

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.11.12>

УДК: 551.466.2; 621.396.969

ПРОБЛЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ ВОЛН НА ВОДЕ НАВИГАЦИОННЫМИ РАДИОЛОКАТОРАМИ

1. МОДЕЛИ АНОМАЛЬНЫХ ВОЛН

В.А. Пермяков, А.И. Баскаков, С.В. Пермяков, Н.А. Фирсов

Национальный исследовательский университет МЭИ
111250, Москва, Красноказарменная ул., д.14

Статья поступила в редакцию 11 сентября 2022 г.

Аннотация. Проведен обзор характеристик аномальных волн большой высоты, представляющих опасность для гражданских судов и морских платформ по добыче полезных ископаемых. Проанализированы возможные пространственные структуры аномальных волн в двумерном приближении, а также время существования таких волн до момента разрушения. Известная классификация аномальных волн (одиночная волна-башня, группа волн (три сестры), белая стена) дополнена с учетом того, что аномальные волны наряду со скругленными вершинами могут иметь клиновидную форму гребня. Сформулировано условие обнаружения аномальных волн классическими обзорными навигационными радиолокаторами. Минимально возможное время обнаружения аномальных волн определяется условием обнаружения цели за ограниченное число оборотов антенны.

Ключевые слова: классификация аномальных волн, структура гребня, временные характеристики, критерий обнаружения аномальных волн, обзорный навигационный радиолокатор.

Автор для переписки: Пермяков Валерий Александрович,
v.permyakov38@yandex.ru

Введение

Проблема обнаружения, наблюдения, выяснения физических причин возникновения аномальных волн (АВ) является предметом изучения специалистов в области физики свыше 50 лет. Особенно интенсивно эта проблема изучается последние 20 лет. Опубликовано большое число обзоров на эту тему [4-10], монографии [11-13], поставлены специальные исследования АВ [14,15]. В России сформировались научные коллективы, активно изучающие проблему АВ (научные группы академика В.Е. Захарова (Москва), профессора Е.Н. Пелиновского (Нижний Новгород), профессоров А.В.Бухановского, Л.И. Лопатухина., профессора Д.В. Чаликова (Санкт-Петербург)). В изучении физических причин возникновения АВ достигнут большой прогресс. Читателям, незнакомым с этой проблемой, рекомендуем ознакомиться с обзорами [8,10] и книгами [11-13].

Актуальность изучения АВ обусловлена тем, что АВ причиняют заметный ущерб морскому судоходству. АВ, именуемые также волнами-убийцами, приводят к повреждению, а то и гибели судов, в том числе супертанкеров, потерям экипажа [11-15]. Другая опасность АВ заключается в их столкновениях с морскими платформами для добычи нефти и газа [12,14]. Оценки энергии АВ показывают, что величина их воздействия на суда и морские платформы существенно больше, чем допускается нормами, которые используются при конструировании судов и платформ [16]. Поэтому обнаружение АВ и предупреждение аварий на море является актуальной задачей.

Для измерений высоты морских волн применяются морские буи, однако они не могут решить проблему предупреждения аварий. Наиболее подходящими для этой цели являются радиолокационные средства. Принципиально можно обнаруживать АВ с помощью космических радиолокаторов с синтезированной апертурой [14,15]), однако эти локаторы размещаются на высоте до 1500 км над поверхностью Земли и вращаются вокруг Земли. Поэтому они не могут обеспечить стационарное наблюдение за

выделенным участком океана, хотя полезны для выяснения условий возникновения и эволюции АВ. Береговые радиолокаторы обеспечивают наблюдение моря только в прибрежной зоне.

