

Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

R. V. Ozmidov, Certain features of the energy spectrum of oceanic turbulence, *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1965, Volume 161, Number 4, 828–831

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use
<http://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 169.233.218.246

February 21, 2025, 01:58:25



Р. В. ОЗМИДОВ

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ОКЕАНИЧЕСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

(Представлено академиком А. Н. Колмогоровым 30 XI 1964)

Известный закон «степени $-5/3$ » (^{1, 2}) для распределения плотности энергии по волновым числам k турбулентных «вихрей» получен при предположении о снабжении потока энергией от внешних источников лишь в самом длинноволновом участке спектра. Хаотичность механизма дробления «вихрей» позволяет считать их, начиная с некоторого масштаба, изотропными. Тогда для этих «вихрей» (при условии, что силы вязкости для них несущественны) закон «степени $-5/3$ » легко получается из соображений размерности: $f(k) = c\varepsilon^{2/3}k^{-5/3}$, где ε — определяющий параметр, представляющий собой поток энергии по каскаду вихрей (равный скорости диссипации турбулентной энергии в вязкостном участке спектра), c — безразмерная универсальная постоянная.

В природе, однако, могут существовать турбулентные движения, в которых снабжение энергией происходит не только с длинноволнового участка спектра, но, вообще говоря, и по всему интервалу волновых чисел. Примером таких потоков могут служить, в частности, морские течения, одним из источников снабжения энергией которых является касательное напряжение трения турбулентного потока воздуха (ветра). Действительно, мелкие турбулентные образования ветра могут, по-видимому, вызывать касательным трением столь же мелкие вихревые образования в жидкости, непосредственно передавая им свою энергию.

Другим важным источником снабжения морских течений энергией является неоднородность процессов нагревания и остывания морских вод. Масштабы этих неоднородностей также могут широко варьировать от локальных возмущений, обусловленных экранированием Солнца облаками, и вплоть до глобального различия теплоснабжения вод в экваториальных и полярных областях океана. Среди энергоснабжающих факторов следует также упомянуть о приливообразующих силах, вызывающих в океане приливные движения вод периодического характера.

При исследовании проблемы энергоснабжения океанических вод весьма важно установить, существенна ли передача энергии от внешних источников по всему спектру волновых чисел или она локализована лишь в окрестностях отдельных значений величины k . Ответить на этот вопрос, к сожалению, весьма затруднительно ввиду слабой изученности статистических характеристик морской турбулентности. Исследование этих характеристик усложняется необходимостью конструирования специальной аппаратуры, пригодной для работы в море в различных участках спектра. Так, для записи турбулентных пульсаций с периодами от сотых долей секунды до десятков секунд требуется весьма малоинерционная аппаратура, образцы которой созданы в последнее время как у нас в стране, так и за рубежом. Полученные с помощью такой аппаратуры записи флуктуаций скорости в море позволили, в частности, показать, что энергетический спектр морской турбулентности в интервале волновых чисел $k = 1-10^{-2} \text{ см}^{-1}$ удовлетворительно описывается законом «степени $-5/3$ » (³). Следовательно, в этом участке величин k непосредственную передачу энергии морским водам от внешних источников можно считать несущественной. Этот про-

песс, по всей видимости, должен быть значителен в явлениях несколько больших масштабов — порядка десятка метров ($k = 10^{-3} \text{ см}^{-1}$). В таких масштабах, как известно, заключена основная часть энергии волн, генерируемых на поверхности океана ветром. Приток энергии от ветра к волнам, конечно, весьма изменчив — он зависит от скорости и продолжительности действия ветра, длины разгона и т. д., поэтому в дальнейшем под величиной такого притока энергии следует понимать лишь значение, осредненное за большой промежуток времени.

Что же касается процессов с масштабами порядка 1—10—100 км ($k = 10^{-5} - 10^{-7} \text{ см}^{-1}$)*, то сведения об их энергосодержании еще более скудны. Ясно только, что в таких крупномасштабных движениях сосредоточена значительная доля общей кинетической энергии вод океана. Такое заключение позволяет прийти к выводу о возможности использовать при исследованиях энергосодержания крупномасштабных вихрей более грубые приборы типа обычных гидрологических вертушек. Такие приборы (например, широко распространенные сейчас вертушки БПВ-2) фиксируют горизонтальную компоненту скорости течения с осреднением в несколько минут и способны непрерывно работать на буйковых установках в океане в течение многих суток.

