

УДК 551.466.3

© С.Ф. Доценко, В.А. Иванов, Ю.А. Побережный, 2011
Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь
sf_dotsenko@mail.ru

ВОЛНЫ-УБИЙЦЫ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ: АНАЛИЗ ВОЛНОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ, СВЯЗЬ С МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМИ УСЛОВИЯМИ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД 2000–2001 гг.

Анализ измерений ветрового волнения в северо-западной части Черного моря (декабрь 2000 г. – январь 2001 г.) позволил выделить 67 случаев образования волн-убийц в форме одиночных волн и в составе пакетов волн, не являющихся волнами-убийцами. Волны обладают заметной асимметрией: их передние склоны, как правило, круче задних, а предшествующая и последующая за волной-убийцей подошвы волн отличаются по глубине и ширине. Привлечение метеорологических данных позволило проанализировать возможную связь образования аномальных волн и ветра. Выделены две характерные ситуации. В первой из них возникновение волн-убийцы сопровождается значительными изменениями направления и скорости ветра, во второй – ее образованию предшествует ветер почти постоянного направления.

Ключевые слова: поверхностные гравитационные волны, волны ветровые, волны-убийцы, данные натурных измерений, связь с метеоусловиями, Черное море.

Волны-убийцы – это одиночные волны или группы из нескольких волн на воде, которые заметно выше окружающего их ветрового волнения. Гравитационная волна на поверхности жидкости классифицируется как волна-убийца при выполнении условия [1, 2]:

$$h_{\max} / h_{1/3} \geq 2.2, \quad (1)$$

где $h_{\max}$ – высота волны-убийцы (размах колебаний), т.е. возвышение гребня над следующей за ней подошвой волны; $h_{1/3}$ – значительная высота волн (средняя высота 1/3 наиболее высоких волн в реализации). Известны и другие критерии выделения волн-убийц [3]. Отношение в левой части формулы (1) в работе [2] названо индексом аномальности волны AI . Критерий (1) будет использоваться ниже для выделения волн-убийц по данным натурных наблюдений. Часто применяется и более слабый критерий с константами 2.0 или 2.1 в правой части формулы (1).

О волнах-убийцах известно давно. Их прямые измерения до недавнего времени практически отсутствовали, а вся информация об этом явлении носила в основном описательный характер. Считалось, что волны в океане высотой 28–30 м – крайне редкое событие, которое наблюдается один раз в десятки лет.

Интерес к проблеме волн-убийц в Мировом океане значительно возрос в последние 15 лет. Одна из причин – получение достоверного подтверждения существования волн-убийц на основе данных инструментальных наблюдений. Вторая причина – большое число аварий крупнотоннажных грузовых и пассажирских судов, вызванных не только погодными условиями, но и ударами быстро возникающих и быстро исчезающих морских волн аномальной крутизны, высоты гребня или глубины ложбины [1, 2]. Вызванные ими повреждения судов были значительными. По современным оценкам, силовые

воздействия крутых волн-убийц на корабли могут существенно превышать нормативные значения, принятые в настоящее время в судостроении.

Волны-убийцы аномальной высоты удалось инструментально зарегистрировать с плавучих платформ, специализированных буйев и космических носителей во многих районах Мирового океана. В действительности волны-убийцы – не столь редкое природное явление, как считалось ранее [4, 5]. Обсуждение современного состояния теоретико-экспериментальных исследований волн-убийц содержится в работах [1, 2, 5, 6].

Волны-убийцы также наблюдались и в Черном море. Здесь такая одиночная волна впервые зарегистрирована 22 ноября 2001 г. с волнографического буйа в районе Геленджика [7]. Высота ее составила 10.32 м, значительная высота обычной волны – 2.6 м, а поэтому индекс аномальности $AI = h_{\max} / h_{1/3} = 3.9$. Время прохождения волной-убийцей точки наблюдения оценено в 4.3 с.