Хотя имеются сообщения, что радиолокаторы использовались при проведении исследований по изучению АВ (MAXWAVE Project [14,15]), нам не удалось найти работы, в которых бы специально изучалась проблема применения радиолокаторов для обнаружения и сопровождения АВ. Имеются в виду обзорные радиолокаторы сантиметрового диапазона волн, которые устанавливаются на судах в соответствии с отечественными требованиями [17], учитывающими рекомендации Международной Морской Организации. Близка к рассматриваемой нами теме публикация [18], однако какие-либо конкретные приложения этой работы на практике не найдены. Также следует упомянуть работу [19], которую мы обсудим далее.

Программа исследований предполагает следующие этапы.

- 1) Обзор существующих к настоящему времени моделей АВ.
- 2) Определение ЭПР ряда моделей АВ, для которых имеется достаточно полная информация об их характеристиках, необходимая для решения задачи радиолокации.
- 3) Расчет радиолокационных характеристик АВ и выводы о возможности их наблюдения и сопровождения с учетом характеристик современных навигационных или специальных радиолокаторов.

Настоящая работа содержит обзор публикаций по первому этапу исследований, причем, с учетом громадного количества публикаций по этой теме, будем ссылаться выборочно в основном на работы последних лет.

Ниже будем использовать общепринятое определение АВ на воде как волн, высота которых H_{aw} удовлетворяет неравенству

$$H_{aw} > 2,2H_s, \quad (1)$$

где H_s – значительная высота волн, определяемая в океанографии, как среднее значение высоты одной трети больших волн [1].

Типичный поперечный профиль АВ показан на рис. 1, из которого следует, что высота АВ H_{aw} измеряется от глубины впадины до вершины гребня АВ. Однако при радиолокации нас должна интересовать только та часть АВ, которая выше значительной высоты волн, ибо именно она рассеивает назад к локатору падающее электромагнитное поле. Поэтому необходимо знать соотношение между глубиной впадины H_{cav} и высотой гребня (положительной части АВ) H_+ , отсчитываемых от среднего уровня моря ($H_{aw} = H_+ + H_{cav}$). Оценки на основе численных результатов [2] дают следующие соотношения при $H_{aw} = 2,2$: $H_+ = 1,2$, $H_{cav} = 1$. В дальнейшем основной характеристикой АВ, которая будет нас интересовать, будет высота АВ $H = H_+ - H_s$ над значительной высотой H_s .

