

УДК 465.551

© В.Г. Григорьева¹, С.К. Гулев², 2011

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г.Москва

²Московский государственный университет

vika@sail.msk.ru

АНОМАЛЬНЫЕ ВЕТРОВЫЕ ВОЛНЫ В МИРОВОМ ОКЕАНЕ ПО ДАННЫМ ПОПУТНЫХ СУДОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Впервые для исследования аномальных волн в океане используется наиболее полный массив визуальных наблюдений над волнением, ассимилированный в архиве ICOADS. Разработаны методология контроля исходных данных и критерии для классификации экстремальных ветровых волн и волн зыби. Все визуальные наблюдения над волнением, фиксирующие высоты ветровых волн 15 м и более, либо являются реальными записями сильных штормов (порядка 20% от общего числа), либо содержат ошибочные записи о высоте волны. Существуют волны зыби (небольшой процент), которые потенциально могут быть отнесены к разряду аномальных.

Ключевые слова: ветровое волнение, экстремальные волны, визуальные наблюдения.

Несмотря на современное развитие теории волн [1–8], методов математической статистики [4, 7–12] и появление нового поколения наблюдательной и вычислительной техники, ситуация с изучением, прогнозированием и оценкой климатических аномалий волн в океане остается достаточно сложной и неопределенной. До сих пор нет единого мнения о механизмах возникновения необычно высоких волн и достоверных оценок их максимальной высоты. Более того, не существует единого общепризнанного определения аномальных волн. За основной критерий чаще всего принимают количественное соотношение между высотой экстремальной волны и фоновым волнением (при этом минимальный пороговый фактор превышения в различных исследованиях колеблется от 2 до 5). Кроме того, иногда рассматриваются условия, связанные с асимметрией волн и их характерной формой, абсолютной высотой волн, а также соотношения между высотами волн, соседствующих в пакете с аномальной. Наиболее сложно определиться с классификацией таких экстремальных волн – либо это нетипичная экстремальная волна среди поверхностных, описываемых классической гидродинамикой, и вероятность ее возникновения должна оцениваться из анализа хвостовых частей вероятностных распределений всех наблюдаемых волн или волн, превышающих некий заданный порог, либо это особый класс необычных волн, не подчиняющихся законам классической гидродинамики, и тогда вероятность их появления может быть на несколько порядков выше [8]. На сегодняшний день разработано множество методов исследования экстремальных волновых явлений [7, 8]. Они апробируются на всех возможных источниках волновой информации (записи волнографов, спутниковые данные, лабораторные эксперименты, модельные расчеты). В нашей работе мы рассматривали визуальные данные о ветровом волнении.

Традиционно визуальные наблюдения над волнением считаются ненадежными, зависящими от человеческого фактора и слабопригодными для статистического анализа по причине неравномерной плотности наблюдений и низкой точности оценок параметров волн. Однако именно визуальные наблюдения на данный момент являются самыми продолжительными во времени и обеспечивают независимые оценки высот ветровых

волн и волн зыби. Случайные и систематические ошибки, характерные для визуальных наблюдений, за последние несколько лет были аккуратно и тщательно оценены [13–15], а ошибочные записи либо удалены, либо исправлены [13]. Данные попутных судовых наблюдений успешно использовались авторами для создания глобальной климатологии ветрового волнения [13, 14], для описания режимных характеристик элементов волн и оценок долгопериодных трендов [16, 17]. Но для исследования аномальных волн эти данные еще не привлекались, в силу упомянутых выше точностных проблем. Поэтому отсутствуют разработанные методики подобных исследований. Данная работа является первой попыткой классификации визуальных экстремальных волн, какие из них можно отнести к классу необычных, какие – к штормовому волнению, а какие просто считать ошибкой наблюдений.

Мировая коллекция визуальных морских данных ассимилирована в архив, известный как ICOADS (International Comprehensive Ocean Atmosphere Data Set) [18, 19]. Это наиболее полные из существующих коллекций сведения о приводных метеорологических параметрах: в нее включены все данные попутных судовых наблюдений (Voluntary Observing Ship, далее везде VOS) с 1784 г. до настоящего времени. Однако сведения о ветровом волнении появляются в ICOADS лишь в конце XIX столетия (с 1870 г.). До 1950 г. штурманский состав включал в телеграммы максимальную из высот двух компонентов волнения: ветровых волн и волн зыби, а используемые системы кодирования ограничивали предельную высоту 16 м. С 1950 г. параметры ветровых волн и волн зыби оценивались наблюдателями отдельно, а новые коды допускали возможный максимум высот до 25 м. С 2006 г. все ограничения на высоты волн в коллекции VOS сняты. На рис. 1 представлено временное распределение количества попутных судовых наблюдений за волновыми характеристиками в период с 1950 по 2007 гг.