Ниже на основе измерений волнения, выполненных Морским гидрофизическим институтом НАН Украины на морской платформе «Голицыно-4» в Каркинитском заливе зимой 2000–2001 гг., рассмотрены характеристики волн-убийц в северо-западной части Черного моря. Некоторые результаты исследования аномальных ветровых волн и их связи с метеоусловиями в районе платформы для декабря 2000 г. изложены в работах [8, 9]. Недавно были выполнены регистрация и анализ ветровых волн-убийц (критерий – $AI \geq 2$) у Южного берега Крыма с гидрофизической платформы в пос. Кацивели [10].

Общая характеристика полученных данных. Измерения ветрового волнения и метеорологических параметров в северо-западной части Черного моря выполнялись, как уже было сказано, с буровой платформы «Голицыно-4» (рис. 1, *а*) в точке 31°52' в.д., 45°42' с.ш. Географическое положение платформы показано в виде звезды на рис. 1, *б*. Глубина моря в районе платформы составляет около 30 м.

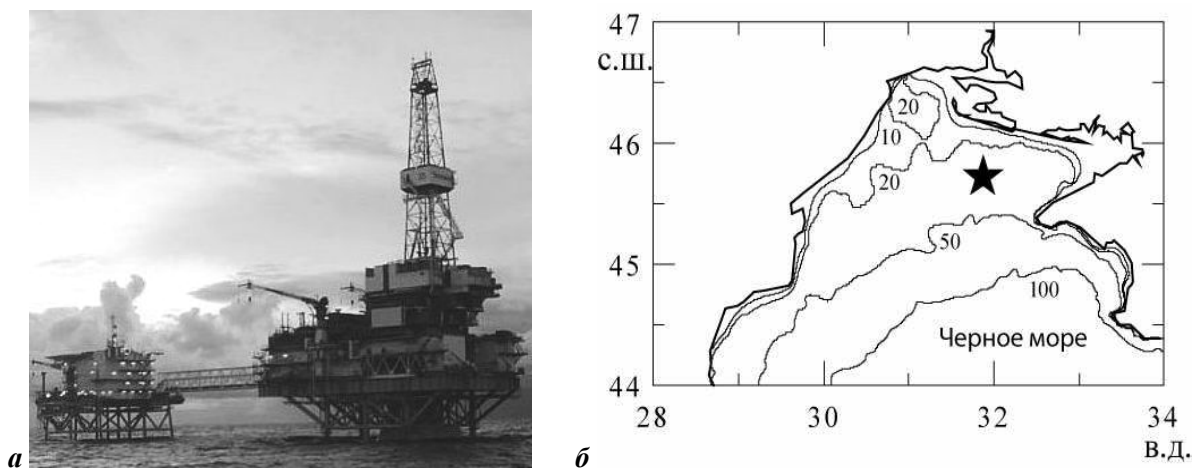


Рис. 1. Внешний вид платформы «Голицыно-4» и ее географическое положение в северо-западной части Черного моря.

Измерения волнения проведены Отделом взаимодействия атмосферы и океана МГИ НАН Украины с использованием витого волнографа [11]. Практически непрерывная регистрация колебаний поверхности моря была начата в сентябре 2000 г. и завершена летом 2001 г.

Колебания уровня моря регистрировались с частотой 4 Гц. Каждый ряд непрерывных наблюдений содержал 12 288 точек, что соответствует промежутку времени 51.2 мин. Интервалы между записями составили 8.8 мин и использовались для измере-

ния скорости ветра. При анализе ветрового волнения эти записи разделялись на три, каждая длительностью 17 мин. Для рядов такой продолжительности поле ветровых волн можно считать стационарным и эргодическим, что обычно предполагается при статистическом анализе волн-убийц по данным наблюдений [12]. Однако отмечено [13], что предположение о стационарности случайного поля ветрового волнения может привести к заниженным на порядок оценкам вероятности возникновения волн-убийц, если волновой процесс таковым не является.

