

Явление отрицательной вязкости при вытягивании синоптических вихрей океана баротропными течениями*

Д.А. Арутюнян

Ансамбль синоптических океанских вихрей, который находится под воздействием фоновых течений, может быть представлен как квазидвумерная мезомасштабная турбулентность. Эволюция вихрей в ансамбле может происходить по нескольким сценариям: 1) первоначальное слияние одноименных близко расположенных вихрей; 2) периодическая или квазипериодическая эволюция горизонтальных размеров с ограниченным их изменением; 3) неограниченное вытягивание вихрей в горизонтальной плоскости. Представленная работа нацелена на демонстрацию возможности проявления отрицательной вязкости в акваториях Мирового океана на стадии неограниченного вытягивания мезомасштабных вихревых структур горизонтальными неоднородными течениями. Причина проявления отрицательной вязкости в такой системе связана с потерей энергии вытягивающихся вихрей и перераспределение ее в фоновые течения.

Ключевые слова: эллипсоидальный вихрь, полная энергия вихря, отрицательная вязкость, прямой и обратный энергетические каскады.

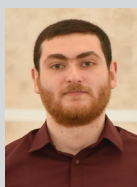
*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №09-05-07073).

Введение

В 1971 г. в СССР была опубликована монография Виктора Старра «Физика явлений с отрицательной вязкостью», привлекавшая внимание исследователей к этому весьма интересному явлению во многих разделах физики. Автор на доступном уровне объяснил причину значительного уменьшения турбулентного трения в ряде физических процессов. В нашем случае для океана и атмосферы суть уменьшения трения сводилась к следующему. В статистической гидродинамике удается отдельно описать эволюцию кинетической энергии осредненного и турбулентного (пульсационного) движений среды. Каждый вид движения затухает из-за наличия вязкости. Причем в осредненном движении энергия уменьшается за счет турбулентного трения, которое значительно превышает молекулярное трение, а в пульсационном – за счет молекулярной вязкости. Кроме того, эти виды движения обмениваются энергией между собой. В какую сторону происходит переток энергии – от осредненного течения в пульсационное или наоборот – заранее не ясно.

Более привычной является ситуация перераспределения энергии от осредненного движения в пульсационное (турбулентное). Такой тип взаимодействия понятен в случае неустойчивости осредненного течения, при котором в течении образуются вихри мень-

шего характерного размера, чем размер течений. Созданные вихри сами могут быть неустойчивыми и распадаются на более мелкие вихри. При этом энергия перераспределяется с больших масштабов на малые. Такое перераспределение энергии называется прямым энергетическим каскадом. Однако возможен и противоположный процесс – передача энергии от вихрей в осредненное течение, то есть перераспределение энергии от малых масштабов к большим. Такой процесс происходит с обратным энергетическим каскадом или, если использовать первоначальное название (например, как у В. Старра), то это явление с отрицательной вязкостью. Такие процессы не запрещены гидродинамикой, но малоизучены. Явления с отрицательной вязкостью кажутся менее естественными, но в природе встречаются. Это знаменитые пыльные бури в пустынях, пыльные бури на Марсе, интенсивные течения со взвешенными частицами в реках, например, Янцзы.



АРУТЮНЯН
Давид Арменович
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

В. Старр в качестве зон Мирового океана с заметными явлениями с отрицательной вязкостью предлагает акватории мощных течений, например, Гольфстрим. Что касается океанов, то надежные доказательства существования здесь явлений с отрицательной вязкостью находятся под большим вопросом. Целью данной работы является с позиции теории предложить океанский гидродинамический процесс, который должен приводить к явлению отрицательной вязкости.