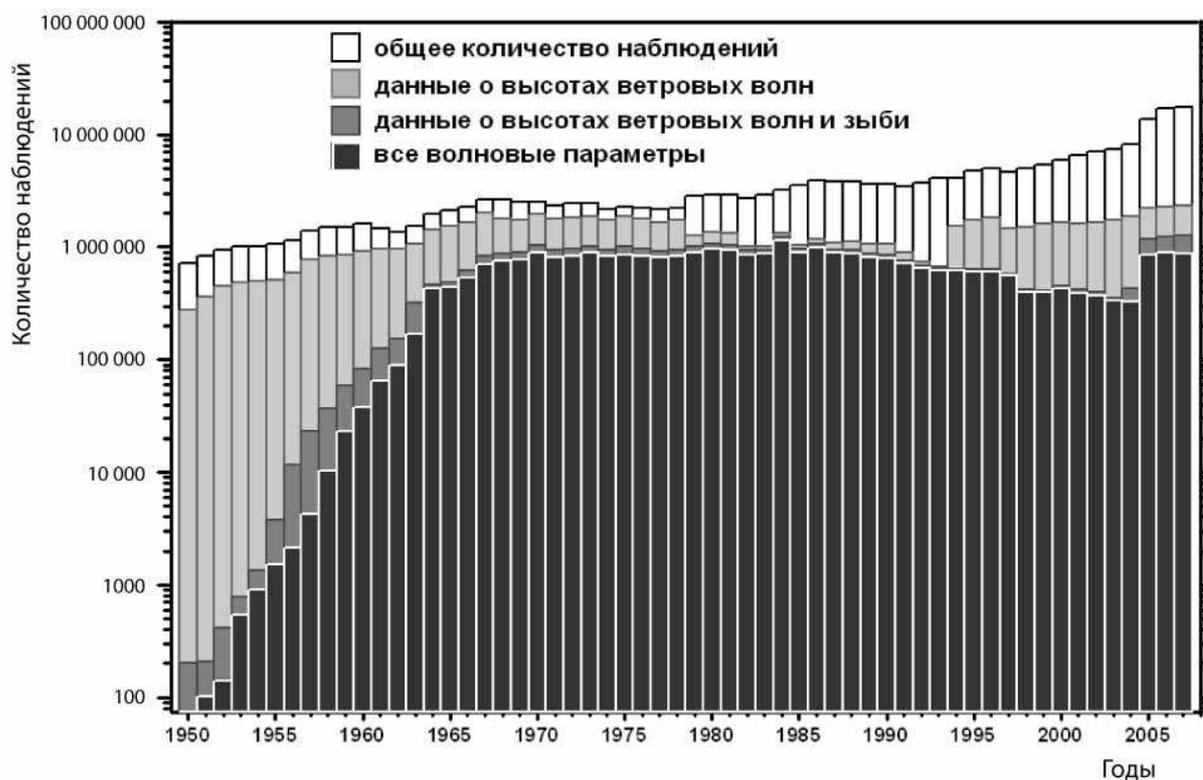


Рис. 1. Временное распределение количества попутных судовых наблюдений за волновыми характеристиками в период с 1950 по 2007 г.

Для анализа были выбраны записи, содержащие все характеристики волнения: высоты ветровых волн и зыби, их периоды и направления распространения. Хотя это несколько снижает общее количество данных, используемых для анализа, но позволяет иметь дело с наиболее достоверными наблюдениями. Океаны Северного и Южного полушарий исследовались отдельно в силу серьезных различий в их географии и режимах волнения. В качестве порогового значения была задана высота 15 м. Как было упомянуто выше, в 1950 г. произошла смена предельных высот волн в кодировках и, таким образом, в область исследования попали волны, до середины XX столетия считающиеся максимальными (от 15 до 16 м) или просто несуществующими в визуальных наблюдениях (от 16 до 25 м). Ветровые волны и зыбь анализировались за период с 1950 по 2006 г. На рис.2 показано типичное распределение экстремальных высот ветровых волн и высот волн зыби, характерных для Северного полушария.

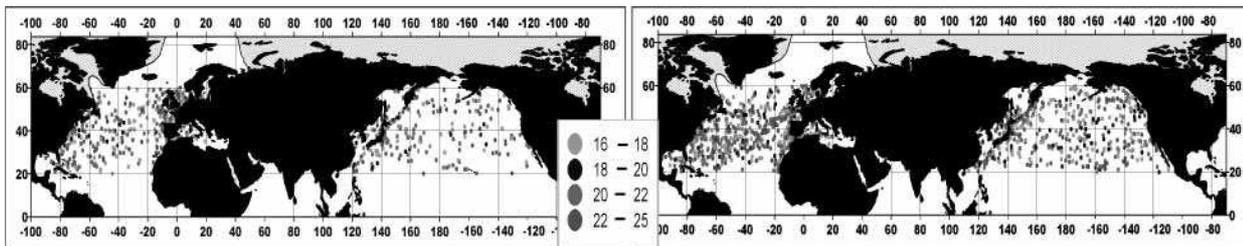


Рис. 2. Экстремальные высоты ветровых волн (слева) и высоты волн зыби (справа) в Северном полушарии.

