

## Турбулентность, индуцируемая штормовыми волнами на глубокой воде

© 2015 С.Ю. Кузнецов\*, Я.В. Сапрыкина\*, В.А. Дулов\*\*,  
А.М. Чухарев\*\*

*\*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия  
E-mail: kuznetsov@ocean.ru, saprykina@ocean.ru*

*\*\*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия  
E-mail: dulov1952@gmail.com, alexchukh@mail.ru*

Поступила в редакцию 16.04.2015 г. После доработки 29.04.2015 г.

Представлены результаты лабораторных и натурных экспериментов, выполненных в ноябре – декабре 2014 г., по исследованию турбулентности, индуцируемой волновым движением. В штормовых условиях, когда отсутствуют обрушения волн, проведены синхронные измерения возвышений свободной поверхности воды и флуктуаций трех компонент скорости частиц воды в диапазонах волновых и турбулентных частот и в диапазоне глубин от поверхности до половины длины поверхностных волн. Разработан метод разделения измеренных флуктуаций скорости на волновую составляющую и две турбулентные (индуцированную волновыми движениями и фоновую гидродинамическую турбулентность). Прямыми инструментальными измерениями подтверждено расслоение волнового потока на приповерхностный турбулентный слой, индуцированный волновым движением, и нижележащий слой с фоновой гидродинамической турбулентностью.

**Ключевые слова:** турбулентность, индуцируемая волнением, фоновая турбулентность, натуральный эксперимент, штормовые волны.

**Введение.** Согласно определению, данному А.С. Мониним и Р.В. Озмидовым, турбулентность – это явление, «наблюдающееся во многих течениях жидкостей и газов и заключающееся в том, что термодинамические и гидродинамические характеристики таких течений (скорость, температура, давление, плотность и т. п.) испытывают хаотические флуктуации (создаваемые наличием в этих потоках многочисленных вихрей разных размеров) и вследствие этого изменяются от точки к точке и с течением времени весьма нерегулярно» [1]. Возникновение турбулентных пульсаций скорости частиц воды в волновом потоке впервые экспериментально зафиксировано А.А. Дмитриевым и Т.В. Бончковской с помощью светополяризационного метода. В их работе приведены три последовательные фотографии распространения волн на неподвижную воду, из которых видно, что по мере удаления переднего фронта волны от точки съемки, все большая по высоте приповерхностная область потока охватывается турбулентным движением [2].

Существование в лабораторном волновом потоке на глубокой воде областей с ламинарным и турбулентным режимами зафиксировано С.В. Доброклонским и Н.В. Контобойцевой с помощью классического метода Рейнольдса – окрашенных струй. В воду бросали крупинки краски, которые при осаморской гидрофизический журнал № 5 2015

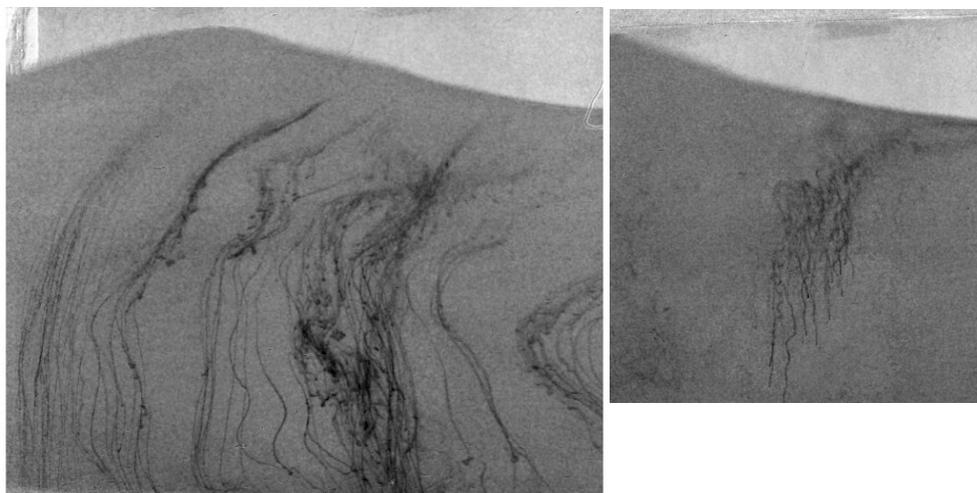
ждении оставляли след в виде тонких вертикальных линий, а затем включался волнопродуктор и проводились наблюдения, фиксируя, сохраняют ли окрашенные линии свою индивидуальность [3]. В результате было установлено следующее: 1) турбулентность зарождается в верхней части потока при крутизне волн  $\delta > 0,021$ ; 2) толщина приповерхностного турбулентного слоя  $l_T$  линейно связана с высотой и длиной волны, а именно  $l_T = 0,75H + 0,008\lambda$ . Эти эксперименты проводились в канале глубиной  $h = 0,9$  м при волнах высотой  $H = 0,015 - 0,160$  м, длиной  $\lambda = 0,66 - 1,56$  м и с периодом  $T = 0,65 - 1,00$  с. Подобные исследования были проведены также М. Донеланом. В его статье [4] сообщается, что толщина турбулизованного приповерхностного слоя по визуальным оценкам имеет порядок высоты волны. Отметим, что перечисленные выше заключения основаны на визуальных наблюдениях, а не на инструментальных измерениях характеристик турбулентности.

