



## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ СТРУЙНОГО ЗОНАЛЬНОГО ВЕТРОВОГО ТЕЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ И СТОКОВ ЗАВИХРЕННОСТИ

А.Б. Федотов

Институт природно-технических систем,  
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28  
E-mail: [fedotov57@mail.ru](mailto:fedotov57@mail.ru)

В рамках численной модели двухслойного океана с глубиной слоев, соответствующей средним океаническим условиям, проведено исследование ветровой эволюции крупномасштабной циркуляции с учетом реальных географических особенностей рассматриваемой акватории на примере Северной Атлантики. Основное внимание в работе уделено изменению зональной протяженности акватории Северной Атлантики в зависимости от географической широты. Фактическое решение системы уравнений, описывающих крупномасштабную циркуляцию, осуществляется в квадратной расчетной области, при этом применение искусственных источников и стоков относительной завихренности позволяет учесть реальную географию акватории. Сток отрицательной завихренности формируется вблизи западного берега расчетной области, а источник алгоритмически организован через равномерное перераспределение удаленной отрицательной завихренности по всей остальной части расчетной области, в которой завихренность отрицательна, так, чтобы суммарное количество завихренности обоих знаков оставалось неизменным. Разворот струйного течения на восток происходит на той же самой широте, где располагалось формирование струйного течения при традиционном численном моделировании, а именно, на широте, на которой изменяется знак ветрового потока завихренности с циклонического на антициклонический.

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

Поступила в редакцию 20.12.2023. После доработки: 22.01.2024. Принята к печати: 22.03.2024.

**Введение.** В предыдущих работах по исследованию долгопериодных осцилляций океанической циркуляции в Северной Атлантике под действием ветра расчеты проводились в квадратной области, что связано с особенностями решения уравнений, описывающих циркуляцию [1,2]. На самом деле конфигурация берегов Северной Атлантики в первом приближении имеет форму трапеции, сужающейся к северу. Расчеты с использованием данной численной модели в расчетной области, отличной от прямоугольной формы, связаны с огромными трудностями при использовании прямых методов решения уравнения Гельмгольца и потребуют значительных затрат времени численных расчетов. Вне зависимости от пространственной локализации ветровой нагрузки вблизи западного берега расчетной области формируется интен-

сивное меридиональное течение, при этом используемый диссипативный оператор в виде бигармонической вязкости при включении в численную схему искусственных источников и стоков относительной завихренности вблизи западного берега расчетной области может приводить к неустойчивости расчетной схемы. 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 энтрофии, остальной спектровдействию не подвергается, в отличие от расчетов с использованием бигармонической вязкости неустойчивость схемы не возникает. 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  $\psi_j$  – функция тока в слое  $j$ ,  $\omega_j$  – завихренность в слое  $j$ ,  $\lambda_j$  – коэффициент придонного трения,  $\delta_{ji}$  – 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,  $\Delta$  – оператор Лапласа, при следующих параметрах стратификации  $F_1 = 1933$ ,  $F_2 = 50$ , при этом масштаб Россби в размерном виде равен 86 км.

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 2л. Положительные значения оси  $X$  со-

ответствуют направлению на восток, положительные значения оси  $Y$  соответствуют направлению на север.

В модели ставятся граничные условия непротекания и скольжения. Применение данной расчетной схемы к моделированию океанической циркуляции Северной Атлантики не учитывает ее географические особенности, а именно конфигурацию берегов. Обращает внимание на себя то обстоятельство, что Северная Атлантика как акватория имеет не прямоугольную, а трапециевидную форму. Вследствие этого существенной особенностью применяемой численной схемы является включение в нее дополнительных источников и стоков, имеющих физический смысл. Таким образом, вихревые поля, генерируемые в результате бароклинной неустойчивости струйного течения к северу и югу от него, имеют различные условия распространения. Эти условия можно сформулировать следующим образом:

а) численное значение меридионального градиента параметра Кориолиса (бета-эффект) в северной части акватории незначительно, но ниже, чем в южной, что дает соответствующую разницу в фазовой скорости распространения волн Россби;

б) площадь северной части «трапеции» существенно меньше, чем южной, что дает гораздо большую плотность упаковки вихрей в циклонической части круговорота;

в) линейное зональное расстояние от района генерации вихрей до западного берега в северной части существенно меньше, чем в южной, что дает большее время распространения антициклонических вихрей к зоне западного пограничного течения.