Одновременно с колебаниями уровня моря измерялись (с дискретностью 3 ч) модуль W и направление (угол α) скорости ветра. Модуль скорости воздушного потока определялся как среднее значение W за последние 10 мин трехчасовых интервалов, а направление ветра определялось по мгновенным значениям скорости в конце десятой минуты интервала осреднения модуля скорости. Угол α , характеризующий направление ветра, отсчитывался по часовой стрелке от значения $\alpha = 0$ (северный ветер). Измерения проводились на высоте 70 м. Наиболее полные измерения проведены в декабре 2000 г., и поэтому они использованы при анализе связи образования аномальных ветровых волн и метеоусловий. Зимний период 2000–2001 гг. характеризовался в целом достаточно устойчивой работой волнографического комплекса.

Волны-убийцы по данным наблюдений. Для анализа волн-убийц в северо-западной части Черного моря использованы данные измерений колебаний уровня $z = z(t)$, полученные 1–31 декабря 2000 г. и 1–31 января 2001 г., где z – вертикальная координата, отсчитываемая вверх от заданного горизонта; t – время. Отметим, что измерения выполнялись в зимние месяцы, для которых характерен повышенный уровень волнового фона из-за штормовой активности.

Для выделения возможных аномальных ветровых волн в указанный двухмесячный период анализу было подвергнуто 1660 за декабрь 2000 г. и 1579 за январь 2001 г. 17-минутных центрированных записей колебаний поверхности моря $\zeta = z(t) - \langle z(t) \rangle$, где угловые скобки означают осреднение по времени. При нахождении высоты волн запись рассматривалась как последовательность полных колебаний поверхности моря. Каждое из них начинается и заканчивается нулевыми значениями ($\zeta = 0$), включает один гребень и одну подошву волны.

Одно полное колебание уровня моря на записи можно выделить двумя способами. Так, для определения его начала необходимо, двигаясь вдоль оси времени t , определить соседние нули ζ , соответствующие пересечениям горизонтальной оси $z = 0$ с ростом времени в одном вертикальном направлении, т.е. снизу вверх (zeroup-crossing wave height) или сверху вниз (zerodown-crossing wave height). В общем случае амплитудные характеристики волнового поля зависят от способа выделения отдельных волн на волнографической записи, хотя, как правило, они близки. Часто предпочтение отдается критерию, использующему пересечение нулевого уровня моря снизу вверх [12], поскольку это соответствует высоте ударного фронта волны-убийцы. Ниже выделение волн-убийц по критерию (1) выполнялось обоими способами. При этом выбиралась волна наибольшей высоты. Как правило, высоты волн, найденные этими способами, мало отличались друг от друга.

Для индивидуальной поверхностной гравитационной волны находилась ее высота h . Она принималась равной возвышению гребня волны над последующей (up-crossing criteria) или предшествующей (down-crossing criteria) подошвами волн. Далее по набору высоты $\{h\}$ для каждой 17-минутной реализации определялись максимальная высота волн $h_{\max} = \max\{h\}$ в реализации, значительная высота волн $h_{1/3}$ и индекс аномальности волны AI . Найденные по данным измерений 60-суточные распределения значений $h_{\max}$ и

$h_{1/3}$ приведены в условных единицах на рис. 2, **а**, **б**. Реализации, включающие более одной волны-убийцы, представлены на рис. 2, **а** и только волной максимальной высоты.

Изменения индекса аномальности волны AI по данным измерений в зимний период приведены на рис. 2, **в**. Диапазон его значений охватывает интервал от 1.27 до 2.64. Следуя избранному критерию (1), область над штриховой линией на рис. 2, **в** соответствует образованию волн-убийц. Анализ данных позволил выделить 67 случаев образования волн-убийц различной высоты, т.е. в среднем более одной волны в сутки.

В работе [14] на основе анализа большого объема данных о волнах-убийцах, полученных с использованием радара на плавучей буровой платформе в зоне Агульсова течения, высказано мнение о возможности выделения двух типов аномальных волн. Первый тип, который авторы предлагают рассматривать как традиционные аномальные волны,

соответствует диапазону значений $2 < AI < 4$. Для второго типа $AI > 4$. Волны-убийцы в северо-западной части Черного моря относятся к первому типу.