Турбулентность верхнего слоя моря и ее связь с ветровым волнением интенсивно изучались во второй половине XX в. и в последние годы (см., например, работы [5 – 11] и др.). К настоящему моменту выяснено, что волны порождают турбулентность, причем ее генерация может осуществляться как в результате обрушений волн, так и непосредственно самим волновым движением. Второй механизм генерации предполагался главным на начальном этапе развития теории морской приповерхностной турбулентности [5, 12]. Позже были предложены полуэмпирические модели, где в качестве главного механизма рассматривались обрушения волн [6, 10, 11]. Однако в последние годы вопрос о значении турбулентности, обусловленной ветровыми волнами, был поставлен вновь [9 – 11], причем в работе [13] было показано, что при учете этой турбулентности существенно улучшаются результаты моделирования крупномасштабной циркуляции. На сегодняшний день разрешению перечисленных неясностей препятствует дефицит надежных натуральных данных.

Настоящая работа выполнена с целью конкретизации физической картины генерации турбулентности необрушивающимися волнами. Основная идея работы – проведение параллельных экспериментов в лабораторных и натуральных условиях с использованием новых средств наблюдений и измерений характеристик турбулентности. В статье представлены предварительные результаты, полученные в ноябре – декабре 2014 г. в рамках проекта РФФИ «Юг России» 14-45-01572.

**Описание экспериментов.** Лабораторный эксперимент был проведен в ноябре – декабре 2014 г. в гидравлическом лотке Академии водного хозяйства в Москве. Длина лотка – 12 м, ширина – 0,45 м, высота – 0,7 м. Тестировались необрушивающиеся монохроматические волны с периодами 0,5; 0,7; 1,0; 1,25 с и высотами 3 – 6 см при глубинах воды 30 – 40 см. Волнение измерялось емкостными струнными волнографами с частотой опроса 18 Гц, флуктуации скорости частиц воды регистрировались двумя трехкомпонентными акустическими измерителями *Vectrino* производства компании *Nortek* с частотой опроса 25 Гц последовательно на 16 горизонтах,

длительность записей составляла 4 мин. Поток воды визуализировался с помощью частиц пищевого красителя, оставлявших окрашенный след при осаждении. Размывание следов краски фиксировалось видеосъемкой, выполняемой с частотой 29 кадров в секунду. Фрагменты изображения лотка с окрашенными следами показаны на рис. 1.



**Рис. 1.** Окрашенные следы частиц красителя в волновом потоке в лабораторном лотке (справа показано осаждение окрашенных частиц после их выхода из приповерхностного слоя интенсивной турбулентности)

Натурный эксперимент проводился в декабре 2014 г. на стационарной океанографической платформе Черноморского гидрофизического полигона в районе пгт Кацивели, расположенной в полукилометре от берега. Глубина в месте проведения измерений – 28 м. Три компоненты пульсаций скорости частиц воды, температура, давление и электропроводность регистрировались синхронно с частотой опроса 100 Гц измерительным комплексом «Сигма-1» [14]. Электромагнитный измеритель пульсаций трех компонент скорости в этом комплексе представляет собой шар диаметром 3 см, на верхнем «полюсе» которого расположены миниатюрные датчики температуры и электропроводности. Измерения проводились при погружении прибора на 10 м с последовательными остановками примерно на 5 мин в 17 точках в диапазоне глубин от 0,2 до 10 м. В 6 м от этого комплекса был установлен струнный волнограф с частотой опроса 20 Гц [15]. Синхронно с записью выполнялась видеосъемка морской поверхности с целью наблюдения за обрушениями волн. Метеорологические параметры регистрировались метеостанцией *Davis 6152EU*, установленной на платформе, а скорости и направления средних течений на горизонтах 3, 5, 10, 15, 20, 25 м – измерителями МГИ-1308 в рамках непрерывного мониторинга течений, выполняемого с платформы отделом гидрофизики шельфа Морского гидрофизического института РАН (МГИ).

Измерения осуществлялись в штилевых условиях при слабой зыби и в отсутствие обрушений волн (таблица). В диапазоне глубин от поверхности до 10 м плотностная стратификация была нейтральной, а скорости течений не

превосходили 20 см/с. При обработке данных особого внимания требовали записи, при которых измерительная головка комплекса «Сигма-1» располагалась на глубинах 0,2 – 0,4 м, поскольку во впадинах наиболее интенсивных волн она несколько раз за время эксперимента оказывалась в воздухе. Соответствующие моменты времени были определены по видеозаписям. Эти события отчетливо проявились также на записях электропроводности, что и позволило с определенностью исключить эти участки записей из анализа.