В традиционной постановке задачи крупномасштабной циркуляции в прямоугольной (квадратной) расчетной области такой эффект достигнут быть не может, однако он может быть реализован путем внесения в численную схему дополнительных источников и стоков относительной завихренности.

**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

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

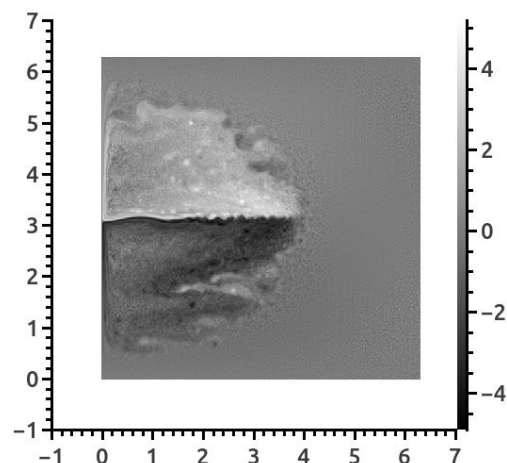
Эксперименты с формированием дополнительного источника положительной завихренности в области западного пограничного слоя к северу от струйного течения нецелесообразны вследствие развивающейся схемной неустойчивости. Ниже демонстрируются результаты, полученные при создании искусственного стока отрицательной завихренности из области западного пограничного течения к югу от струйного течения.

**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  $W_0 = 0,0005$ .

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  $U = 7,09$  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 данного эксперимента было выбрано поле течений со сформированным струйным течением в окружении интенсивного поля вихрей, рис. 1.



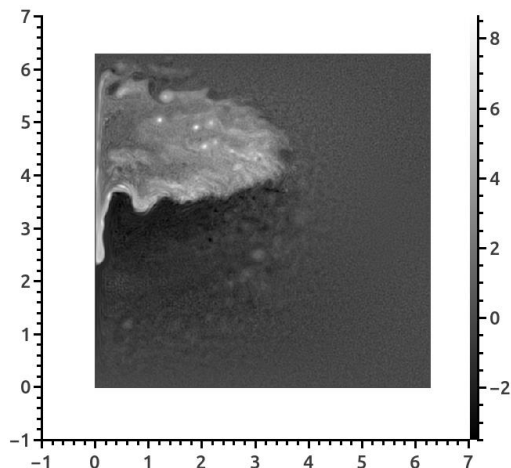
**Рис. 1.** Начальное поле завихренности верхнего слоя

**Fig. 1.** Initial vorticity field of upper layer

Данное поле имеет явно выраженное струйное течение, распадающееся из-за бароклинной неустойчивости на удалении приблизительно  $4.0$  безразмерных единицы в зональном направлении, в окружении вихре-волнового поля. Вдоль западного берега наблюдается интенсивное двунаправленное течение: южного направления к северу от положения струйного течения и северного направления соответственно к югу от него.

На этом этапе численного моделирования для уже сформировавшейся системы течений был применен механизм искусственного включения в численную схему стока отрицательной завихренности в районе узкого западного пограничного слоя. В результате через  $6000$  суток модельного времени структура течения вблизи западного берега кардинально изменилась: северная часть западного пограничного течения, существенно удлинилась и достигла более низкой широты в сравнении с начальным полем,

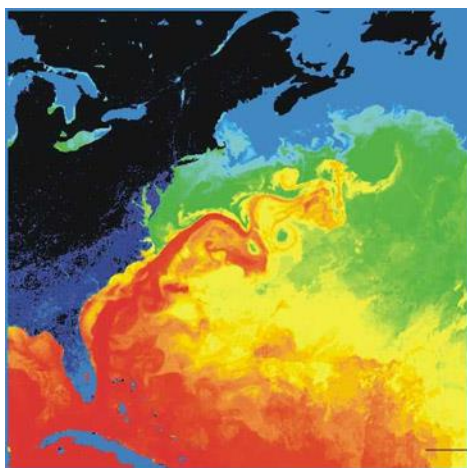
струйное течения, выйдя из района зарождения резко направилось к северу и, достигнув середины расчетной области в меридиональном направлении, развернулось на восток.