Поясним, как влияет наличие прямого или обратного энергетического каскада течений на эффективную турбулентную вязкость среды. Для этого вернемся к вопросу об эволюции энергии осредненного и пульсационного движений. В случае прямого энергетического каскада осредненное течение теряет энергию как за счет турбулентной вязкости, так и за счет перераспределения энергии от течения на пульсационные движения (турбулентность). Обе потери осредненного движения одного знака, и их сумму можно представить как чисто вязкостные потери, но с большим эффективным коэффициентом турбулентной вязкости. При этом пульсационные движения получают дополнительную энергию и становятся более интенсивными. В случае обратного энергетического каскада энергия осредненного движения по-прежнему уменьшается за счет трения, но пополняется из энергии пульсационного движения. В результате потери энергии осредненным движением уменьшаются, возможно, значительно. Если, как и ранее, представить суммарную потерю энергии как результат некоего эффективного трения, то в этом трении коэффициент вязкости должен быть уменьшен по сравнению с исходным коэффициентом турбулентной вязкости. При этом осредненное движение должно стать более интенсивным, а пульсационное – менее значимым. В экстремальных случаях эффект уменьшения трения может

быть весьма значительным. При реализации обратного энергетического каскада в среде должны наблюдаться интенсивные течения с более слабой турбулизацией, что, собственно, и наблюдается в пыльных бурях и упомянутых ранее явлениях интенсификации средних течений и ветров.

До сих пор проблема обратного энергетического каскада в основном изучалась в задачах численного моделирования океанских и атмосферных течений. В данной работе будет предложено вполне конкретное гидродинамическое явление, допускающее аналитическое решение и приводящее к явлению отрицательной вязкости.

Из теории эллипсоидальных вихрей [1] известно, что вихри во внешнем баротропном течении вытягиваются в горизонтальном направлении. При таком вытягивании эффективное сечение ядра вихря (площадь эллипса) не меняется. Объем вихря также сохраняется. При вытягивании вихрь теряет часть своей энергии [2]. Теряемая вихрем энергия возвращается в течение. То есть процесс потери энергии вихрем одновременно приводит к перераспределению энергии от малых горизонтальных масштабов (масштаб вихря) на большие масштабы (горизонтальный масштаб течения), что соответствует обратному энергетическому каскаду. Первоначально такие явления назывались явления с отрицательной вязкостью [3].

Эволюция энергии вихря во внешнем течении

В работе [1] было найдено выражение для полной механической энергии вихря

$$E = \frac{3}{40\pi} \rho V^2 \sigma^2 \frac{A}{c} \int_0^\infty \frac{ds}{\sqrt{(s^2 + vs + 1)(A^2 + s)}}, \quad (1)$$

где ρ – плотность воды; V – объем вихря (эллипсоида); σ – потенциальная завихренность; a, b, c – полуоси эллипсоида; $v = \frac{a}{b} + \frac{b}{a}$ – горизонтальный параметр; $A = \frac{N}{f} \frac{c}{\sqrt{ab}}$ – вертикальный параметр; N – частота Вайселя – Брента; f – параметр Кориолиса.

У вихря при действии на него баротропного течения меняется только параметр горизонтальной вытянутости v , а все остальные параметры сохраняются. Следовательно, удобно исследовать энергию вихря как функцию одной переменной $E(v)$. Скорость изменения энергии вихря при вытягивании есть

$$\frac{dE}{dv} = \frac{dE}{dv} \cdot \frac{dv}{dt}, \quad \frac{dE}{dv} = -\frac{1}{2} E' \int_0^\infty \frac{s ds}{(s^2 + vs + 1) \sqrt{(s^2 + vs + 1)(A^2 + s)}}, \quad (2)$$

$$E' = \frac{3}{40\pi} \rho V^2 \sigma^2 \frac{A}{c} = const.$$

Потеря энергии вихря при вытягивании как проявление эффекта отрицательной вязкости

Для исследования эволюции энергии необходимо вычислить знак производной $\frac{dE}{dt}$. Очевидно, что потеря энергии вихря произойдет при $\frac{dE}{dt} < 0$. Горизонтальный параметр $v = a/b + b/a$ постоянно растет с вытягиванием, то есть $\frac{dv}{dt} > 0$. Остается выяснить знак $\frac{dE}{dv}$. Рассмотрим изменение энергии вихря $\frac{dE}{dv}$ при его вытягивании до 100 раз при нескольких параметрах $A=0.1, 1, 10$ (рис. 1).