Анализ записей волн-убийц показал, что такие волны являются либо одиночными (рис. 3, **б**), либо входят в группу волн относительно большой высоты, не являющихся волнами-убийцами согласно критерию (1) (рис. 3, **а**). Все измеренные волны-убийцы были знакопеременными, что отличает их от наблюдавшихся, например, в Балтийском море [15]. Иногда волна-убийца лидирует в волновом пакете (рис. 3, **в**, **г**). Отмечен случай (рис. 3, **г**), когда в одной 17-минутной записи колебаний свободной поверхности жидкости присутствовало две волны-убийцы. Волны обладали заметной асимметрией: их передние склоны, как правило, были круче задних, а предшествующая и следующая за волной-убийцей подошвы волн отличались по глубине и ширине. По всей видимости, отличия в структуре волн-убийц, измеренных в северо-западной части Черного моря на глубинах около 30 м и в Балтийском море на значительно меньших глубинах, обусловлены отличиями вероятных механизмов образования волн-убийц: модуляционной неустойчивостью и частотной дисперсией поверхностных гравитационных волн.

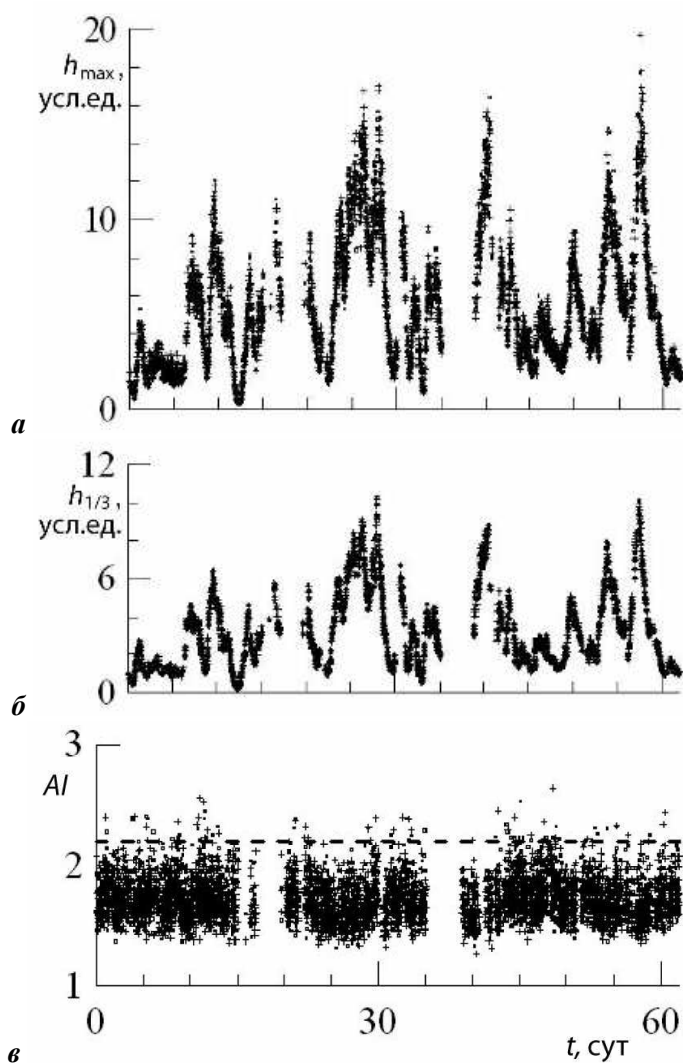


Рис. 2. Изменение максимальной высоты (**а**), значительной высоты (**б**) и индекса аномальности $AI = h_{\max} / h_{1/3}$ ветровых волн (**в**) для 17-минутных записей смещений уровня моря с 1 декабря 2000 г. по 31 января 2001 г.

Локальная высота волны определялась на отрезке между последовательными пересечениями оси нулевых значений уровня моря снизу вверх ($\square$) и сверху вниз ($+$).

