**АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ МАСШТАБОВ ДОЛГОПЕРИОДНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ
ВЕТРОВОЙ ОКЕАНИЧЕСКОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В ДВУХСЛОЙНОМ ОКЕАНЕ.
ЧАСТЬ 2. СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ**

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, соответствующих средним океаническим условиям, проведено исследование эволюции крупномасштабной циркуляции под действием внешнего стационарного потока завихренности при постоянных параметрах диссипации, проанализированы временные масштабы долгопериодных осцилляций энергии течений. Выявлена связь осцилляций полной удельной энергии крупномасштабной циркуляции с осцилляциями положения центра масс спектра энтропии.

Ключевые слова: синоптическая изменчивость, струйные течения, ветровые течения

Поступила в редакцию: 22.05.2018.

Введение. Настоящая работа посвящена исследованию эволюции океанических течений в рамках классической квазигеострофической вихреразрешающей численной двухслойной модели циркуляции под воздействием стационарного пространственно неоднородного ветра и является логическим продолжением исследования [1]. В [1] приведено подробное описание численной модели, использованной в ходе исследования, следует кратко напомнить, что рассматривалась модель эволюции потенциального вихря в двухслойной жидкости для случая глубин верхнего слоя 100 м, нижнего — 3866 м, численные эксперименты выполнялись в квадратной расчетной области с разрешением 513 узлов сетки по каждой из сторон квадрата при безразмерных параметрах $\beta = 1$, $F_1 = 2900$ и $F_2 = 75$, шаг по времени был равен 0,025 безразмерной единицы, амплитуда ветрового фактора $W_0 = 0,008$, коэффициент придонного трения 0,04, размер расчетной области был принят равным 3840 км, горизонтальный масштаб длины $L = 611$ км, тогда, при $\beta = 2,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^{-1} \text{ с}^{-1}$, масштаб скорости равен $U = 7,46$ м/с, а масштаб времени $T = 0,95$ суток, пространственный шаг сетки расчетной области при данном разрешении равнялся 7,5 км, значения безразмерного коэффи-

циента вязкости для обоих слоев было выбрано равным $1,0 \cdot 10^{-8}$.

Результаты численных экспериментов. Численные эксперименты настоящей работы заключались в повторении расчетов работы [1] с включенным в численную модель блоком расчетов пространственных спектров энергии и энтропии для каждого момента времени. Общая идеология анализа двумерных спектров хорошо известна, использовалась в [3] и может быть использована для анализа процессов долгопериодной изменчивости океанической циркуляции в данной работе.

Следует напомнить, что в центре внимания [1] обсуждаются осцилляции полной удельной энергии в ходе эволюции системы ветровых течений и сделано предположение о возможной роли диссипативных структур крупномасштабной циркуляции. С точки зрения ожидания поведения спектральных характеристик формирование диссипативной структуры может приводить к сужению пространственного спектра, а распад диссипативной структуры может являться аналогом «свободной» турбулентности с одновременным расширением спектра. Такое расширение спектра увеличивает поступление энергии и энтропии в диссипативный интервал с последующим уменьшением полной

удельной энергии системы. Известный из теории двумерной турбулентности эффект «отрицательной вязкости» [2] не позволяет использовать в качестве индикатора состояния спектра значение центра масс спектра энергии, в то же время значение центра масс спектра энтропии k_ϵ представляется вполне адекватной изучаемому явлению физической величиной. В [3, 4] продемонстрировано, что временной ход центра масс спектра энтропии повторяет временной ход информационной энтропии и может рассматриваться как критерий упорядоченности системы течений.

Расчеты, как уже указано выше, базируются на результатах анализа временного хода полной удельной энергии [1], однако для целей настоящей работы был выбран фрагмент расчетов продолжительностью 16000 безразмерных единиц, а именно от $t = 44000$ до $t = 60000$ единиц, что соответствует приблизительно 41 году модельного времени, при этом считаем, что все адаптационные процессы закончились и ниже не обсуждаются.

Рис. 1. Временной ход полной удельной энергии

Как видно из рис. 1, полная энергия осциллирует в интервале величин от $6,5 \cdot 10^{-4}$ до $8,5 \cdot 10^{-4}$, что соответствует интервалу изменчивости средней скорости от 0,255 до 0,292, или в размерных величинах от 0,19 до 0,22 м/с.

Визуальный анализ временного хода полной энергии на рис. 1 указывает на наличие изменчивости интенсивности течений на временных масштабах нескольких лет. Для оценки величины характерных периодов данной изменчивости была построена периодограмма этой временной зависимости.