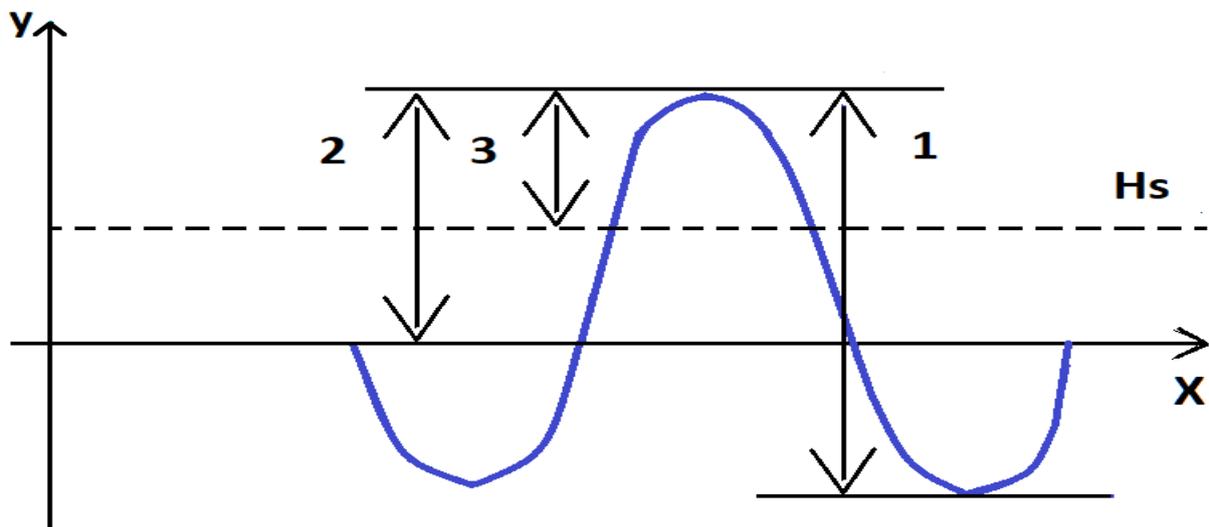


Рис. 1. К определению высоты АВ. 1) Высота АВ H_{aw} от глубины впадины до вершины гребня. 2) Высота гребня (положительной части АВ) H_+ от среднего уровня моря до вершины гребня. 3) Высота АВ H , выступающая над значительной высотой волн. Значительная высота волн H_s показана штриховой линией

Было предложено и более детальное определение АВ, обсуждаемое в [3]. Но определение (1) представляется более простым и удобным при первичном рассмотрении интересующего нас вопроса, тем более что высота АВ является принципиальным параметром, влияющим на ее эффективный поперечник рассеяния (ЭПР).

1. Характеристики судовых навигационных радиолокаторов

Требования к навигационным судовым радиолокаторам изложены в руководящем документе [17]. Обязательными для применения являются РЛС, работающие в *X* диапазоне (частоты 9,2-9,5 ГГц, длина волны 3 см) и в *S* диапазоне (частоты 2,9-3,1 ГГц, длина волны 10 см) с обзором по азимуту 360°, обеспеченным механическим вращением антенны с частотой не менее 20-ти оборотов в минуту. Направление максимума диаграммы направленности антенны РЛС по носу судна должно обеспечивать обнаружение цели на расстояниях не менее 500 м от судна или двух длин судна в зависимости от того, что меньше. Требования к РЛС независимо от типа судна изложены в таблице 5.7.2, минимальные дальности обнаружения целей с различными ЭПР – в таблице 5.7.5, погрешности определения параметров движущихся целей – в таблице 5.7.34 [17].

РЛС *X* диапазона используется для получения высоких уровней разрешения и чувствительности в отсутствие помех, РЛС *S* диапазона – для уверенного обнаружения и сопровождения целей при наличии помех (туман, дождь, морское волнение) [17]. Для анализа навигационной обстановки в сложных условиях (проливы, острова, бухты) применяют РЛС миллиметрового диапазона, однако они не являются обязательными.

Обзорные РЛС используют импульсные радиосигналы и оснащаются устройствами для подавления помех, обусловленных рассеянием сигналов на гидрометеорах, морском волнении и т.д., однако в руководстве [17] требования к этим характеристикам РЛС не обсуждаются.

Общие требования к характеристикам антенн определены в п.4.4. [17]. Требования к обнаружению цели с вероятностью ложной тревоги не более 10^{-4} проверяются при высоте антенны 15 м над уровнем моря в отсутствие помех. На практике обычно антенны устанавливаются на большей высоте.

2. Обзор пространственных форм АВ

В статье [14] была упомянута простая классификация форм АВ, а именно: 1) одиночные волны – башни (солитоны), 2) «три сестры» (две, три и более АВ, следующих друг за другом), 3) «белая стена». Последний термин означает существование протяженной по фронту АВ.

Следует пояснить также термин «солитон». Хотя понятие солитона получило широкое распространение в физике, в том числе в радиофизике, нас интересует его первичное определение, данное как раз по наблюдению волн на воде. С физической точки зрения – это уединенная волна определенной структуры, сформировавшаяся на границе раздела воздушной и водяной сред и движущаяся длительное время без изменения формы. Впервые наблюдал такую волну шотландский ученый Скотт Рассел в 1834 году. Прочитируем его наблюдение по русскому переводу в книге [20]:

(Здесь и далее цитаты выделены курсивом):

«Я наблюдал за движением баржи, которую быстро тащила вдоль узкого канала пара лошадей, когда внезапно баржа остановилась— вся масса воды в канале пришла в движение; вода собралась у носа корабля в состоянии бурного волнения, затем вдруг оторвалась от него и покатила вперед с большой скоростью, приняв вид большого уединенного возвышения; округлый, гладкий, четко выраженный холм воды продолжал свое движение по каналу без видимого изменения формы или уменьшения скорости. Я бросился за этой волной верхом на лошади и догнал ее, когда она еще двигалась со скоростью около восьми или девяти миль в час, сохраняя первоначальную форму, и имела около тридцати футов в длину и от фута до полутора футов в высоту. Ее высота постепенно уменьшалась и после одной или двух миль погони я потерял ее в изгибах канала».

