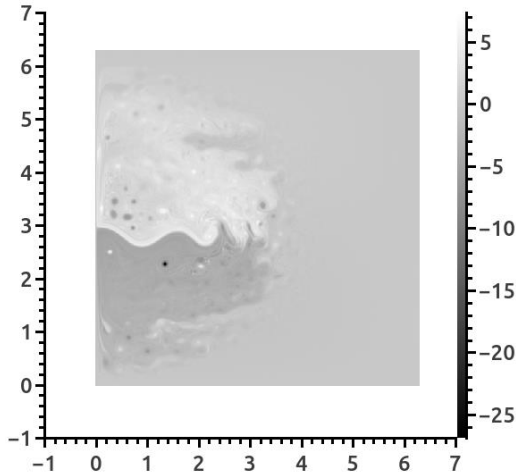


Рис. 9. Поле завихренности верхнего слоя для $t = 315000$ суток

Fig. 9. Vorticity field of upper layer for $t = 315000$ days

Поля завихренности на рис. 8 и 9 позволяют наблюдать также уединенные вихри большой амплитуды, приведенный ниже временной ход энергии (рис. 10) демонстрирует увеличение характерных периодов колебаний энергии верхнего слоя.

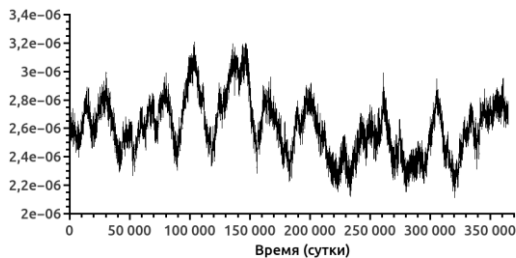


Рис. 10. Временной ход кинетической энергии верхнего слоя для второго эксперимента

Fig. 10. Time course of kinetic energy of upper layer for the second experiment

Представленная на рис. 11 периододграмма данного временного хода количественно подтверждает визуальное увеличение периодов колебаний энергии в системе течений, для второго эксперимента периоды колебаний составляют 100 и 150 лет.



Рис. 11. Периододграмма временного хода кинетической энергии верхнего слоя

Fig. 11. Periodogram of time course of kinetic energy of upper layer

Заключение. В настоящей работе представлены результаты численного моделирования океана на стадии эволюции поля течений под действием пространственно неоднородного ветра при использовании комбинированного оператора диссипации вместо, бигармонического оператора, применявшегося в более ранних работах [1, 2]. При таком подходе спектральные гармоники поля течений с волновыми числами $k \geq k_f$ не подвержены воздействию служебного диссипативного оператора на всем протяжении численных экспериментов.

По сравнению с экспериментами с бигармонической вязкостью данная работа продемонстрировала возможность образования вихрей с модулем завихренности, превышающим модуль завихренности основного течения, что подтверждает сугубо нелинейный механизм усиления таких вихрей ввиду невозможности усиления их за счет адвекции, кроме того переход планетарной завихренности в относительную, такого эффекта не даст. Во-первых, из-за отсутствия меридионального переноса в направлении широты покоя, а, во-вторых, просто из-за незначительного меридионального градиента планетарной завихренности. В то же время и данный эксперимент и эксперименты с бигармонической вязкостью дают на графике пространственного спектра энергии положение масштаба деформации Россби, $k \approx 30 - 32$ (рис. 6), для более высоких значений волнового числа видно, что спектр энергии линейно убы-

вает в логарифмических координатах, что характерно для классической двумерной турбулентности. Второй эксперимент с пониженной ветровой накачкой, как и в случае с бигармонической вязкостью, показал эволюцию струйного течения в окружении вихревого поля при меньшем уровне кинетической энергии, меньших скоростях поверхностных течений и, как следствие, больших характерных периодах наблюдаемых эффектов, в частности, характерных периодов колебаний энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федотов А.Б. Долгопериодная изменчивость системы крупномасштаб-

ной циркуляции океана и мезомасштабных вихрей как явление самоорганизации // *Океанологические исследования*. 2019. Т. 47, № 3. С. 206–219.

2. Полонский А.Б., Федотов А.Б. Изменение характеристик внутренних колебаний океанической циркуляции в условиях глобального потепления // *Доклады Российской Академии Наук. Науки о Земле*, 2022. Т. 504, № 1. С. 91–96.

3. Arakawa A. Computational design of long-term numerical integration of the equations of fluid motion, two-dimensional incompressible flow // *Journal of Comput. Physics*. 1966. Vol. 1, No. 1. P. 119–143.

4. Roache Patrick J. Computational fluid dynamics. Hermosa Publishers Albuquerque, N.M. 1972.

NUMERICAL SIMULATION OF THE EVOLUTION OF A JET ZONAL WIND FLOW USING COMBINED DISSIPATION

A.B. Fedotov

Institute of Natural and Technical Systems,
RF, Sevastopol, Lenin St., 28

Within the framework of a numerical model of a two-layer ocean with a depth of layers corresponding to average oceanic conditions, a study of the wind evolution of large-scale circulation is carried out with the simultaneous use of two mechanisms of vorticity dissipation on subgrid spatial scales: spectral filtration of higher harmonics and ordinary viscosity with a very small coefficient under the action of a stationary inhomogeneous external vorticity flow, simulating the effect of wind on the ocean. Experiments are carried out for two values of wind intensity, the time and energy parameters of changes in the intensity of circulation are analyzed separately, a particular emphasis is placed on the process of formation of intense vortex rings. The main time scales of energy fluctuations of the upper layer are highlighted.

Keywords: synoptic variability, large-scale variability, wind-forced currents, vortices.

REFERENCES

1. Fedotov A.B. Dolgoperiodnaya izmenchivost' sistemy krupnomasshtabnoj cirkulyacii okeana i mezomasshtabnykh virej kak yavlenie samoorganizacii (Long-period variability of large-scale circulation system and mesoscale vortices as self-organization phenomenon). *Okeanologicheskie issledovaniya*, 2019, Vol. 47, No. 3, pp. 206–219. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(3).16

2. Polonsky A.B., Fedotov A.B. Izmeneniye kharakteristik vnutrennikh kolebanij okeanicheskoy tsirkulyatsii v usloviyakh global'nogo potepleniya (Change of Internal Ocean Circulation Variations in Warming Climate). *Doklady Rossiyskoy Akademii Nauk. Nauki o Zemle*, 2022, Vol. 504, No. 1, pp. 310–314. DOI 10.1134/S1028334X22050129. EDN VPWJXC.

3. Arakawa A. Computational design of long-term numerical integration of the equations of fluid motion, two-dimensional incompressible flow. *Journal of Comput. Physics*, 1966, Vol. 1, No. 1, pp. 119–143.

4. Roache Patrick J. Computational fluid dynamics. Hermosa Publishers Albuquerque, N.M. 1972.