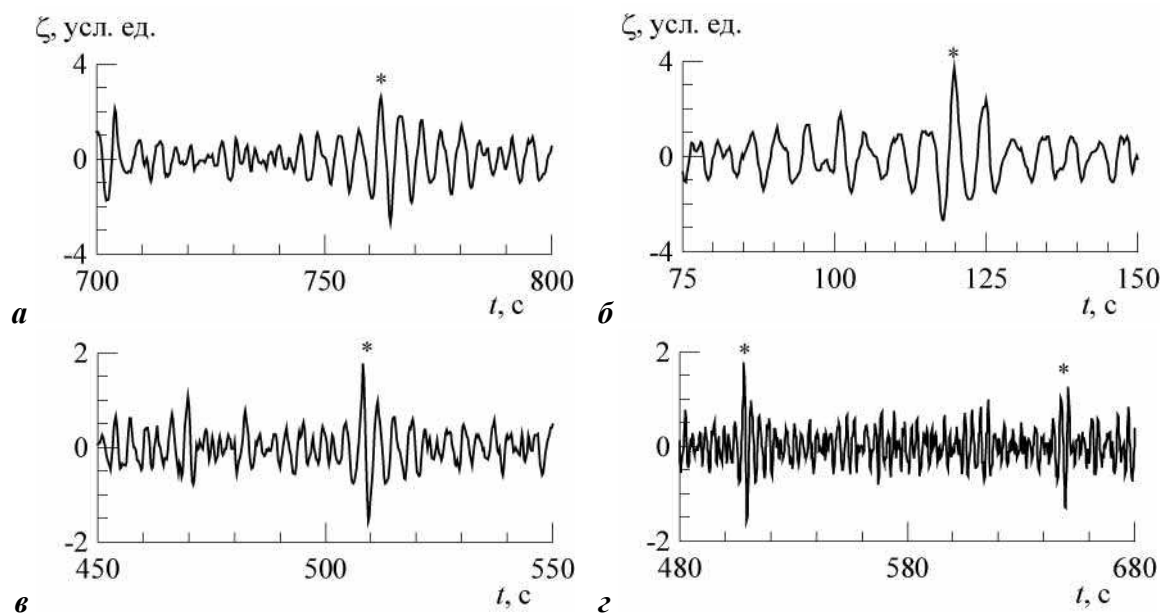


Рис. 3. Некоторые из зарегистрированных волн-убийц.
 2 декабря 2000 г., 3 ч 34 мин, $AI = 2.28$ (а); 12 декабря 2000 г., 9 ч 00 мин, $AI = 2.53$ (б); 15 января 2001 г.,
 2 ч 34 мин, $AI = 2.51$ (в); 18 января 2001 г., 13 ч 00 мин, $AI = 2.64$ (г).
 Волны-убийцы отмечены звездочками.

В подавляющем числе случаев высота гребней волн-убийц больше глубины соседних подошв. Только в 6 из 67 случаев (9 %) глубина подошвы волны-убийцы превосходила высоту гребня аномальной волны. Расчеты частотных спектров по 17-минутным записям колебаний уровня моря, содержащим ветровые волны-убийцы, показали, что, как правило, спектры являются одномодовыми. Только в двух случаях частотный спектр имел два максимума. Периоды всех волн-убийц (временной интервал между двумя последовательными пересечениями уровнем моря в одном направлении горизонта, $z = 0$) в среднем на 10 % меньше периодов волн в максимумах соответствующих частотных спектров.

Возможная связь образования волн-убийц и изменчивости ветрового поля. В настоящее время большинство исследователей склоняются к мнению, что основными физическими механизмами образования волн-убийц являются [1, 2]: пространственная фокусировка волн различных направлений; дисперсионное сжатие волновых пакетов; усиление волн в горизонтально-неоднородных течениях; нелинейное взаимодействие и модуляционная неустойчивость волн. Известны и другие источники генерации волн-убийц. Один из них – атмосферное воздействие на морскую поверхность, повышающее вероятность возникновения таких волн [16] и увеличивающее время «жизни» волны-убийцы [17].