Как видим, производная энергии вихря по параметру v везде отрицательна $\frac{dE}{dv} < 0$. Это говорит о том, что с вытягиванием вихрь лишь теряет энергию. Возникает вопрос: куда уходит теряемая энергия? В системе «течение—вихрь» энергия может «путешествовать» только между ними, то есть либо от течения передаваться вихрю, либо наоборот – от вихря перейти обратно в течение. Формула (2) и рисунок 1 показывают, что при вытягивании часть энергии вихря возвращается обратно в течение. Вышесказанное справедливо для взаимодействия одного вихря с фоновым течением. При рассмотрении ансамбля вихрей в том же течении очевидно, что каждый из вихрей будет взаимодействовать с течением и с другими вихрями. При этом возникнет новый эффект – слияние

близко расположенных вихрей. Эффекты взаимодействия вихрей друг с другом на несколько больших расстояниях, где уже не реализуется слияние, схожи с эффектами проявления обычного взаимодействия вихрей с течениями. Здесь возможен вариант квазипериодического поведения параметров вихря во времени – режимы вращения или колебания. Кроме того, возможен и режим неограниченного вытягивания одного вихря другим. Суммируя сказанное, делаем физический вывод – в поведении ансамбля вихрей на фоне неоднородного баротропного течения следует ожидать:

- 1) на начальном этапе за короткое время произойдет слияние близкорасположенных вихрей;
- 2) затем часть вихрей будут существовать в периодическом или квазипериодическом режиме, что в среднем не увеличит и не уменьшит их энергию;
- 3) наконец, часть вихрей вытянется в нить, что приведет к потере их энергии.