Расчет энергосодержания крупных вихрей в океане был произведен нами по вертушечным данным с помощью метода аналитической фильтрации исследуемых записей скорости течения. Частотная (спектральная) характеристика применявшегося при этом ядра фильтра и техника самого процесса фильтрования аналогичны описанным в работе (4). Для расчета использована 30-дневная запись скорости вертушкой БПВ-2 (с интервалами между отдельными фиксациями скорости в 30 мин), работавшей в Атлантическом океане в точке с координатами $55^{\circ}15' \text{ с. ш.}$ и $16^{\circ}30' \text{ з. д.}$ на горизонте 200 м. Расчет плотности энергии пульсаций скорости был произведен для пульсаций с периодами T , лежащими в интервалах 3—6—12—24—48—96 час. Ошибка расчета, вызванная ограниченностью длины записи и ее дискретностью, для гармоник указанного периода незначительна (5). Взаимопереход пространственных и временных переменных в функции плотности энергии и законе «степени $-5/3$ » осуществлялся с помощью гипотезы «замороженной турбулентности», согласно которой $2\pi k = \omega / V$, где $\omega = 2\pi / T$ — угловая частота колебания скорости в данном турбулентном вихре при прохождении его через фиксированную точку пространства со средней скоростью V , равной в период наблюдений приблизительно 10 см/сек.

График функции плотности энергии $f(\omega)$, полученной в результате расчетов, представлен на рис. 1. График построен по 5 экспериментальным значениям функции $f(\omega)$, отнесенным к серединам упомянутых выше временных интервалов. Из рисунка видно, что экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с кривой закона «степени $-5/3$ » до периодов

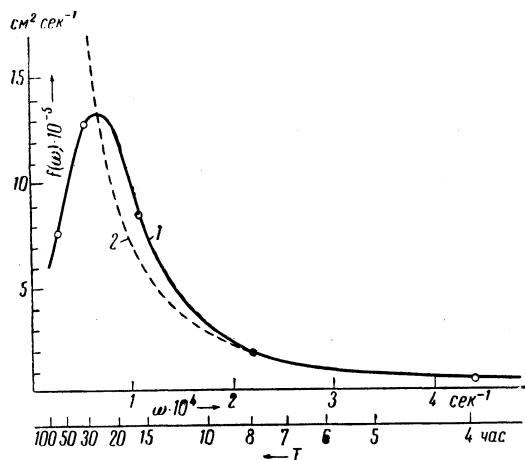


Рис. 1. Графики функции плотности энергии $f(\omega)$. 1 — экспериментальная кривая, подсчитанная по вертушечным данным; 2 — кривая закона «степени $-5/3$ »

* Речь здесь, очевидно, может идти лишь о процессах с горизонтальной ориентацией.

пульсаций T , приблизительно равных 10 час. Для больших же значений T обнаруживается существенное отклонение экспериментальных данных от теоретической кривой, причем для значений $T < 26$ час экспериментальные точки располагаются выше теоретических, а при дальнейшем росте T наблюдается резкое уменьшение значений функции $f(\omega)$. Наличие резко выраженного максимума на кривой $f(\omega)$ свидетельствует о существовании в исследуемом поле скорости некоторых преобладающих колебаний, содержащих значительную энергию, что, в свою очередь, говорит об усиленном притоке энергии от внешних источников в области частот этих колебаний.

Период обнаруженных преобладающих колебаний близок к периоду приливных течений и инерционных колебаний (т. е. резонансных движений воды, обусловленных лишь силой инерции и силой Кориолиса). Такие колебания вообще типичны для скоростных полей океанов, и их обычно легко обнаружить непосредственно в записях скорости движения океанических вод. Пространственный масштаб l , соответствующий инерционным (для средних широт) и приливному колебаниям, может быть получен умножением периодов колебаний на среднюю переносную скорость течения, близкую, как в нашем случае, так и в среднем для океана, к 10 см/сек. Величина l при этом для таких колебаний оказывается приблизительно равной 10 км. В области же масштабов от нескольких километров до нескольких десятков метров приток энергии от внешних источников, по-видимому, незначителен, и здесь, как это следует из рис. 1, распределение плотности энергии близко к даваемому законом «степени $-5/3$ ». В зоне же волновых чисел, близких к 10^{-3} см $^{-1}$ ($l = 10$ м), функция $f(k)$ образует уже упоминавшийся «выброс» и при этом «перескакивает» (из-за добавки энергии от ветра) с одной кривой закона «степени $-5/3$ » на другую кривую аналогичного закона, но с другим значением величины ε . О необходимости существования такого скачка функции $f(k)$ свидетельствуют и нереально большие значения плотности энергии, которые получились бы для крупномасштабных процессов при экстраполяции на них кривой закона «степени $-5/3$ » со значением $\varepsilon = 0,61$ см 2 ·сек $^{-3}$, полученным в работе (3) для процессов малого масштаба. Таким образом, величина ε , имеющая, по нашим данным, порядок 10^{-3} см 2 ·сек $^{-3}$ в выражении закона «степени $-5/3$ » для среднемасштабных процессов ($l \sim 50$ м — 5 км), представляет собой лишь поток энергии по каскаду таких вихрей, и величина ε здесь не равна скорости диссипации энергии в вязкостном интервале, где диссипируется и добавка энергии, получаемая в зоне 10-метровых масштабов.