На рис. 4 для района измерений представлены характеристики ветра с дискретностью 3 ч и максимальные высоты волн по всем 17-минутным записям волнения в декабре 2000 г. Моменты образования волн-убийц отмечены стрелками на рис. 4, в.

Рассмотрим, используя представленные на рис. 4 данные наблюдений, связь возникновения волн-убийц и изменений со временем ветрового режима в районе платформы. Моменты образования волн-убийц распределены во времени неравномерно (рис. 4, в). Так, на 1–13 декабря приходится 24 события, на 20–29 декабря – 9 событий. Можно выделить как случаи образования одной волны-убийцы в период от 1 до 6 сут., так и формирование в течение суток до 6 (11 декабря) аномальных волн.

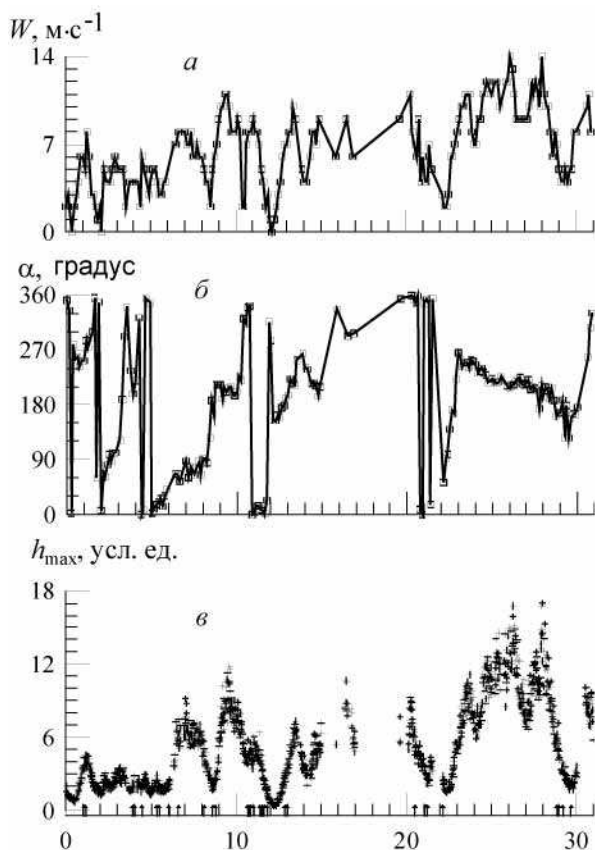


Рис. 4. Характеристики ветра и максимальная высота волны в районе измерений, декабрь 2000 г.
a – модуль скорости ветра; *б* – угол, характеризующий направление скорости ветра;
в – максимальная высота волн $h_{\max}$ для 17-минутных записей колебаний уровня моря.

Сопоставление моментов возникновения волн-убийц (рис. 4, *a*) и изменений характеристик ветра в предшествующие сутки (рис. 4, *б*, *в*) позволяет говорить о весьма вероятной связи образования волн-убийц с предшествующими этому событию изменениями модуля и направления скорости воздушного потока.

Можно выделить две основные ситуации. Первая соответствует возникновению аномальной волны, когда во время ее образования или перед этим событием значительно изменяется направление скорости ветра. Такой случай образования одиночной волны-убийцы показан на рис. 5, *a*, *б* (вверху). Возникновению аномальной волны соответствует почти круговой поворот скорости ветра. Наиболее вероятный механизм образования волн-убийц – фокусировка и нелинейное взаимодействие в районе платформы ветровых волн различных направлений распространения.

Вторая характерная ситуация соответствует образованию аномальной волны, когда событию предшествует ветровой режим с почти постоянным направлением воздушного потока. Подобный случай представлен на рис. 5, *a*, *б* (внизу). Образованию волны-убийцы предшествовал почти постоянный южный ветер длительностью более 2 сут., который наиболее благоприятен для развития интенсивного ветрового волнения в северо-западной части Черного моря. Вероятный механизм образования волны-убийцы в этом случае – дисперсионное сжатие нелинейного волнового пакета.