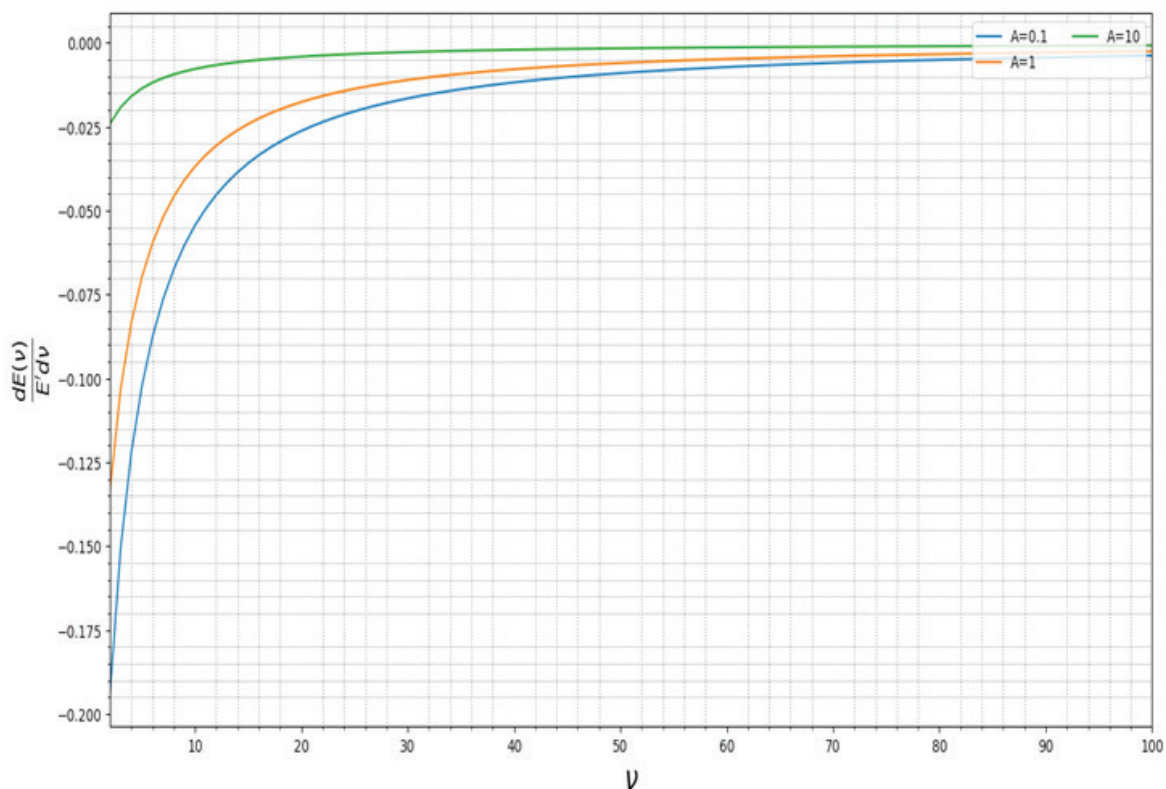


Рис. 1. График зависимости изменения относительной энергии $(\frac{1}{E} \cdot \frac{dE}{dv})$ вихря по мере увеличения параметра v для различных параметров $A=0.1, 1, 10$.

Вытягивающиеся вихри ответственны за проявление свойств отрицательной вязкости. Таким образом, на длительном промежутке времени (кроме самого начального этапа развития) в ансамбле вихрей на фоне неоднородного течения следует ожидать проявление свойств отрицательной вязкости. Для наглядности представим блок-схему «путешествия» энергии.

Рис. 2 демонстрирует качественную картину передачи энергии от явлений одних масштабов к явлениям другого масштаба. Так, крупномасштабное течение с горизонтальным размером L , заметно превышающим радиус деформации Россби $L \gg L_R$, в результате неустойчивости порождает вихри с размером порядка L_R и тем самым рождает прямой энергетический каскад – перераспределение энергии с больших масштабов L на более мелкие масштабы L_R . Следующий шаг – эволюция вихрей и, как главный элемент эволюции, вытягивание вихрей под действием фоновых течений. По мере вытягивания поперечный размер вихря уменьшается, приближаясь к размерам мезомасштабных явлений L_{SR} . В результате энергия вихря смещается на размеры L : $L_R \geq L \geq L_{SR}$. Это по-прежнему прямой энергетический каскад. Однако процесс вытягивания вихря по горизонтали сопровождается одновременным возвращением энергии с масштабов вихря на размер крупномасштабных течений. Это обратный энергетический каскад. Таким образом, в предложенной схеме демонстрируются процессы перераспределения энергии от явлений с размером мезомасштаба и субмезомасштаба к крупномасштабным явлениям.

В работе [2] было показано, что максимальной энергией обладают вихри, круглые в плане. Для таких вихрей $\nu=2$. Когда такой вихрь вытягивается до состояния $\nu>2$, он теряет энергию, которая передается обратно течению. Но вытягивание вихря происходит постепенно, что обеспечивает накачку энергии в течение до



Рис. 2. Схема обмена энергией между течением и вихрем при вытягивании вихря.

тех пор, пока энергия вихря не уменьшится до нуля, что будет соответствовать его уничтожению. Под первоначально рождаемым течением вихрем следует понимать круглый в плане вихрь ($\nu=2$). То есть это тот вихрь, который накапливает в себе энергию, полученную от течения, а дальше – с вытягиванием по горизонтали – только теряет энергию. Пусть энергия такого вихря E_1 . Тогда энергия течения после рождения вихря станет равной $E_0 - E_1$, где E_0 – исходная энергия течения. Зафиксируем n состояний вихря с разными, постепенно увеличивающимися, параметрами $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n$, где $\nu_1=2 < \nu_2 < \nu_3 < \dots < \nu_n$. При вытягивании круглого в плане вихря со значением ν_1 до значения ν_2 теряется энергия ΔE_1 , энергия течения становится $(E_0 - E_1 + \Delta E_1)$. Далее при вытягивании от ν_2 до ν_3 теряется еще энергия ΔE_2 , которая идет в течение, и энергия течения становится $(E_0 - E_1 + \Delta E_1 + \Delta E_2)$. Через $(n+1)$ переходов энергия течения будет равна $(E_0 - E_1 + \Delta E_1 + \Delta E_2 + \dots + \Delta E_n)$. Видим, что эволюция системы после рождения вихря, благодаря процессу его вытягивания, сопровождается монотонной перекачкой энергии от вихря к течению, то есть поддерживается обратный энергетический каскад.