Основные гидрометеорологические условия в период проведения натуральных экспериментов

Дата	Местное время	Скорость ветра на горизонте 22 м, м/с	Высота значительных волн, м	Частота спектрального пика волнения, Гц
13.12.2014 г.	15:40 – 16:48	2,87	0,42	0,22
14.12.2014 г.	09:50 – 11:43	0,35	0,25	0,21
15.12.2014 г.	09:19 – 11:18	2,18	0,16	0,24

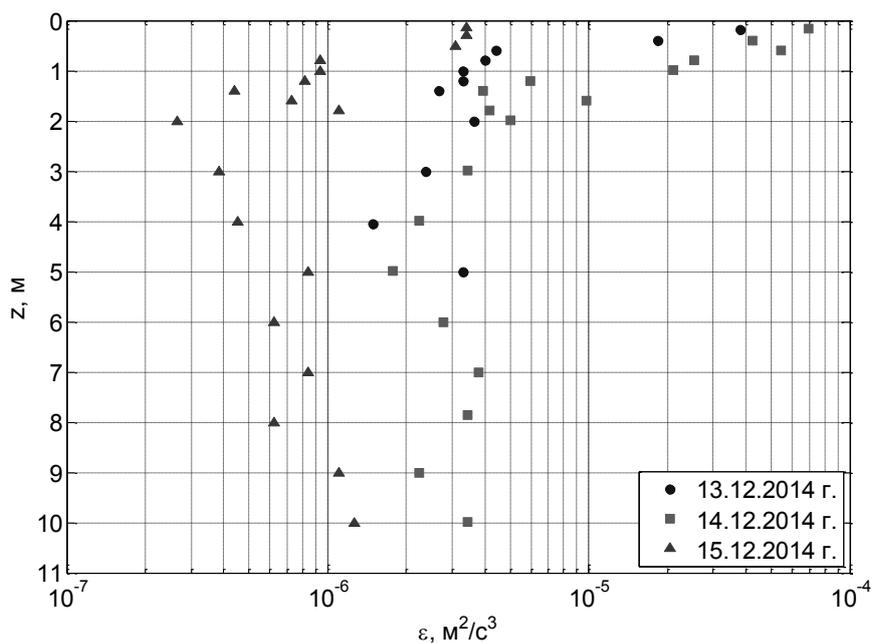
Как в лабораторных, так и в натуральных экспериментах на поверхности жидкости отсутствовали напряжения, связанные с ветром (по крайней мере в рассматриваемых штилевых условиях эти напряжения существенно ниже, чем в случаях генерации волн ветром). Также отсутствовали обрушения волн, а во время натуральных экспериментов, согласно визуальным наблюдениям, отсутствовала циркуляция Ленгмюра. Таким образом, единственным источником турбулентности в верхнем слое могло быть только само волновое движение жидкости.

**Обсуждение результатов.** Лабораторные эксперименты показали четкое расслоение волнового потока на приповерхностный слой, где окрашенные следы быстро размываются, и нижележащую область с относительно продолжительным временем их существования. На рис. 1, где волны распространяются слева направо, следы изогнуты из-за смены направления течения. В верхнем слое течение индуцируется волнами и направлено вправо, а ниже возникает компенсационный поток противоположного направления. Вблизи поверхности виден слой потока, где следы полностью размыты.

Видеозаписи экспериментов позволили отследить эволюцию окрашенных следов с разрешением по времени  $1/29$  с, задаваемым частотой кадров. При этом четко выделялся кадр, на котором частицы красителя попадали на поверхность воды после их разбрасывания над потоком с установившимся волновым движением. Однако на следующем кадре частицы уже не наблюдались, поскольку окрашенная область «мгновенно» размывалась. Через 15 – 30 кадров, когда частицы опускались ниже интенсивно турбулизованного слоя, их можно было наблюдать снова, причем за частицами оставались вертикальные окрашенные следы. Пример такой картины приведен на рис. 1 справа. Впоследствии следы деформировались и размывались, но оставались видимыми в течение 100 – 300 кадров. Таким образом, следы в верхнем слое размываются за время, которое, по крайней мере, на два порядка меньше, чем время размывания следов на среднем горизонте лотка. Если предположить