На первом этапе были получены статистические оценки параметров волнения по месяцам за 1950–2006 гг. (все январь, февраль и т.д.). Длина каждого такого ряда волн с высотой, равной или превышающей 15 м, в Северном полушарии составляет в среднем около 1000 значений для ветрового волнения и не более 500 значений за выбранные месяцы в Южном полушарии. Для зыби географическое распределение качественно аналогично распределению для ветровых волн, но количество данных для каждого полушария в 1.5–2 раза больше. Дополнительно были рассчитаны крутизна и длина волны, а также средние характеристики всех элементов волнения в радиусе 100 км от точки наблюдения. Распределения вероятностей некоторых из полученных параметров в виде гистограмм представлены на рис. 3. Количество данных позволило рассчитать и характеристики совместных двумерных распределений высоты волн и силы ветра как для ветрового волнения, так и для зыби за каждый календарный климатический месяц 1950–2006 гг. (рис. 4).

И для распределения максимальных высот ветрового волнения (рис. 3, *а*), и для максимальных высот зыби (рис. 3, *б*) отчетливо прослеживается бимодальная структура, что подтверждается двумерными распределениями высота волны–скорость ветра (рис. 4): первый максимум вероятностей приходится на высоту от 16 до 18 м, второй – на 20–21 м. Для волн зыби иногда проявляется и третий максимум вероятностей – на высоте около 24 м. Скорее всего, диапазон волнения от 15 до 20 м относится к штормам, а необычные экстремальные волны следует искать в диапазонах от 21 до 25 м.

Максимальная сила ветра колеблется от 10 до 20 м/с, атмосферное давление на поверхности океана меняется от 1013 до 1030 ГПа, наиболее вероятная длина волны составляет не более 50 м для ветровых волн и 150–200 м для волн зыби. Соответствующие периоды могут изменяться по всему диапазону наблюдений: от 1 до 25 с, с максимумом вероятности на значении 5 с для ветровых волн и 10–12 с для волн зыби. Поскольку данные о периодах волнения сильно зависят от квалификации наблюдателя, а в 1968 г.

происходила смена используемых кодов для периодов волн зыби с последующей адаптацией новой системы записи в течение нескольких лет, то ошибки в определениях периодов могут составлять до 30 % от средних величин [9].

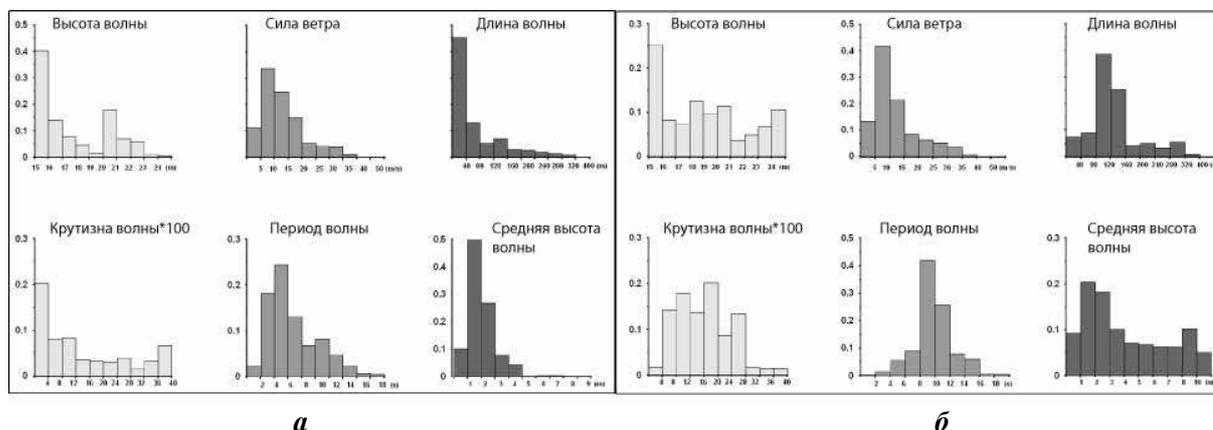


Рис. 3. Гистограммы параметров ветрового волнения (*a* – 667 записей) и зыби (*b* – 2324 записей) на примере океанов Северного полушария для январей 1950–2006 гг.