В настоящее время экспериментальные наблюдения, в том числе измерения высоты АВ проводятся в море с помощью буев, в бассейнах научных и инженерных организаций, а также с помощью измерительных приборов, устанавливаемых на морских платформах.

Математические модели АВ базируются на решении строгих нелинейных уравнений гидродинамики, а также упрощенных нелинейных уравнений (Шредингера, Дастэ и других), которые позволяют получить численное либо приближенное аналитическое решение АВ. В качестве основных обычно используются двумерные уравнения (в прямоугольной системе пространственных координат (x, y) и временной координаты t). При этом положим, что волна движется в направлении положительных значений координаты x , ось z направлена вдоль фронта волны. Высота АВ определена выше.

Чаликовым Д.В. [16] было высказано мнение, что на данном этапе исследований достаточно ограничиться двумерными моделями АВ, поскольку они учитывают основные закономерности формирования структуры АВ в поперечной плоскости волны и базируются на эффективном численном решении уравнений гидродинамики. Мы учитываем это мнение. В рамках этого предположения двумерную модель АВ с бесконечным фронтом вдоль оси z будем считать моделью «белой стены», вырезку из этой модели длиной b ($-b/2 < z < b/2$) будем рассматривать как приближенную трехмерную модель, в том числе солитонную модель АВ. Геометрические формы «трех сестер» могут быть описаны аналогичным образом, если задаться дополнительно расстояниями между соседними волнами.

3. Двумерные модели АВ

Приведем взятое из [10] представление разных форм АВ согласно экспериментам в Индии (см. ссылку [7] в [10]).

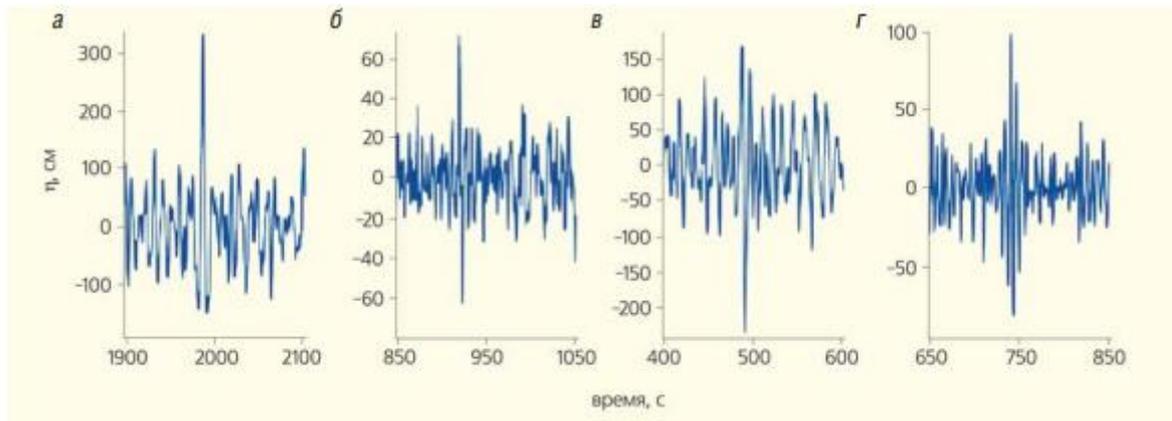


Рис. 2. Разные формы аномальных волн, зарегистрированных буем у берегов Индии. а) высокий гребень, б) знакопеременная волна, в) «дыра в море», г) группа волн (рис. 4 из [10])

Обратим внимание на то, что разрешение по времени на рис.2 недостаточно для определения тонкой структуры АВ, в этом приближении модель АВ может быть задана как вертикальная пластина высоты H . Следует иметь в виду, что при описании радиолокации АВ необходимо учитывать закрытие верхней части АВ волнами значительной высоты, а также дополнительное рассеяние электромагнитных волн в направлении РЛС фоном случайной последовательности обыкновенных волн.