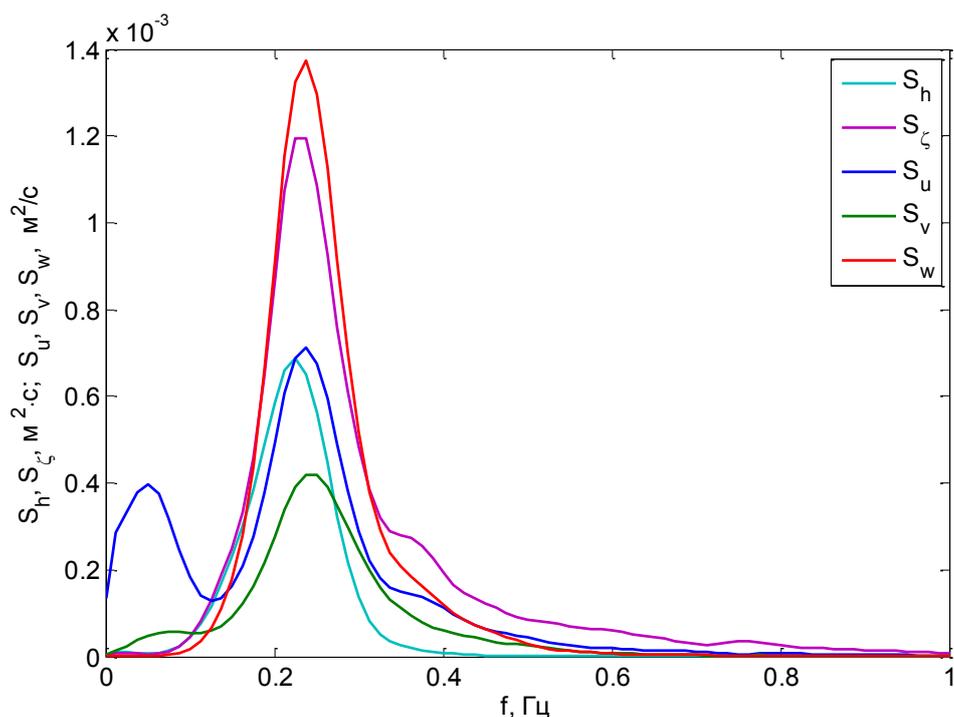
(по аналогии с задачей о двумерной диффузии вещества, сконцентрированного в начальный момент времени в начале координат (см., например, работу [16], где рассмотрена диффузия вихревой нити)), что ширина следа, при которой он перестает быть видимым, пропорциональна  $\sqrt{K\tau}$  (где  $K$  – кинематический коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии,  $\tau$  – время, в течение которого след наблюдался на данном горизонте), то отсюда следует, что величина  $K$  в верхнем слое оказывается в 100 или более раз выше, чем на среднем горизонте. Из анализа видеозаписей следует, что вертикальный размер слоя интенсивной турбулентности близок к трем четвертям высоты волны, что соответствует выводам работы [3].

Подобная структура турбулентного волнового потока наблюдается и в природных условиях. Интенсивность турбулентности можно охарактеризовать скоростью диссипации кинетической энергии турбулентности  $\varepsilon$  в единице массы жидкости. Вертикальные профили  $\varepsilon$  для всех природных экспериментов представлены на рис. 2. Величина  $\varepsilon$  для каждого горизонта измерений была рассчитана по записям флуктуаций вертикальной скорости согласно методике из работы [17], основанной на гипотезе Колмогорова об инерционном интервале в спектре турбулентности. В статье [11] описаны детали методики в применении к данным измерительного комплекса «Сигма-1». Как следует из рис. 2, в природных условиях также имеет место расслоение волнового потока на верхнюю турбулентную область и нижнюю область с фоновой гидродинамической турбулентностью. Если в толще воды величина  $\varepsilon$  меняется слабо, то вблизи поверхности можно отчетливо видеть слой более интенсивной турбулентности. Ширина этого слоя оказывается близка к высоте значительных волн (см. таблицу).



**Рис. 2.** Вертикальные профили скорости диссипации кинетической энергии турбулентности  $\varepsilon$  по данным природных экспериментов

Рассмотрим связь параметров турбулентности и волн, опираясь на натурные данные. На рис. 3 приведены спектры возвышений свободной поверхности  $S_\zeta$ , давления  $S_h$  и трех компонент скорости частиц воды  $S_u$ ,  $S_v$ ,  $S_w$  для эксперимента 13 декабря 2014 г. Спектры построены по методу Велча (разбиением хронограмм на перекрывающиеся отрезки, умножением отрезков на временное окно Ханна, преобразованием Фурье и последующим осреднением спектральных функций по всем отрезкам). В натурном эксперименте использовались окна со спектральным разрешением 0,1 Гц, число степеней свободы анализируемых спектральных оценок – 34. Эта же методика и параметры использовались и в дальнейшем при взаимном спектральном и биспектральном анализах, применявшихся в данной работе.