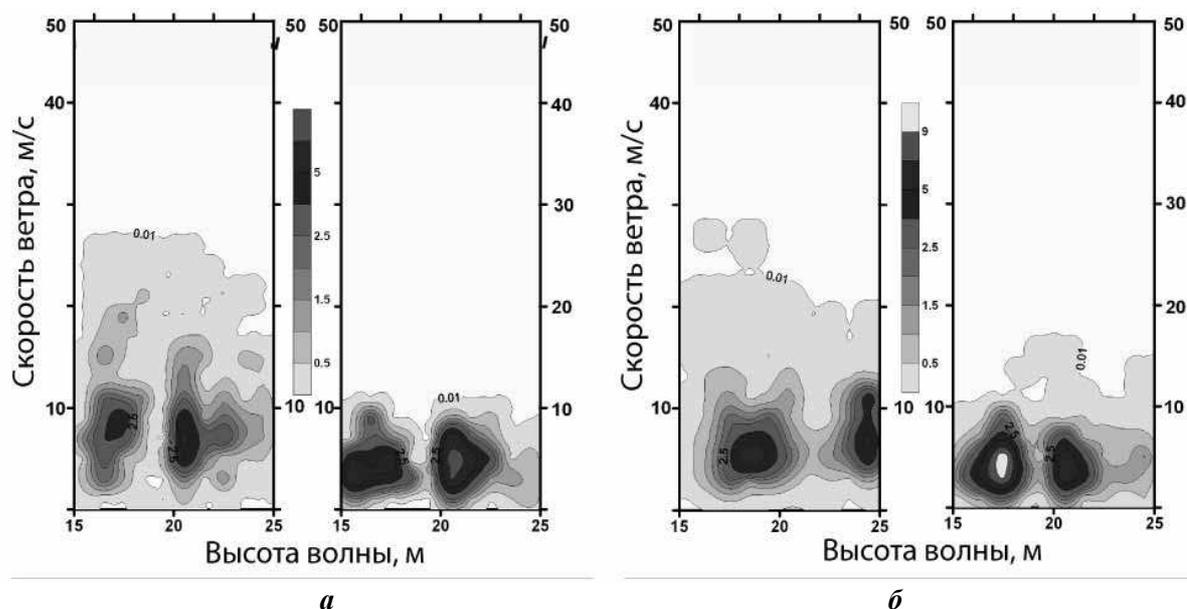


Рис. 4. Двухмерные плотности вероятностей (в %) для высот волн и скорости ветра (*a* – ветровые волны, *b* – зыбь) для зимнего и летнего сезонов на примере океанов Северного полушария, 1950–2006 гг.

Для дополнительной информации о геометрии волны была рассчитана безразмерная крутизна волны

$$\delta = H / \lambda = 2\pi H / (gT^2),$$

где H – высота, λ – длина, T – период волны, g – ускорение свободного падения. Крутизна обратно пропорциональна квадрату периода, т.е. диапазон изменений крутизны экстремальных волн достаточно велик. Отчетливый максимум вероятности для ветровых волн приходится на величину $\delta \leq 0.04$, для волн зыби он представлен на функциях распределения широким плато – от $0.04 < \delta < 0.3$. Гистограммы средних характеристик волнения, построенные по всем данным, попавшим в радиус 100 км от точки наблюден-

ного максимума, показывают достаточно традиционную картину распределений вероятностей для своего региона.

Одним из ключевых параметров определения аномальной волны (волны-убийцы) является отношение максимальной высоты волны к средней высоте для данного ряда наблюдений. Поскольку для визуально наблюдаемых волн существует только высота в конкретной географической точке океана, мы попытались воспользоваться этим критерием, приняв за среднюю величину высоты волнения ее среднеарифметическое значение в радиусе 100 км от точки максимума. Пороговым значением для этого критерия некоторые исследователи считают $\eta = H_{\max}/H_{av} \geq 2$ (здесь H_{\max} – максимальная, H_{av} – средняя высота волны), $\eta \geq 4-5$ встречается крайне редко (но и продолжительные записи, в которые случайно отмечается экстремальная волна, крайне редки). Распределения отношения $\eta = H_{\max}/H_{av}$ (рис. 5) в нашем случае не показывают устойчивой закономерности ни для ветрового волнения, ни для волн зыби, значения η меняются в широком диапазоне, т.е. для попутных судовых наблюдений критерий соотношения высот применить нельзя либо надо как-то иначе определять средние характеристики волнения в данной точке.

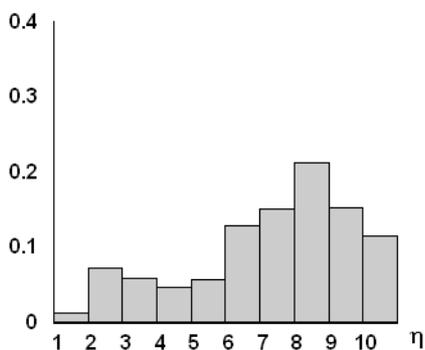


Рис. 5. Гистограмма соотношений максимальных и средних высот ветровых волн $\eta = H_{\max}/H_{av}$ на примере январей 1950–2006 гг. Северное полушарие.