Если увеличить разрешение по времени, то различные формы АВ могут быть качественно представлены следующими моделями.

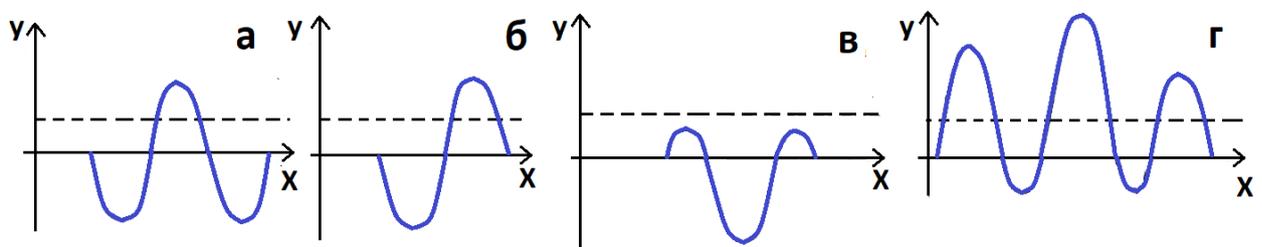


Рис.3. Качественные структуры АВ, соответствующие экспериментально наблюдавшимся и показанным на рис.2. Обозначения рисунков те же, что на рис.2. Штриховой линией показан уровень волн значительной высоты

Справедливость качественных структур АВ, приведенных на рис. 3, подтверждается натурными и численными экспериментами (см. например, [5], [21]).

Согласно рис. 3 АВ движутся слева направо. На основе рис. 3 при локации АВ справа качественно можно пренебречь ролью впадин и учитывать только рассеяние частью АВ, расположенной выше H_s . Это рассуждение соответствует приближениям геометрической и физической оптики, поскольку высота АВ значительно больше длин электромагнитных волн РЛС, работающих в сантиметровом и миллиметровом диапазонах электромагнитных волн. Следует отметить, что впадина перед высокой частью АВ (рис. 2а) существенно влияет на движение судна, как это следует из наблюдений моряков [16]. Однако обнаружение впадины при радиолокационном наблюдении мало вероятно, так как она закрыта от радиосигнала фоном обычных волн со средней высотой H_s . Тем более нельзя обнаружить впадину за гребнем АВ, так как она находится в зоне дифракционной тени.

Однако формы АВ приведенные на рис.3, не являются единственно возможными. Известно, что при определенных условиях по мере движения гребень АВ принимает форму клина. Хорошо известный пример – точное решение уравнений гидродинамики в виде волны Стокса [23]. При увеличении параметра, характеризующего крутизну волны, происходит трансформация гладких волн в последовательность волн с треугольным гребнем. Форма гребня АВ важна для выбора метода решения задачи рассеяния на ней электромагнитных волн. Экспериментальные данные не гарантируют строгое измерение формы гребня АВ, так как временные отсчеты ведутся с дискретным шагом. Поэтому важно изучение формы гребня в строгой математической постановке задачи распространения волн на поверхности жидкости. Этот вопрос обсуждался, начиная с оригинальной работы Стокса, в которой было показано, что внутренний угол раствора клина экстремальной волны при бесконечной глубине волны составляет 120 градусов [22]. Отметим

в этой связи современный математический обзор работ по волнам на воде [23]. В работе [24], упомянутой в [23], строго доказано, что гребень волны Стокса на воде конечной глубины в предельном случае имеет вид клина с внутренним углом раствора 120 градусов. Эксперименты показывают, что реально угол раствора клина АВ может быть существенно меньше. Так, АВ треугольной формы с углом раствора $\alpha \approx 84$ градусов наблюдалась в эксперименте [25], при прохождении двух солитонов друг через друга.