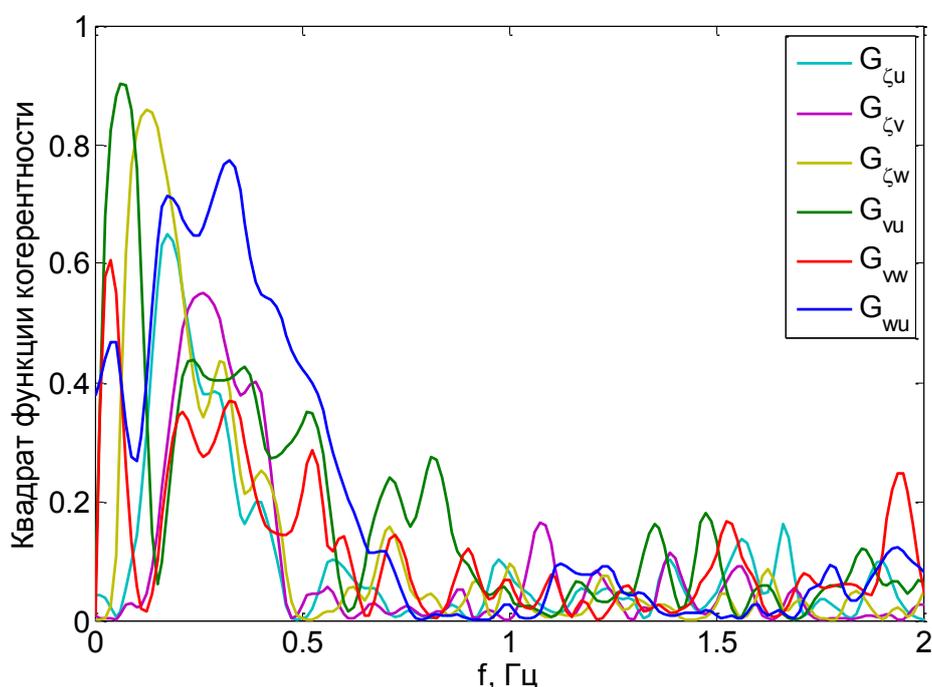


**Рис. 3.** Типичные спектры возвышений свободной поверхности  $S_\zeta$ , давления  $S_h$  и трех компонент скорости частиц воды  $S_u$ ,  $S_v$ ,  $S_w$ , измеренных на глубине 1,4 м в эксперименте 13 декабря 2014 г.

При инструментальных измерениях мелкомасштабной турбулентности в волновом потоке встает проблема, как выделить турбулентные движения на фоне нерегулярных волновых движений. Применительно к поступательному потоку она решается естественно: случайные колебания на фоне среднего течения считаются турбулентностью. В нашем случае будем следовать подходу, изложенному ранее в работе [18] в приложении к данным, полученным на Болгарском побережье Черного моря. По вычисленным значениям функций когерентности между возвышениями свободной поверхности и флуктуациями скорости в воде видно, что выше определенной частоты  $f_B$  их

линейная связь отсутствует. Биспектральный анализ этих величин также показал практически полное отсутствие квадратичных нелинейных связей для частот выше  $f_B$ . Это и позволило в цитируемой работе отнести флуктуации скорости частиц воды с частотами, большими 3 – 4 частот максимума спектра волн, к турбулентным движениям.

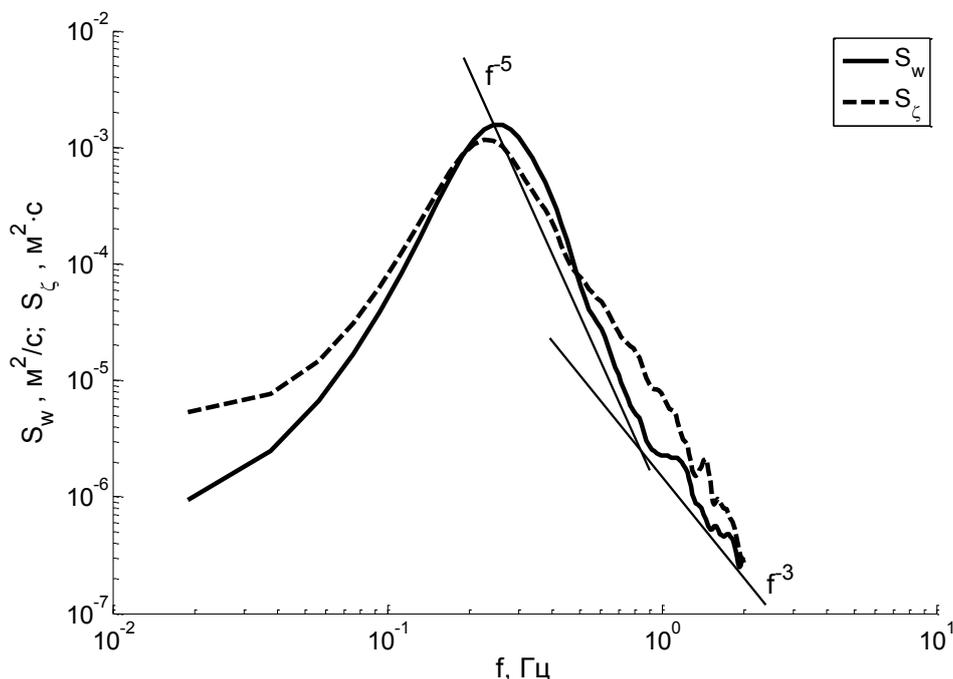
На рис. 4 приведены функции когерентности между величинами  $u, v, w, \zeta$  для записей 13 декабря 2014 г., которые демонстрируют резкое уменьшение когерентности на частотах выше 0,8 Гц. В этом диапазоне частот биспектральный анализ также показал отсутствие квадратичных связей сигналов. Результаты расчетов для других записей на различных горизонтах позволили заключить, что частота 0,8 Гц может быть принята в качестве граничной частоты, т. е. на более высоких частотах движение определенно можно считать турбулентным. На этом основании мы выделили турбулентную составляющую из записей флуктуаций скорости путем Фурье-фильтрации с граничной частотой 0,8 Гц.