Далее на основе созданного массива экстремальных волновых характеристик каждый случай волнения был исследован индивидуально. Первым шагом в анализе стал детальный контроль качества наблюдений в телеграммах. Из рассмотрения были исключены записи с периодами, равными 1 с, записи с отсутствующей силой ветра и, наконец, волны с сомнительным параметром крутизны. По законам классической гидродинамики для обрушающихся волн предельная крутизна волны $\delta < 1/7$ [11, 20]. Для волн, обрушивающихся в результате быстро растущей неустойчивости Бенджамена–Фейра, – $\delta < 0,38$ (предельное значение 0,443) [20, 21]. Реальная крутизна волн находится в диапазоне 0,05–0,2. Для более строгого первичного контроля было взято предельное значение безразмерной крутизны для ветровых волн $\delta = 0,2$ и для волн зыби – $\delta = 0,15$. После этого этапа

было исключено из анализа около 80 % наблюдений. По оставшимся данным вновь были построены глобальные гистограммы всех волновых параметров (как наблюдаемых, так и рассчитанных) для сравнения с исходными распределениями (рис. 6).

Вновь полученные вероятностные распределения волновых характеристик существенно отличаются от первоначальных, основанных на всех случаях. Так, для ветрового волнения сохранился только один ярко выраженный максимум вероятностей на высоте 15 м, что, вероятнее всего, соответствует штормовому волнению, а не аномальным волнам. Сопутствующие скорости ветра соответственно представлены широким плато и варьируются в пределах 5–35 м/с. Однако для высот волн зыби в распределении сохранились оба максимума на высотах 15–16 и 20–21 м, что требует дополнительного исследования для классификации подобных волн и ответа на вопрос, можно ли отнести их к разряду сильных штормов, необычных волн или считать ошибкой наблюдений.

С этой целью для анализа оставшихся записей были предложены следующие критерии.

1. Все записи с высотами ветровых волн, больших или равных 15 м, сопутствующей силой ветра $V > 10$ м/с и с давлением над уровнем моря $SLP \leq 1002$ ГПа были отнесены к штормовому волнению. Этот критерий исключил из рассмотрения более 90 % всех экстремальных наблюдений. Так, для январей в океанах Северного полушария из 667 исходных точек осталось только 19.

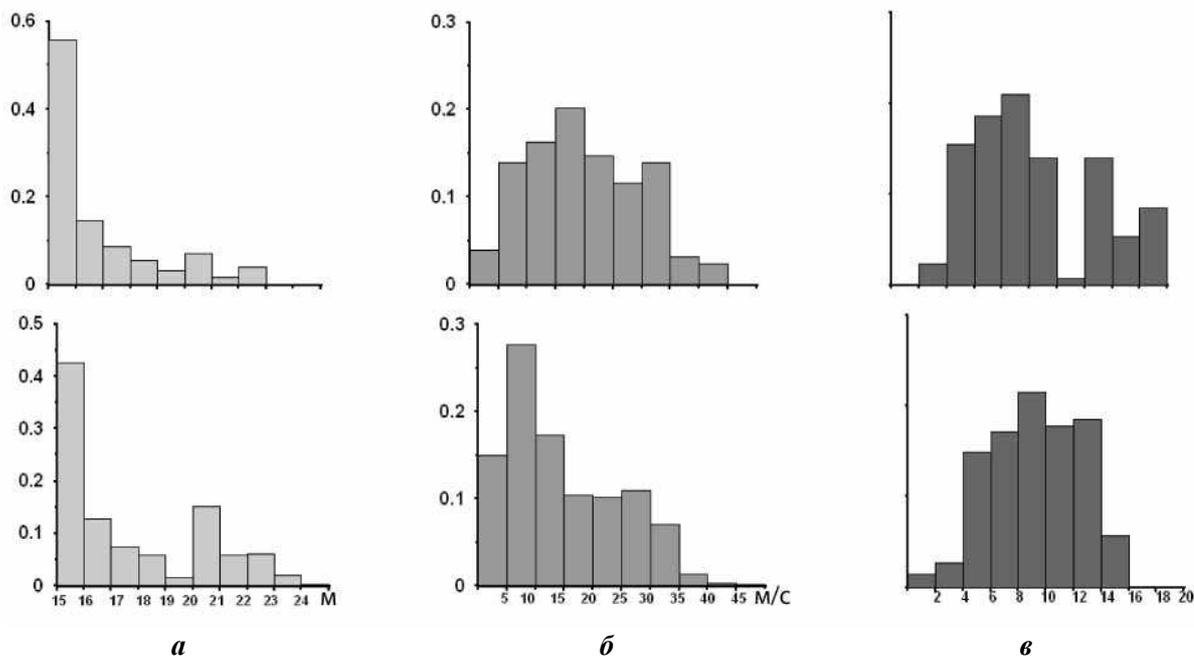


Рис. 6. Гистограммы параметров ветрового волнения (вверху) и зыби (внизу) после качественного контроля исходной информации на примере океанов Северного полушария для январей 1950-2006 гг.
а – экстремальные волны, *б* – сила ветра, *в* – крутизна.