Логарифмическая шкала (десятичный логарифм) на рис. 2 применена для детального анализа короткопериодной

изменчивости полной энергии, из графика видно, что осцилляции полной энергии с периодом менее 3 лет практически отсутствуют.

Рис. 2. Периодограмма временного хода полной энергии, по оси абсцисс логарифмическая шкала

Рассмотрим временной ход значений центра масс спектра энтропии k_ϵ в те же моменты времени.

Рис. 3. Временной ход центра масс спектра энтропии

На рис. 3 приведен временной ход центра масс спектра энтропии для верхнего слоя, что достаточно для дальнейшего анализа, исходя из самой логики постановки задачи и выполняемого исследования. Дело в том, что конечный радиус деформации Россби создает значительные препятствия для потока энтропии на малых масштабах из верхнего слоя в нижний, нас же интересует в данном аспекте поведение энтропии на масштабах, близких к масштабу диссипации.

По аналогии рассмотрим периодограмму временного хода центра масс спектра энтропии. Следует ожидать, что данная периодограмма продемонстрирует больший набор периодов изменчивости по сравнению с предыду-

щей, так как может отражать процессы, происходящие с сохранением полной энергии, что и подтверждается данными.

Рис. 4. Периодограмма временного хода центра масс спектра энтропии, по оси абсцисс логарифмическая шкала

На рис. 4 сразу обращают на себя внимание два факта: высокая интенсивность физических процессов для абсцисс $< 0,5$, что соответствует модельному периоду времени около 3 лет, и такие процессы не отражаются на периодограмме полной энергии; приблизительно одинаковая интенсивность долгопериодных осцилляций в диапазоне 7–11 лет на обеих периодограммах.

Представляется естественным, что периодограмма центра масс спектра энтропии отражает большую совокупность нелинейных процессов различных временных масштабов. Причем короткопериодные процессы продолжительностью от месяца до 3 лет имеют иную физическую природу, нежели долгопериодная изменчивость океанической ветровой циркуляции. Такие процессы хорошо известны — это процессы генерации вихрей в ходе процессов бароклинной неустойчивости и последующего поглощения вихрей средним циркуляционным потоком. Они характеризуются сохранением полной энергии, и в пространственном спектре будут демонстрировать уменьшение пространственного масштаба течения при генерации вихря, и увеличением пространственного масштаба при поглощении вихря

крупномасштабным течением.

Последние выводы достаточно убедительны, что позволяет отфильтровать по частотам процессы с периодами менее 3 лет и проанализировать долгопериодную изменчивость спектров энтропии одновременно с долгопериодной изменчивостью полной удельной энергии.

Рис. 5. Результат фильтрации временного хода центра масс спектра энтропии для периодов менее 3 лет

Таким образом, процессы на рис. 1 и рис. 5 имеют одинаковые масштабы изменчивости, и есть все основания полагать, что процессы, которые отражаются на рис. 5, оказывают значительное влияние на процессы, которые отражаются на рис. 1.

Несмотря на то, что значения полной удельной энергии и значения центра масс спектра энтропии различаются на несколько порядков, путем несложной перенормировки оба графика можно совместить на одном.

Рис. 6. Результат совмещения нормированных графиков временных ходов полной удельной энергии (сплошная) и центра масс спектра энтропии (штриховая)

Представленный график блестяще иллюстрирует гипотезу работы [1] о влиянии структуры спектра поля крупномасштабной циркуляции на полную удельную энергию всей системы течений. Уменьшение значений k_ϵ свиде-

тельствует о сужении пространственного спектра энтропии, а, следовательно, об уменьшении доли энтропии в интервале диссипации, что с некоторой задержкой во времени демонстрирует рост полной удельной энергии системы. В частности, временной сдвиг между абсолютным минимумом k_ϵ и абсолютным максимумом полной удельной энергии вблизи момента времени 45000 безразмерных единиц составляет 70 суток. График на рис. 6 наглядно демонстрирует нетривиальный факт: за каждым локальным минимумом k_ϵ следует локальный максимум полной удельной энергии, при том, что предметом исследования является двумерное турбулентное поле, включающее в себя систему крупномасштабной ветровой циркуляции, непрерывно генерирующей и поглощающей значительное количество синоптических вихрей.

Заключение. В настоящей работе представлены результаты численного моделирования океана на стадии эволюции поля течений под действием пространственно неоднородного постоянного ветра при постоянных параметрах диссипации: придонного трения и коэффициента бигармонической вязкости.