Заключение

Итак, мы выяснили, что вихрь, первоначально получая энергию от течения, на стадии вытягивания отдает обратно в течение часть своей энергии. Такой процесс характеризуется обратным энергетическим каскадом или в старой терминологии называется явлением с отрицательной вязкостью. Это означает, что на акватории океана, в зонах, где происходит вытягивание вихрей, следует ожидать интенсификации течений, возможно, струйных течений, и уменьшения эффективной турбулентной вязкости.

Автор благодарен члену-корреспонденту РАН В.В. Жмуру за внимание к работе.

Литература

1. В.В. Жмур
Мезомасштабные вихри океана, РФ, Москва, ГЕОС, 2011, 290 с.
2. В.В. Жмур, Д.А. Арутюнян
Океанология, 2022, 62(6), (печат.).
3. В.П. Старр
Физика явлений с отрицательной вязкостью: пер. с англ., СССР, Москва, Мир, 1971, 261 с.
4. В.В. Жмур, К.К. Панкратов
Океанология, 1989, 29(2), 205.
5. В.В. Жмур, К.К. Панкратов
Океанология, 1990, 30(2), 170.
6. Г. Ламб
Гидродинамика: пер. с англ., СССР, Москва, Ленинград, Гостехтеориздат, 1947, 929 с.

English

The Phenomenon of Negative Viscosity During the Stretching of Synoptic Ocean Eddies by Barotropic Currents*

David A. Harutyunyan

Moscow Institute of Physics and
Technology9 Institute Lane, Dolgoprudny,
Moscow reg., 141701, Russia
arutyunyan.da@phystech.edu

Abstract

An ensemble of synoptic oceanic vortices, which is influenced by background currents, can be represented as the quasi-two-dimensional mesoscale turbulence. The evolution of vortices in an ensemble can occur according to several scenarios: 1) initial merging of closely spaced vortices of the same name; 2) periodic or quasi-periodic evolution of horizontal dimensions with their limited change; 3) unlimited stretching of vortices in the horizontal plane. The work is aimed at demonstrating the possibility of negative viscosity manifestation in the defined water areas of the World Ocean at the stage of unrestricted stretching of mesoscale vortex structures by horizontal inhomogeneous currents. The reason for the manifestation of negative viscosity in such a system is associated with the loss of energy of the elongated vortices and its redistribution into background currents.

Keywords: ellipsoidal vortex, total vortex energy, negative viscosity, direct and reverse energy cascades.

*The work was financially supported by RFBR (project 09-05-07073).