2. Был проведен анализ возраста волнения и выбран соответствующий критерий. В различных исследованиях определения возраста волны отличаются коэффициентами и использованием реальной скорости ветра либо динамической скорости. Возраст волны рассчитывался как $a = C_p/V_{ef}$ (C_p – фазовая скорость на глубокой воде). $C_p = (g/2\pi) \cdot T$. Здесь T – период волнения, $V_{ef} = V_{10} \cdot \cos \theta$, θ – угол между направлением ветра и направлением распространения волнения (по нашим данным, в 95 % случаев эти углы для ветрового волнения совпадают). Если возраст волнения a превышал 1.2, записи считались либо ошибкой наблюдений, либо волнами зыби, ошибочно отнесенными к ветровым.

3. Дополнительно был проведен детальный синоптический анализ в каждом индивидуальном случае экстремального ветрового волнения с помощью данных ре-анализа NCEP/NCAR. Для всех оставшихся после предыдущих этапов контроля записей анализ полей ветра и давления из ре-анализа не подтвердил данные попутных судовых наблюдений, что позволяет заключить, что экстремальные ветровые волны, идентифицируемые в визуальных данных, не могут быть отнесены к разряду необычных волн.

4. Для экстремальных высот зыби аналогичный анализ неприемлем, поскольку зыбь не связана с локальной синоптической ситуацией; критерий возраста волны здесь также неприменим. Рассматривая каждый индивидуальный случай высокой зыби, следует исключить районы, где зыбь не может достигать таких высот в силу ограничений на разгон волнения. В процессе работы были рассчитаны средние характеристики зыби в радиусе 200 км от исследуемой точки в сравнении с климатическими величинами. Если средняя высота зыби превышала климатическое значение для данного района мирового океана и данного месяца, то запись относилась к штормовому волнению и из дальнейшего рассмотрения исключалась. И наконец, ошибкой наблюдений полагались записи, где экстремальным высотам зыби сопутствовали высоты ветровых волн более 5 м. Подобный критерий кажется весьма разумным, так как крайне маловероятно сочетание, например, 15-метровой зыби и 15-метровой ветровой волны. Скорее всего, это ошибочно продублированная запись одной и той же системы волн. После столь жесткого кон-

троля экстремальных высот зыби остается не более 1 % записей для каждого климатического месяца (например, для январей в океанах Северного полушария – 22). И все они могут быть отнесены либо к распространению систем зыби соответствующих румбов после сильных штормов либо к необычным волнам.

Вышеописанные методики были применены и к Южному океану (рис. 7). Результаты исследований абсолютно аналогичны результатам, полученным для Северного полушария (за исключением количества наблюдений): все экстремальные высоты ветровых волн являются либо сильными штормами, либо ошибками наблюдений. А записи с экстремальными высотами зыби для единичных случаев не демонстрируют никаких аномальных свойств, кроме высоты волны.

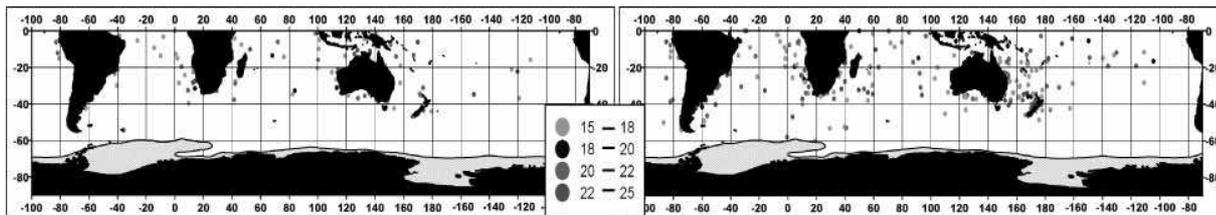


Рис. 7. Экстремальные высоты ветровых волн (слева) и высоты волн (в м) зыби (справа) в Южном полушарии на примере августа 1950–2006 гг.

Таким образом, процент экстремальных волн в коллекции попутных судовых наблюдений невелик. Они не влияют на глобальные оценки климатических характеристик волновых параметров, но могут играть важную роль в оценке экстремальных волновых статистик. Тем не менее высоту ветровых волн и зыби, достигающую 25 м, нельзя априори относить к ошибкам наблюдений. С этой целью была предпринята попытка найти подтверждения хорошо известных и инструментально зафиксированных аномальных волновых явлений в используемой коллекции попутных наблюдений. Но поскольку суда стараются избегать штормовых условий, а в случаях катастроф, как правило, не остается никаких достоверных записей и свидетельств, удалось обнаружить единственную запись, прошедшую все стадии контроля и соответствующую катастрофе на платформе Mobil Oil в районе Ньюфаундлендской банки 15 февраля 1982 г. В точке с координатами 49.00 с.ш. и 46.50 з.д. была зафиксирована волна зыби с высотой 15 м, периодом 15 с, длиной волны 351 м и крутизной 0.04. Ветер достигал 36.00 м/с, атмосферное давление – SLP = 986.20 ГПа, высота ветровой волны при этом составляла 5 м, а ее период – 6 с.