В работе исследуется квазиравновесный режим, соответствующий реальным процессам в Мировом океане под действием вынуждающей силы ветра. Здесь описан квазипериодический процесс самопроизвольной интенсификации зонального струйного течения с последующим уменьшением его интенсивности. Характерное время, в течение которого система эволюционирует от одного локального минимума энергии до другого, можно рассматривать как оценку периода изменчивости, однако, в силу того, что осцилляции полной энергии не регулярны, более точную оценку может дать анализ периодограммы временного хода полной энергии. Следует отметить, что изменчивость временного хода кинетической энергии каждого из слоев и доступной потенциальной энергии син-

фазна, и наблюдаемый эффект долгопериодных колебаний энергии связан прежде всего с одновременной интенсификацией струйного течения как в верхнем, так и в нижнем слое. При этом характер описанного явления таков, что в ходе усиления и ослабления интенсивной струи изменяется режим крупномасштабных процессов переноса, что может рассматриваться как гидродинамический механизм долгопериодных колебаний переноса массы, импульса, энергии, тепла и соли в океане.

Данный квазипериодический процесс связан с поочередной генерацией циклонических и антициклонических вихрей как проявление бароклинной неустойчивости в районе восточной оконечности струйного течения, которые затем движутся в западном направлении. В процессе своего движения на запад эти вихри ослабевают и поглощаются у западного берега крупномасштабным течением, этот процесс относительно высокочастотный, он не приводит к изменчивости полной энергии системы, и ему условно можно приписать «локальный» характер неустойчивости, при этом он хорошо представлен на периодограмме временного хода положения центра масс спектра энтропии для верхнего слоя.

Квазипериодический процесс усиления и ослабления собственно зонального струйного течения, сопровождающийся накоплением энергии в струе, является долгопериодным, и, как следует из результатов данной работы, является отражением сложных нелинейных процессов, связанных с изменением структуры пространственного спектра системы течений. Сам характер изменчивости пространственного спектра позволяет говорить о признаках самоорганизационных процессов в системе крупномасштабной циркуляции. Критерием самоорганизационных процессов являются осцилляции ширины спектра энтропии, диагностируемые посредством оценки положения центра масс спектра энтропии. А именно, сужение пространственного

спектра энтропии блокирует поступление энтропии и энергии в диссипативный интервал, что в свою очередь приводит к росту полной удельной энергии течений, максимальное значение полной энергии достигается в системе приблизительно через 70 суток с момента максимального сужения пространственного спектра энтропии. И наоборот, расширение спектра в режиме «свободной турбулентности» как фазы прекращения «когерентного» режима обеспечивает увеличение спектрального потока энергии и энтропии в диссипативный спектральный интервал с последующим уменьшением полной энергии системы течений.

Принципиальным здесь является то обстоятельство, что данный эффект является нелинейным, и есть все основания, чтобы его рассматривать как квазипериодическую генерацию и распад диссипативных структур, при этом характерное время существования такой структуры не имеет отношения к периодам малых собственных колебаний, известных в геофизической гидродинамике, подчеркнем особо, что внешнее воздействие на исследуемую систему было стационарным во времени и не могло генерировать вынужденные колебания какого-либо периода.

Перспективность дальнейших исследова-

ний связана, прежде всего, с проведением детального анализа пространственных спектров энергии поля течения для различных режимов интенсификации струйного течения, с исследованием системы под действием нестационарного ветра, причем интерес представляет как нестационарность по амплитуде, так и в большей степени нестационарность, связанная с сезонной изменчивостью поля ветра, с исследованием аналогичных процессов в многослойном океане.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федотов А.Б. Анализ временных масштабов долгопериодной изменчивости ветровой океанической циркуляции в двухслойном океане // Системы контроля окружающей среды. 2017. № 10 (30). С. 96–101.
2. Rhines P.B. Geostrophic turbulence // Ann. Rev. Fluid Mech. 1979. V. 11. P. 401–441.
3. Федотов А.Б. Спектральные потоки энтропии и энергии при самоорганизации β - турбулентности // Морской гидрофизический журнал. 1988. № 3. С. 9–14.
4. Ларичев В.Д., Федотов А.Б. Явление самоорганизации в геострофической турбулентности на β -плоскости // Доклады АН СССР, 1988. Т. 298. № 4. С. 971–975.

THE TIMESCALES ANALYSIS OF LONG-TERM VARIABILITY OF OCEANIC CIRCULATION FORCED BY THE STATIONARY WIND IN A TWO-LAYER OCEAN. PART 2. SPECTRAL ANALYSIS

A.B. Fedotov

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

Using numerical simulation of two-layer ocean with the layer depths corresponding to real oceanic conditions under the outer stationary vorticity flux and constant dissipation factors the investigation of the development of a large-scale circulation has been provided. There have been discovered the dependence of large-scale total energy circulation oscillations on the position of the enstrophy spectra mass-center.

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