Усиленный приток энергии к океаническим водам должен существовать также и в области масштабов, соизмеримых с размерами самих океанов (т. е. порядка 1000 км). Этот приток энергии должен обуславливаться глобальными различиями в теплоснабжении вод океанов и действием крупномасштабных барических образований (постоянными центрами действия атмосферы, системами пассатных ветров и т. д.). Поэтому следует ожидать, что и в окрестностях масштаба $l = 1000$ км должен существовать определенный выброс в функции $f(k)$, который, к сожалению, в настоящее время еще не может быть подтвержден экспериментальными данными ввиду отсутствия таковых. Между этим глобальным максимумом и максимумом в области масштабов $l = 10$ км, возможно, существует небольшой участок волновых чисел, где снова применим закон «степени $-5/3$ » (опять-таки с другим значением величины ε). Этот участок может располагаться вблизи масштабов $l \sim 100$ км, где приток внешней энергии снова, по-видимому, относительно невелик.

Общая схема распределения плотности энергии по разномасштабным движениям океанических вод представлена на рис. 2. Согласно приведенным выше данным, на рисунке изображены три зоны, в которых функция $f(k)$ описывается законом «степени $-5/3$ », и три участка интенсивного притока энергии к океаническим водам от внешних источников. Правая

прямая (в логарифмическом масштабе) закона «степени $-5/3$ » ($c \text{ с} \text{ с}^{2/3} = 0,34 \text{ см}^{1/3} \cdot \text{сек}^{-2}$) заимствована из работы (3), средняя прямая представляет собой логарифмическое изображение (в пространственных переменных) кривой закона «степени $-5/3$ » рис. 1 ($c \text{ с} \text{ с}^{2/3} = 6,0 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{1/3} \cdot \text{сек}^{-2}$), а левая часть схемы носит, как уже говорилось, предположительный характер.

Совершенно очевидно, конечно, что предложенная схема распределения плотности энергии сильно упрощена и в известной степени гипотетична. Оправдываться она может в той или иной степени лишь в среднем по большому числу различных гидрометеорологических ситуаций и географических условий. В конкретных же районах Мирового океана в отдельные сезоны и при различных погодных условиях вид функций $f(k)$ может существенно меняться — могут появляться или, наоборот, исчезать отдельные ее максимумы и участки выполнимости закона «степени $-5/3$ ». Кроме того, повышение точности и длительности измерений скоростей в океане, а также усовершенствование практических методов расчета функции $f(k)$ безусловно позволит конкретизировать ряд деталей и на осредненной кривой $f(k)$ (например, разделить близкие максимумы, обусловленные приливными и инерционными колебаниями). Однако уже сейчас с достаточным основанием, по-видимому, можно утверждать, что основные особенности функции $f(k)$ для океана, изображенные на рис. 2, носят вполне объективный характер и отражают общие закономерности энергоснабжения океана и перераспределения энергии в океанических водах.

В заключение пользуюсь случаем выразить искреннюю благодарность акад. А. Н. Колмогорову и проф. В. Б. Штокману за ряд советов и указаний по вопросам, затронутым в настоящей заметке.

Институт океанологии
Академии наук СССР

Поступило
30 XI 1964

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ А. Н. Колмогоров, ДАН, 30, № 4 (1941); 32, № 1 (1941). ² А. М. Обухов, Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., № 4—5 (1941). ³ H. L. Grant, R. W. Stewart, A. Moilliet, J. Fluid Mech., 12, № 2 (1962). ⁴ Р. В. Озмидов, Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 11 (1964). ⁵ R. B. Blackman, J. W. Tukey, The Measurement of Power Spectra, N. Y., 1959.

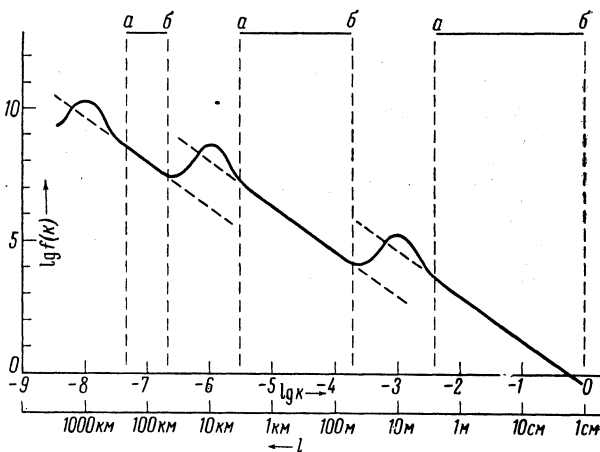


Рис. 2. Схема распределения плотности энергии по разномасштабным движениям океанических вод. а — б — зоны выполнимости закона «степени $-5/3$ »