Images & Tables

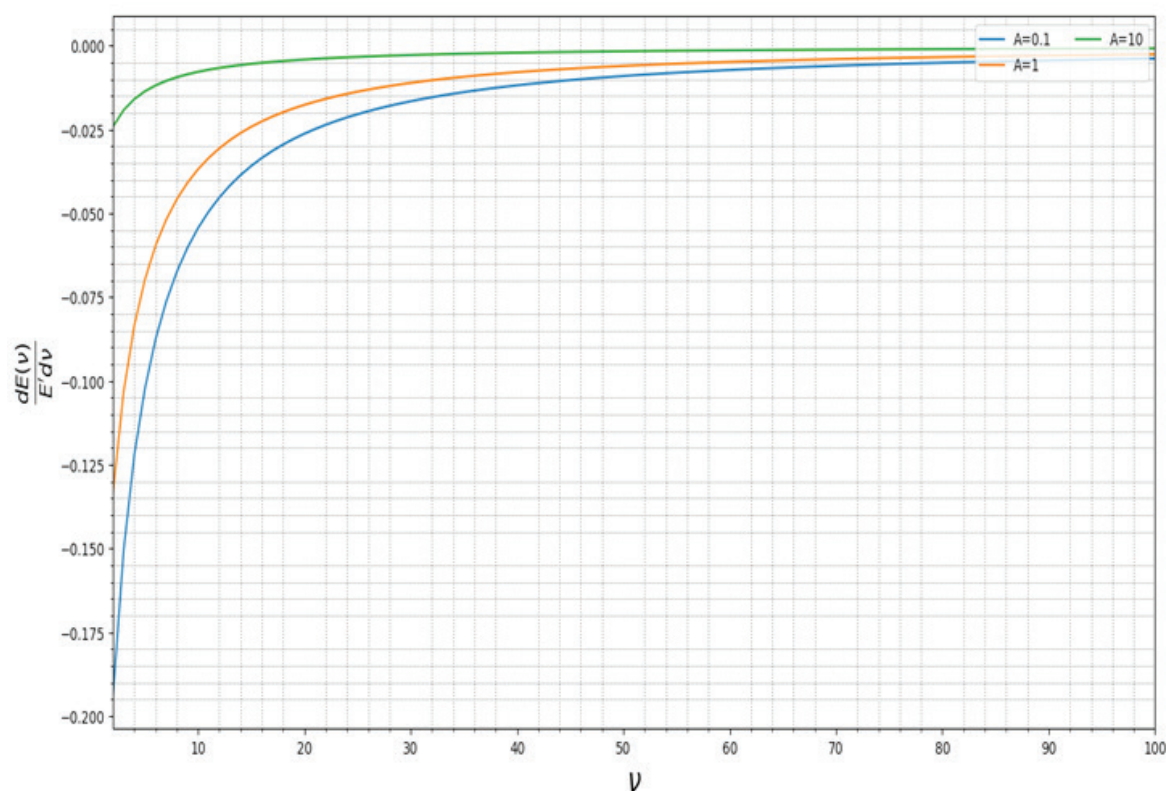


Fig. 1. Graph of the dependence of the change in the relative energy ($\frac{1}{E} \cdot \frac{dE}{dv}$) of the vortex as the parameter v increases for various parameters $A=0.1, 1, 10$.

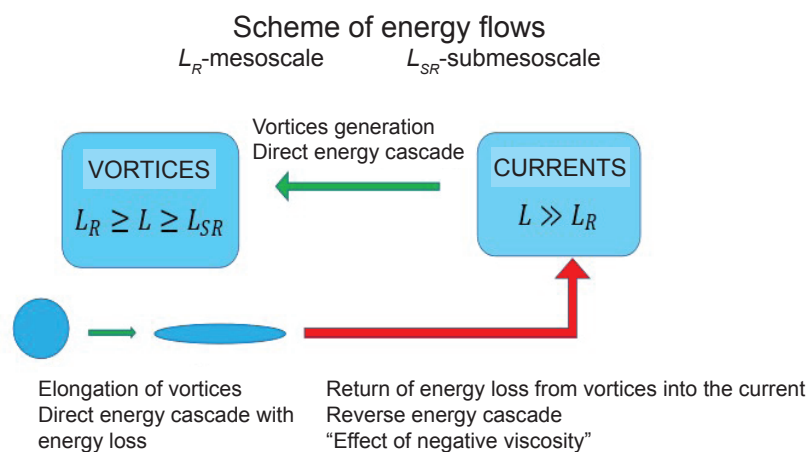


Fig. 2. Scheme of the energy exchange between the current and the vortex when the vortex is pulled out.

References

1. V.V. Zhmur
Mesoscale Oceanic Vortices, [Mezomasshtabnye vikhri okeana], RF, Moscow, GEOS, 2011, 290 pp. (in Russian).
2. V.V. Zhmur, D.A. Harutyunyan
Oceanology, 2022, 62(6), (in print).
3. V.P. Starr
Physics of Negative Viscosity Phenomena, Ser. Earth & Planetary Science, USA, NY, New York, MacGrow-Hill Book Comp., 1968, 256 pp.
4. V.V. Zhmur, K.K. Pankratov
Okeanologiya [Russ. Oceanology], 1989, 29(2), 205 (in Russian).
5. V.V. Zhmur, K.K. Pankratov
Okeanologiya [Russ. Oceanology], 1990, 30(2), 170 (in Russian).
6. H. Lamb
Hydrodynamics: 6th Ed., USA, NY, New York, Dover Publ., 1945 (1932 reprint), 738 pp.