Один из существующих механизмов, приводящих к образованию необычных волн, включает эффекты трансформации волнения за счет мелководья (конечная глубина, рефракция), поэтому было проведено детальное изучение визуальных данных по самым известным океанским банкам. В целом картина экстремальных волновых явлений идентична для всех рассмотренных регионов (Доггер-банка, подводное поднятие Чатам к востоку от Новой Зеландии, район течения Агульяс и др.). На рис. 8 приведен пример экстремальных ветровых волн и волн зыби на Доггер-банке в Северном море, в 100 км от берега Англии. Глубина моря в районе отмели колеблется от 15 до 36 м. Именно в этом районе погибло несколько английских траулеров (13 января 1965 г., 16 февраля 1965 г.). Возможная причина катастроф – крутые пирамидальные волны, возникающие при сложении волн, идущих с глубокой воды на мелководье и отраженных от него. Измерения подтверждают принципиально различный характер волнения севернее и южнее Доггер-банки по сравнению с волновым полем на самой банке [2]. На рис. 8 специально показаны точки без контроля качества. Так, для ветровых волн с $T = 17$ с возраст волны $a > 3$. По-видимому, это записи с ошибочным периодом, либо относятся к системе зыби,

трансформировавшейся на мелководье. Случай с $H = 15$ м и $T = 8$ с соответствует штормовому волнению. Все параметры зыби проходят контроль качества. Выбранные за период с 1950 до 2006 г. визуальные данные о волнении подтвердили выводы о штормовой природе экстремальных ветровых волн и о возможном отнесении волн зыби к разряду необычных.

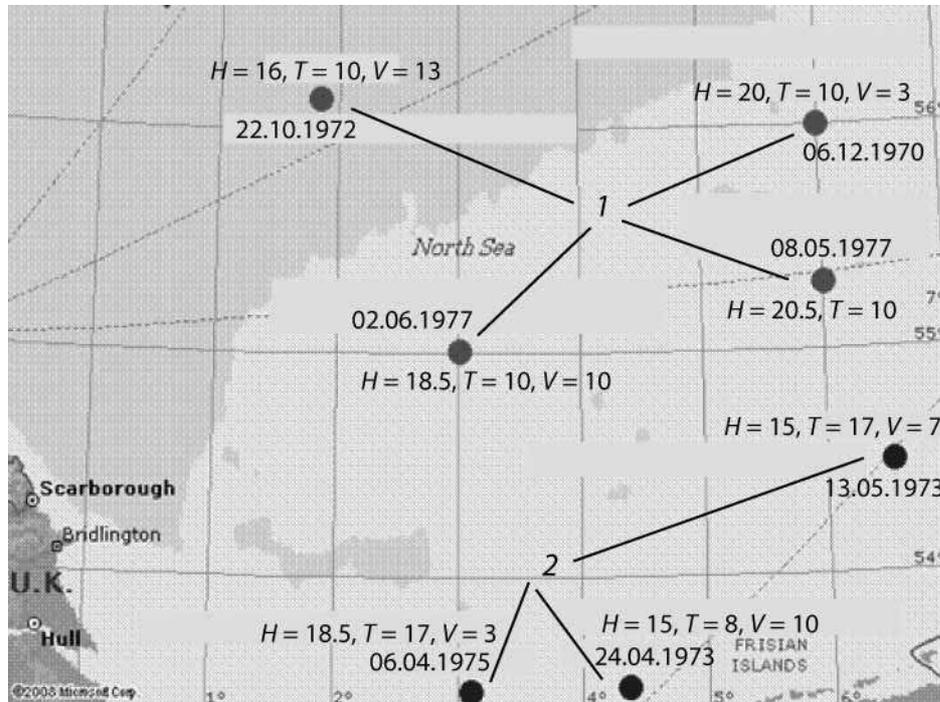


Рис. 8. Высоты зыби (1) и экстремальные высоты ветровых волн (2) за 1950–2006 гг. для района Доггер-банки после качественного контроля данных. Для каждой точки отмечены высота волны H (в м), период T (в с) и скорость ветра V (в м/с).

Таким образом, после глобального анализа океанов Северного и Южного полушарий за период с 1950 по 2006 г. и детального исследования районов повышенной опасности с точки зрения возникновения волн-убийц, основные результаты можно сформулировать следующим образом.

Данные попутных судовых наблюдений могут быть использованы для изучения аномальных волновых явлений в Мировом океане только после тщательной проверки и всестороннего контроля.

Все визуальные наблюдения над волнением, фиксирующие высоты ветровых волн 15 м и более, являются либо реальными записями сильных штормов (порядка 20 % от общего числа), либо ошибками в данных.