**Рис. 4.** Типичные квадраты функций когерентности между тремя компонентами скорости частиц воды, измеренными на глубине 1,4 м в эксперименте 13 декабря 2014 г., а также между этими компонентами и возвышениями свободной поверхности

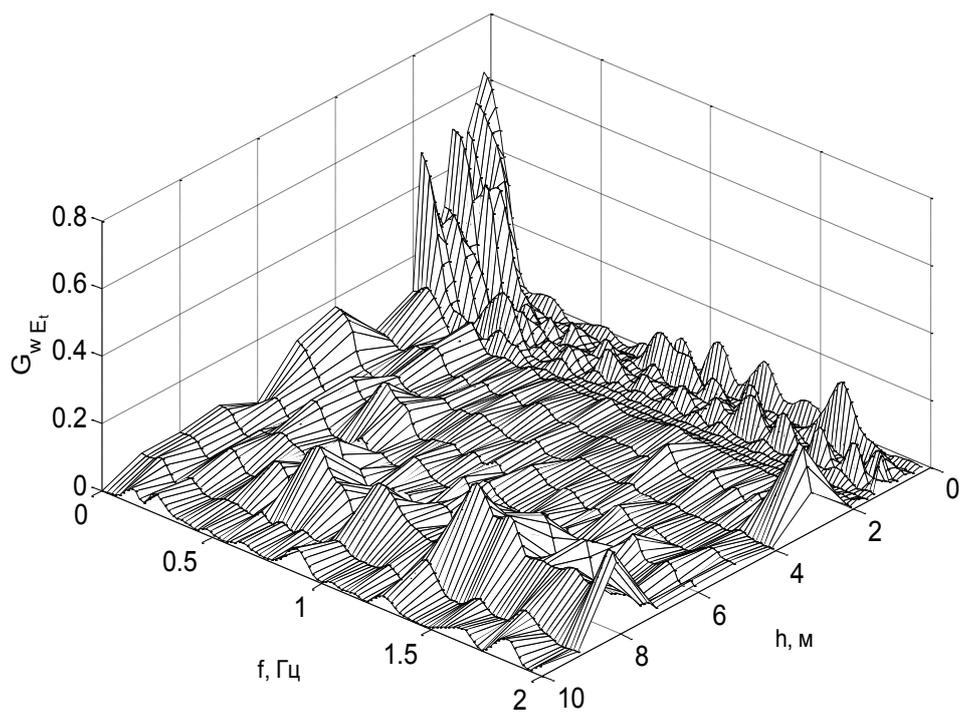
Возможность использования этой граничной частоты подтверждается также изменением наклона спектра вертикальных флуктуаций скорости частиц воды. Пример спектра, построенного в логарифмическом масштабе, показан на рис. 5. Наклон спектра в области частот выше спектрального пика изменяется на граничной частоте 0,8 Гц от величины  $-5$  (где доминируют

волновые движения) до  $-3$  (где движения чисто турбулентные). Заметим, что показанный на рисунке спектр возвышений свободной поверхности имеет наклон  $-4$  во всем диапазоне частот.

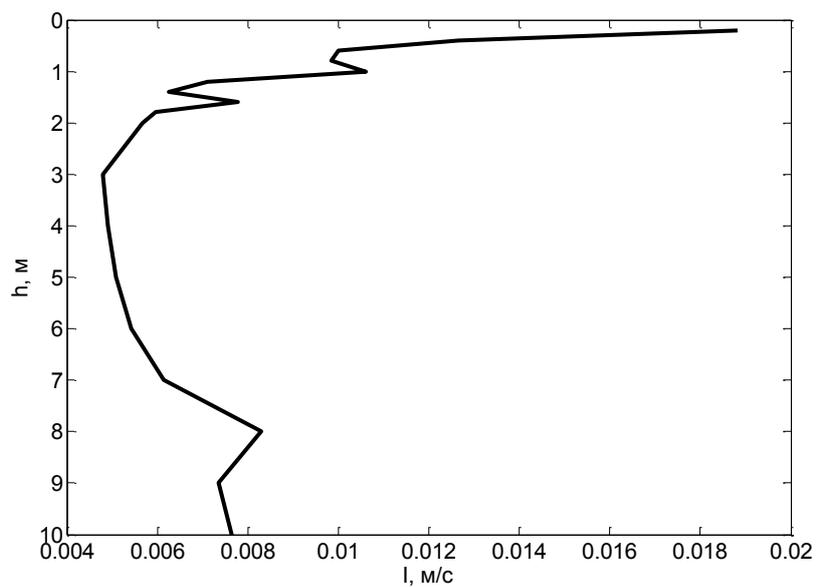


**Рис. 5.** Изменение наклона спектра вертикальной компоненты скорости  $S_w$  от  $-5$  до  $-3$  при переходе от волновых движений к турбулентным (граничная частота  $0,8$  Гц; наклон спектра возвышений свободной поверхности  $S_z$  остается постоянным и равным  $-4$ )

Продemonстрируем разделение фоновой гидродинамической турбулентности и турбулентности, индуцированной волнами, как по пространству, так и по частотам. Для этого были рассчитаны функции когерентности между огибающей волновой составляющей вертикальной скорости частиц воды, вычисленной с помощью преобразования Гильберта, и хронограммами значений мгновенной кинетической энергии частиц воды  $E_t$ , рассчитанной как сумма квадратов трех турбулентных компонент скорости частиц воды. Изменение этих функций когерентности показано на рис. 6 и демонстрирует отсутствие линейной связи между флуктуациями огибающей и турбулентной кинетической энергии на глубинах, больших  $2$  м. Этот факт позволяет отнести турбулентные флуктуации в верхнем  $2$ -метровом слое воды к индуцированным волнами, а измеренные ниже – к фоновой гидродинамической турбулентности. Интенсивность турбулентности  $I$ , рассчитанная как квадратный корень из осредненной по времени кинетической энергии турбулентности, быстро затухает с глубиной в верхнем слое в соответствии с затуханием с глубиной волновых движений и остается примерно постоянной на нижележащих горизонтах, как следует из рис. 7.