**Рис. 2.** Поле завихренности верхнего слоя через  $t = 6000$  суток

**Fig. 2.** Vorticity field of upper layer in  $t = 6000$  days

Для сравнения ниже приводится фотография поверхностной температуры района Гольфстрима, взятая из открытого источника в интернете [5]



**Рис. 3.** Поле поверхностной температуры района Гольфстрима (НАСА)

**Fig. 3.** Surface temperature of Gulfstream region (NASA)

Представленное на рис. 3 поле поверхностной температуры также демонстрирует вышеуказанные черты поля относительной завихренности, полу-

ченного в численном эксперименте: проникновение северного пограничного течения далеко на юг, расположение стрежня струйного течения вблизи береговой черты за пределами пограничного слоя и последующий разворот сильно меандрирующего струйного течения на восток.

**Заключение.** В настоящей работе представлены качественные результаты численного моделирования океана с использованием искусственно включенных в расчетную схему источников и стоков завихренности. Сток отрицательной завихренности формируется вблизи западного берега расчетной области, а источник алгоритмически организован через равномерное перераспределение удаленной отрицательной завихренности по всей остальной части расчетной области, в которой завихренность отрицательна так, чтобы суммарное количество завихренности обоих знаков оставалось неизменным. Как видно из приведенных расчетов, разворот струйного течения на восток происходит на той же самой широте, где располагалось формирование струйного течения при традиционном численном моделировании, а именно на широте, на которой изменяется знак ветрового потока завихренности с циклонического на антициклонический. Следует отметить, что численные алгоритмы введения стоков и источников в численную схему могут быть различны, и их включение в расчетную схему требует тщательного контроля соблюдения всех законов сохранения, в отличие от надежно апробированных алгоритмов численной аппроксимации остальных членов уравнения (1), тем не менее предложенный в данной работе метод представляется весьма перспективным.

*Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Фундаментальные исследования процессов в климатической системе, определяющих пространственно-временную изменчивость природной среды глобального и регионального масштабов» (№ госрегистрации 121122300074-7).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федотов А.Б. Долгопериодная изменчивость системы крупномасштабной 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 Computational Physics*. 1966. Vol. 1. No. 1. P. 119–143.

4. Roache Patrick J. Computational fluid dynamics. Hermosa Publishers Albuquerque, N.M. 1972. P. 434.

5. [https://translated.turbopages.org/proxy\\_u/en-ru.ru.40c97662-6512a2f0-b751b523-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/Gulf\\_Stream](https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.40c97662-6512a2f0-b751b523-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/Gulf_Stream)

### INVESTIGATION OF THE EVOLUTION OF JET ZONAL WIND FLOW USING ARTIFICIAL SOURCES AND DRAINS OF VORTICITY

**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 a large-scale circulation, taking into account the real geographical features of the water area under consideration, using the example of the North Atlantic. The main attention is paid to the change in the zonal extent of the North Atlantic water area depending on the geographical latitude. The actual solution of the system of equations describing large-scale circulation is carried out in a square computational domain, while the use of artificial sources and effluents of relative vorticity allows us to take into account the real geography of the water area. The negative vorticity drain is formed near the western shore of the calculated area, and the source is algorithmically organized through a uniform redistribution of the remote negative vorticity throughout the rest of the calculated area, in which the vorticity is negative, so that the total amount of vorticity of both signs remains unchanged. The eastward reversal of the jet stream occurs at the same latitude where the formation of the jet stream was located in traditional numerical modeling, namely, at the latitude at which the sign of the vorticity wind flow changes from cyclonic to anticyclonic.

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

### REFERENCES

1. Fedotov A.B. Dolgoperiodnaya izmenchivost' sistemy krupnomasshtabnoj cirkulyacii okeana i mezomasshtabnyh 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.

2. Polonsky A.B. and Fedotov A.B. Change of Internal Ocean Circulation Variations in Warming Climate. Reports of the Russian Academy of Sciences. Geosciences. 2022, Vol. 504, No. 1, pp. 310–314.

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

4. Roache Patrick J. Computational fluid dynamics. Hermosa Publishers Albuquerque, N.M. 1972, 434 p.

5. [https://translated.turbopages.org/proxy\\_u/en-ru.ru.40c97662-6512a2f0-b751b523-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/Gulf\\_Stream](https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.40c97662-6512a2f0-b751b523-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/Gulf_Stream)