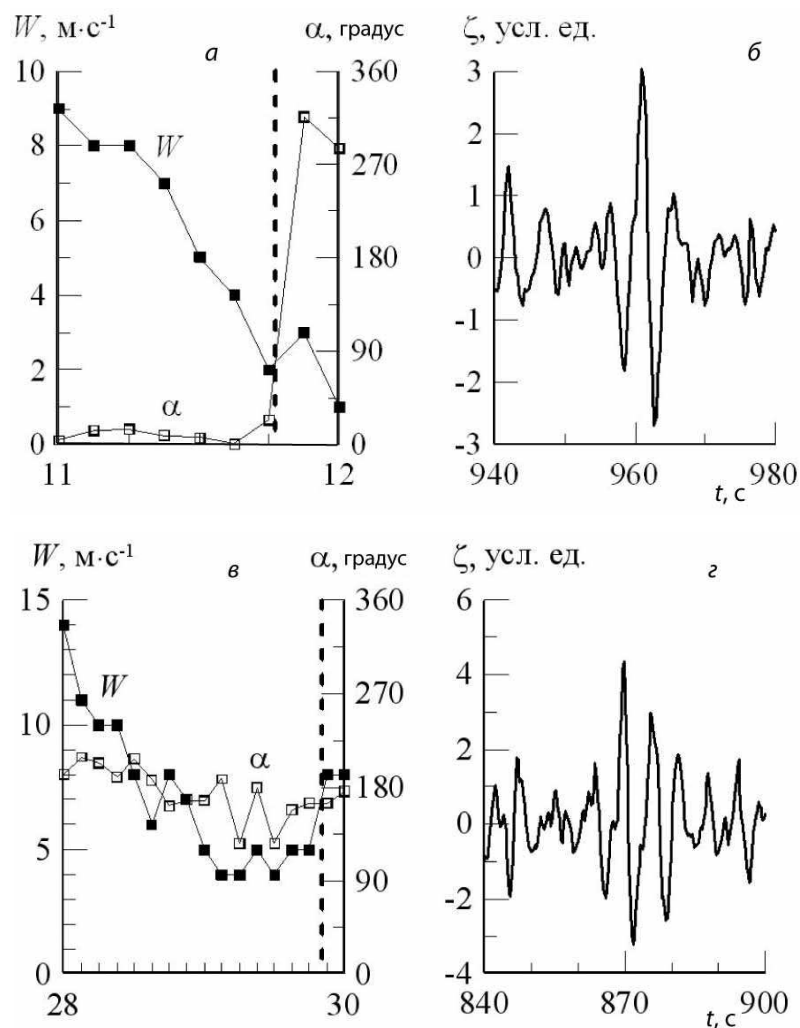


Рис. 5. Характеристики ветра (*а, в*), предшествующего образованию волны-убийцы (*б, г*) в случае поворота горизонтального (*а, б*) и однонаправленного (*в, г*) воздушного потока. Декабрь 2000 г.

Вертикальная штриховая линия – момент образования аномальной волны.

Основные результаты выполненного исследования можно сформулировать следующим образом.

На основе волнографических измерений с платформы в северо-западной части Черного моря в декабре 2000 г.–январе 2001 г. исследованы характеристики ветровых волн-убийц и возможная связь образования экстремальных волн с полем ветра в регионе.

Анализ двухмесячных данных измерений позволил выделить 67 случаев образования волн-убийц различной высоты, выделенных по критерию (1), т.е. в среднем более одной волны-убийцы в сутки. Эти короткоживущие образования проявлялись как в виде одиночных волн, так и в составе групп ветровых волн меньшей высоты с ярко выраженными дисперсионными эффектами. Волны обладали заметной асимметрией, их передние склоны, как правило, были круче задних, а предшествующая и следующая за волной-убийцей подошва волны отличалась по глубине и ширине.

Используемый для выделения волны-убийцы критерий (1) оперирует с относительной высотой экстремальных волн. Поэтому выполнение этого критерия не означает, что высота (размах колебаний) соответствующей волны действительно велика.