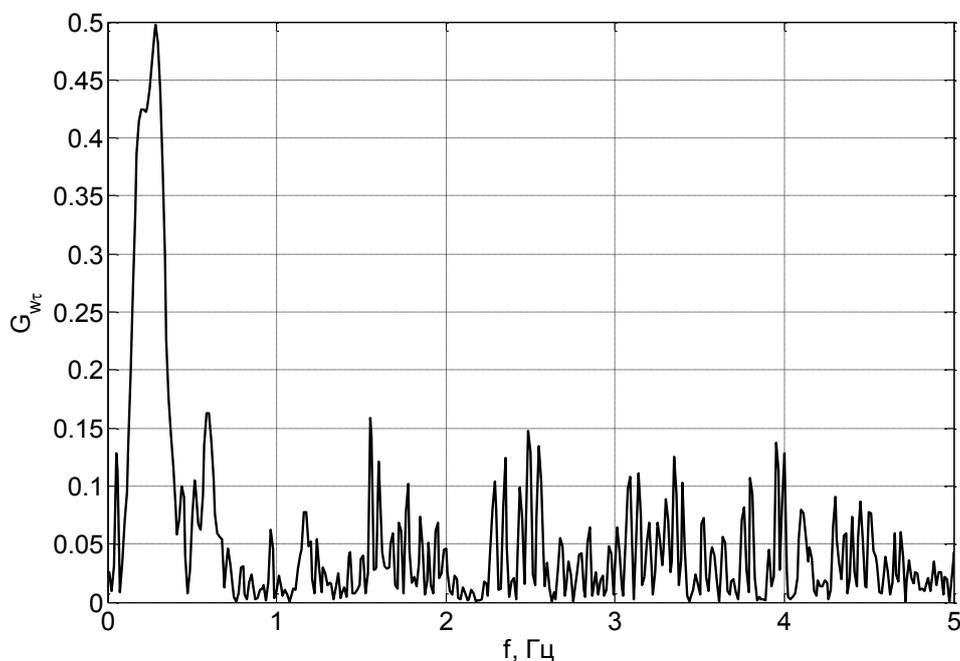


**Рис. 6.** Изменение квадрата функции когерентности между огибающей волновой составляющей вертикальной скорости частиц воды и кинетической энергией турбулентности  $E_t$  с глубиной и частотой в эксперименте 14 декабря 2014 г.



**Рис. 7.** Изменение интенсивности  $I$  турбулентных флуктуаций скорости частиц воды с глубиной в эксперименте 14 декабря 2014 г.

Вывод о разделении турбулентности на фоновую и индуцированную волнами подтверждается анализом составляющих тензора напряжений Рейнольдса  $\tau$ , рассчитанных почленным перемножением соответствующих рядов турбулентных компонент скорости частиц воды. Взаимный спектральный анализ показал высокую когерентность (в отдельных случаях до 0,7) между волновой вертикальной составляющей скорости частиц воды и компонентами тензора напряжений Рейнольдса  $\tau$ . Типичный вид функции когерентности демонстрируется на рис. 8. Когерентность исчезает на глубинах, больших 2 м.



**Рис. 8.** Квадрат функции когерентности между компонентами тензора напряжений Рейнольдса  $\tau$  и волновой вертикальной составляющей скорости частиц воды, измеренной на глубине 1,6 м в эксперименте 14 декабря 2014 г.

**Выводы.** Прямыми инструментальными измерениями в натуральных условиях, а также визуализацией турбулентной диффузии в лабораторном лотке с помощью окрашенных следов частиц красителя подтверждено разделение волнового потока на приповерхностный слой с интенсивной турбулентностью и нижележащий слой с фоновой гидродинамической турбулентностью существенно меньшей интенсивности. Проведено разделение измеренных флуктуаций скорости на волновую и турбулентную составляющие. Естественная нерегулярность волнения, проявляющаяся в виде групповой структуры волн, использована для разделения турбулентности на индуцированную волновыми движениями и фоновую гидродинамическую турбулентность. Характеристики турбулентности верхнего слоя линейно связаны с величиной огибающей волновой компоненты вертикальной скорости частиц воды, что позволяет рассматривать турбулентность в верхнем слое как индуцированную волнами. Анализ результатов экспериментов позволяет сделать вывод о

наличии индуцированной волнами турбулентности в отсутствие других возможных ее источников – обрушений волн, ветровых напряжений и циркуляции Ленгмюра.