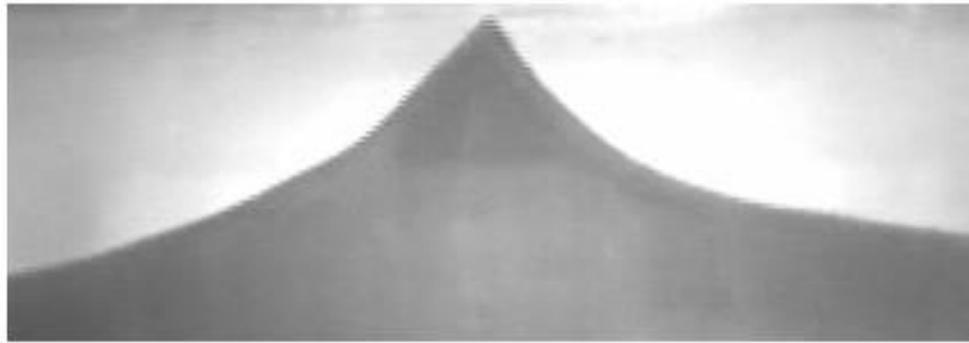


Рис. 4. Форма солитона с треугольным гребнем [25]

В качестве другого примера рассмотрим «новогоднюю» волну или волну Дропнера, обрушившуюся на платформу в Северном море 1 января 1995 года. Запись высоты этой АВ при невысоком разрешении имеет вид, подобный рис. 2а (см. [12], рис.1.9). Более детальная структура «новогодней» волны, приведенная на рис. 6, взятом из [26] (рис.11, стр.96), выявляет клиновидную форму гребня. Эта форма согласуется с экспериментами по формированию АВ, проведенными в волновых бассейнах [26, 27]. На основе данных [26] можно аппроксимировать АВ, в пренебрежении асимметрией, клином с внутренним углом раствора клина $\alpha \approx 12 \div 16$ град.

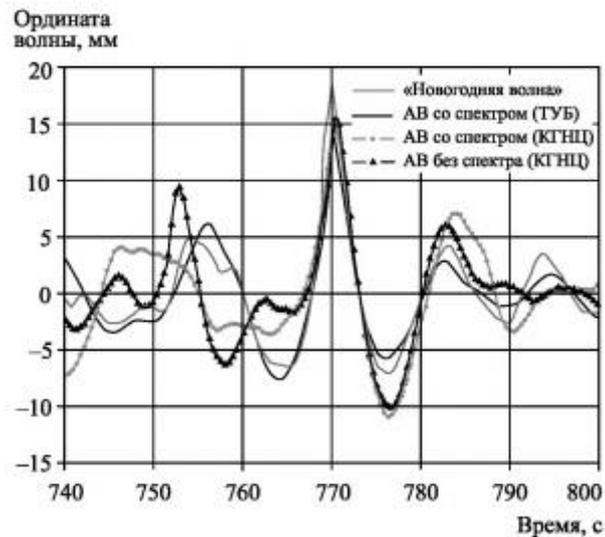


Рис.5. Профили аномальной волны в масштабе природы. Сравнение «новогодней волны» с аномальной волной, полученной в Техническом университете Берлина и в Крыловском научном центре (рис. 11. в [26])

Малость угла раствора клина в бассейновых экспериментах, по видимому, объясняется малой глубиной бассейнов. Это согласуется с численными экспериментами для волн Стокса при конечной глубине [7].