Привлечение метеорологических измерений в декабре 2000 г. позволило выполнить анализ возможной связи образования поверхностных волн-убийц и ветровых режимов в районе проведения наблюдений. Сопоставление моментов образования волн и предшествующих этим событиям изменений со временем скорости ветра позволили сделать вывод об их весьма вероятной связи.

Выделены две наиболее характерные ситуации. В первой из них возникновение волны-убийцы сопровождается значительными изменениями направления скорости ветра, во второй – предшествующим ветровым режимом с почти постоянным направлением скорости ветра.

Таким образом, из 33 зарегистрированных в декабре 2000 г. случаев образования волн-убийц в 10 % случаев не изменялась погодная обстановка в районе измерений, в 38 % – наблюдался разворот ветра с изменением модуля скорости, а в остальных 52 % случаев направление скорости ветра в предшествующие образованию волны-убийцы сутки практически не менялось.

Литература

1. Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. Волны-убийцы: факты, теория и моделирование. Н.Новгород: Нижегородский гос. техн. ун-т, 2004. 158 с.
2. Kharif C., Pelinovsky E., Slunyaev A. Rogue in the ocean. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. 216 p.
3. Lopatoukhin L., Boukhanovsky A. Freak wave generation and their probability // 8th Inter. conf. «Stability of ships and ocean vehicles». 2003. P.551–562.
4. Liu P.C., Pinho U.F. Freak waves – more frequent than rare // Ann. Geophys. 2004. V.22, N 5. P.1839–1842.
5. Бадулин С.И., Иванов А.Ю., Островский А.Г. Волны-убийцы и их дистанционное зондирование // Исследование Земли из космоса. 2006. № 1. С.77–92.
6. Доценко С.Ф., Иванов В.А. Волны-убийцы. Севастополь: Морской гидрофизический институт НАН Украины, 2006. 44 с.
7. Дивинский Б.В., Левин Б.В., Лопатухин Л.И. и др. Аномально высокая волна в Черном море: наблюдения и моделирование // Докл. РАН. 2004. Т.395, № 5. С.948–950.
8. Доценко С.Ф., Иванов В.А., Побережный Ю.А. Волны-убийцы в северо-западной части Черного моря // Доповіді НАН України. 2009. № 9. С.113–117.
9. Доценко С.Ф., Иванов В.А., Побережный Ю.А. Связь образования волн-убийц и метеорологических условий в северо-западной части Черного моря // Доповіді НАН України. 2010. № 12. С.105–109.
10. Кузнецов С.Ю., Дулов В.А., Сапрыкина Я.В. и др. Экстремально опасные штормовые условия в Черном море. Севастополь: Морской гидрофизический институт НАН Украины, 2011. 65 с.
11. Толокнов Ю.Н., Коровушкин А.И., Козлов К.Г. Автоматизированный гидрометеорологический комплекс // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: МГИ НАН Украины, 1998. С.12–16.
12. Jenkins A.D., Magnusson A.K., Niedermeier A. et al. Rogue waves and extreme events in measured time-series. Report WP2/1 from MAXWAVE project // Bergen: Norwegian Meteorological Institute, 2002. N 138. 101 p.
13. Muller P., Garrett C., Osborne A. Rogue waves // Oceanography. 2005. V.18, N 3. P.66–75.
14. Liu P.C., MacHut K.R. Are there different kinds of rogue waves // Proc. of 25th Int. conf. «Offshore mechanics and arctic engineering», 2006. OMAE2006-92619. P.1–6.
15. Didenkulova I., Anderson C. Freak waves of different types in the coastal zone of the Baltic Sea // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2010. V.10, N 9. P.2021–2029.
16. Donellan M. A., Magnusson A. K. The role of meteorological focusing in generating wave conditions // Proc. of 14th Aha Huliko'a Hawaiian winter workshop, 2005. P.139–145.
17. Touboul J. On the influence of wind on extreme wave events // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2007. V.7, N 1. P.123–128.

Статья поступила в редакцию 03.09.2011 г.