Авторы приносят благодарность В.В. Зиме и А.С. Кузнецову (МГИ) за предоставление данных о средних течениях. Исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ, проект «Юг России» № 14-45-01572.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Монин А.С., Озмидов П.В.* Турбулентность в океане // *Океанология. Физика океана*. Т. 1. Гидрофизика океана. – М.: Наука, 1978. – С. 148 – 207.
2. *Дмитриев А.А., Бончковская Т.В.* К вопросу о турбулентности в волне // *Докл. АН СССР*. – 1953. – 91, № 1. – С. 31 – 33.
3. *Доброклонский С.В., Контобойцева Н.В.* Эксперименты по определению толщины турбулентного слоя в волнах монохроматического типа // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. – 1973. – 9, № 2. – С. 210 – 212.
4. *Donelan M.A.* The effect of swell on the growth of wind waves // *Johns Hopkins APL Technical Digest*. – 1987. – 8, № 1. – P. 18 – 23.
5. *Kitaigorodskii S.A., Lumley J.L.* Wave turbulence interactions in the upper ocean. Part I: The energy balance of the interacting fields of surface wind waves and wind-induced three-dimensional turbulence // *J. Phys. Oceanogr.* – 1983. – 13, № 11. – P. 1977 – 1987.
6. *Craig P.D., Banner M.L.* Modelling of wave-enhanced turbulence in the ocean surface layer // *Ibid.* – 1994. – 24, № 12. – P. 2546 – 2559.
7. *Drennan W.M., Donelan M.A., Terray E.A. et al.* Oceanic turbulence dissipation measurements in SWADE // *Ibid.* – 1996. – 26, № 5. – P. 800 – 815.
8. *Kudryavtsev V., Shrira V., Dulov V. et al.* On vertical structure of wind-driven sea surface currents // *Ibid.* – 2008. – 38, № 10. – P. 2121 – 2144.
9. *Babanin A.V.* On a wave-induced turbulence and a wave-mixed upper ocean layer // *Geophys. Res. Lett.* – 2006. – 33, L20605. – 6 p. – doi:10.1029/2006GL027308.
10. *Dai D., Qiao F., Sulisz W. et al.* An experiment on the nonbreaking surface-wave-induced vertical mixing // *J. Phys. Oceanogr.* – 2010. – 40, № 9. – P. 2180 – 2188.
11. *Чухарев А.М.* Модель турбулентности со многими временными масштабами для приповерхностного слоя моря // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. – 2013. – 49, № 4. – С. 477 – 488.
12. *Ефимов В.В.* Динамика волновых процессов в пограничных слоях атмосферы и океана. – Киев: Наукова думка, 1981. – 256 с.
13. *Qiao F., Yuan Y., Ezer T. et al.* A three-dimensional surface wave-ocean circulation coupled model and its initial testing // *Ocean Dyn.* – 2010. – 60, Issue 5. – P. 1339 – 1355.
14. *Самодуров А.С., Дыкман В.З., Барабаш В.А. и др.* Измерительный комплекс «Сигма-1» для исследования мелкомасштабных характеристик гидрофизических полей в верхнем слое моря // *Морской гидрофизический журнал*. – 2005. – № 5. – С. 60 – 71.
15. *Малиновский В.В., Дулов В.А., Кориненко А.Е. и др.* Комплекс аппаратуры для подспутниковых измерений со стационарной океанографической платформы в Качивели // *Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне* / Под ред. В.А. Иванова, В.А. Дулова. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2014. – С. 128 – 149.
16. *Лаврентьев М.А., Шабат Б.В.* Проблемы гидродинамики и их математические модели. – М.: Наука, 1973. – 416 с.

17. *Stewart R.W., Grant H.L.* Determination of the rate of dissipation of turbulent energy near the sea surface in the presence of waves // *J. Geophys. Res.* – 1962. – 67, № 8. – P. 3177 – 3180.
18. *Кузнецов С.Ю., Дачев В.Ж., Сперанский Н.С.* Нелинейные волны и турбулентность в береговой зоне моря // *Океанология БАН.* – 1992. – 21. – С. 3 – 13.

## **Turbulence induced by storm waves on deep water**

**S.Yu. Kuznetsov\*, Ya.V. Saprykina\*, V.A. Dulov\*\*, A.M. Chukharev\*\***

\* *Shirshov Oceanological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*  
*e-mail: kuznetsov@ocean.ru, saprykina@ocean.ru*

\*\**Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*  
*e-mail: dulov1952@gmail.com, alexchukh@mail.ru*

Results of laboratory and field experiments performed in November – December, 2014 to study turbulence induced by wave motion are represented. Elevations of free sea surface and fluctuations of three components of water particles' velocity are synchronously measured at calm conditions when wave breaking is absent. The data are obtained in the ranges of wave and turbulence frequencies, and in the depth range from the surface to half a length of surface waves. A method for separating the measured velocity fluctuations into at a wave and two turbulence components (the one is induced by wave motions and another is a background hydrodynamic turbulence) is developed. Direct instrumental measurements confirmed stratification of a wave flow into a near-surface turbulent layer induced by wave motion and an underlying layer with the background hydrodynamic turbulence.

**Keywords:** wave induced turbulence, background turbulence, field experiment, storm waves.