Ошибочные записи для волн зыби, превышающих или равных 15 м, составляют примерно те же 80 %, что и для ветрового волнения. Но не все оставшиеся после контроля наблюдения можно объяснить штормовыми условиями. Существует небольшой процент наблюдений, которые нельзя классифицировать как ошибки наблюдений, поскольку они подтверждаются косвенными данными о синоптической ситуации в данной области и их нельзя отнести к последствиям штормов. Потенциально они могут быть отнесены к разряду необычных волн.

Необходимы дополнительные тесты и критерии для исследования этого небольшого количества визуальных наблюдений над волнами зыби, чтобы можно было их однозначно классифицировать.

Литература

1. Давидан И.Н., Лопатухин Л.И., Рожков В.А. Ветровое волнение в мировом океане. Л.: Гидрометеоиздат, 1985.
2. Давидан И.Н., Лопатухин Л.И. На встречу со штормами. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 135 с.
3. Vadulin S.I., Babanin A.V., Resio D., Zakharov V. Weakly turbulent laws of wind-wave growth // J. Fluid mech. 2007. V.591. P.339–378.
4. Бухановский А.В., Лопатухин Л.И., Рожков В.А. Подходы, опыт и некоторые результаты исследования волнового климата океанов и морей. III: Экстремальные и необычные волны // Вестник СПбГУ. 2006. Сер.7. Вып.1. С.58–70.
5. Janssen P.A.E.M. Progress in ocean wave forecasting // Comp. phys. 2008. V.227. P.3572–3594.
6. Lopatoukhin L.J., Rozhkov V.A., Ryabinin V.E., Swail V.R., Boukhanovsky A.V., Degtyarev A.B. Estimation of extreme wind wave heights // World meteorological organisation (WMO). WMO/TD, JCOMM Technical Report. 2000. N 1041. 71 p.
7. Rogue waves 2000 // Proc. of a Workshop organized by Ifremer. Brest, France. 29–30 November. 2000. 396 p.
8. Rogue waves 2004 // Proc. of a Workshop organized by Ifremer. Brest, France. 13–15 October. 2004.
9. Лопатухин Л.И. Режим морского штормового волнения // Изд. русск. геогр. общ. 2000. Вып.6. С.29–37.
10. Лопатухин Л.И. Некоторые результаты исследования режима волнения на морях // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. 2000. Вып.23. С.62–70.
11. Лопатухин Л.И. Ветровое волнение // Уч. пос. СПб. 2004. 108 с.
12. Woolf D.K., Challenor P.G. Statistical comparisons of satellite and model wave climatologies, in Ocean Wave Measurement and Analysis / Ed. B.L.Edge, J.M.Hemsley. // Am. Soc. Civ. Eng. Reston, Va. 2002. P.640–649.
13. Gulev S.K., Grigorieva V., Sterl A., Woolf D. Assessment fo the reliability of wave observations from voluntary observing ships: insights from the validation of a global wind wave climatology based on voluntary observing ship data // J. Geophys. Res. oceans. 2003. 108(C7), 3236, doi:10.1029/2002JC001437.
14. Grigorieva V., Gulev S., Sterl A. Global climatology of wind waves based on VOS observation. Sym. Int. «In route to GODAE». Biarritz, 2002. P.205–206.
15. Gulev S.K., Grigorieva V., Selemenov K.M., Zolina O. Evaluation of surface winds and waves from voluntary observing ship data. Advances in applications of marine glimatology. WMO: Geneva, 2003. P.53–67.
16. Gulev S.K., Grigorieva V. Last century changes in ocean wind wave height from global visual wave data // Geophys. res. let. 2004. N 31. L24302, doi: 10.1029/2004GL021040.
17. Gulev S.K., Grigorieva V. Variability of the winter wind waves and swell in the North Atlantic and North Pacific as revealed by the Voluntary Observing Ship data // J. Climate. 2006. N 19. P.5667–5685.
18. Woodruff S.D., Diaz H.F., Elms J.D., Worley S.J. COADS release 2 data and metadata enhancements for improvements of marine surface flux fields // Phys. Chem. Earth. 1998. N 23. P.517–526.
19. Woodruff S.D., Worley S.J., Arnott J.A., Diaz H.F., Elms J.D., Jackson M., Lubker S.J., Parker D.E. COADS Updates and the Blend With the UK Meteorological Office Marine Data Bank // Achievements in marine climatology / Ed. V.Swail. Can. Toronto Environ., 1999. P.23–31.
20. Longuet-Higgins M.S., Mechanism of wave breaking in deep water // Sea surface sound / Ed. B.R.Kerman, Dordrecht, Holland, Klawer Acad. Publ. 1988. 639 p.
21. Калмыков В.А. Численное моделирование обрушивающихся волн // Матем. моделирование. 8:8. 1996. С.37–41.

Статья поступила в редакцию 06.09.2011 г.