Остается рассмотреть случай «трех сестер». Удерживая выбросы, ближайšie к АВ максимальной высоты и удовлетворяющие условию (1), приходим к группе АВ, изображенных на рис. 3г. Таким образом, в дальнейшем потребуется рассмотреть дифракцию электромагнитного сигнала РЛС и на группе АВ.

Конкретное описание группы АВ, использованное в [19], имеет вид

$$y_0 = a \exp\left(-\frac{x^2}{l^2}\right) \cos k_0 x, \quad (2)$$

где l — характерный размер волнового пакета (огibaющей) и k_0 — волновое число несущей.

Окончательно возможные двумерные формы АВ, которые следует принять во внимание при определении ЭПР АВ, показаны на рис. 6.

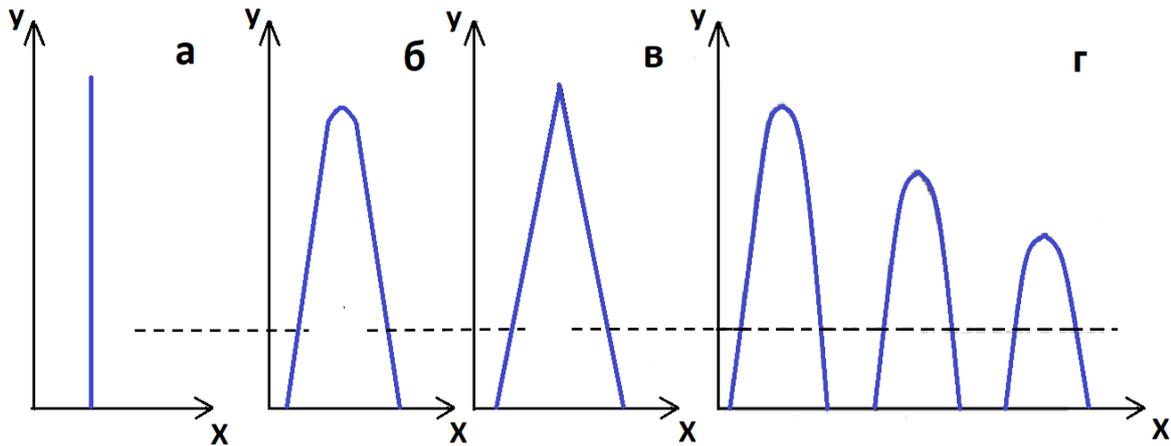


Рис. 6. Модели АВ для расчета ЭПР. а) Вертикальная пластина, б) Одиночная АВ со сглаженной вершиной гребня, в) Одиночная АВ с треугольным гребнем, г) Три сестры (вариант со скругленными гребнями). Средняя высота волн дана штриховой линией

В формах рис.6. допускается искривление поверхности АВ, а также существование «трех сестер» с треугольными гребнями.

4. Кратко о трехмерных моделях АВ

Структура пространственной трехмерной АВ известна из наблюдений Скотта Рассела, согласно которому она имеет вид «гладкого горба» [20]. Экспериментально структура трехмерной АВ была зафиксирована стереофотосъемкой в [28], см. также [3] и радиолокатором с синтезированной апертурой в [14]. В море и лабораторных бассейнах наблюдались АВ типа «белой стены» [12].

В теоретических работах, основанных на интегрировании приближенных уравнений Шредингера, Дастэ и других, были обнаружены разнообразные формы солитонов, как правило, представляющие собой один или несколько пиков пирамидальной формы с гладким поперечным сечением, окруженных глубокими ложбинами [12].

5. О пространственно-временных характеристиках АВ

Радиолокация морских целей дает информацию не только о расстоянии до целей, но и о скорости их движения. Для оценки возможности наблюдения АВ необходимо иметь, хотя бы приближенно, следующие характеристики

- 1) время существования АВ с момента выполнения условия (1) до начала обрушения (развала) АВ;
- 2) время существования различных форм АВ (гладкий гребень или клин) в процессе ее эволюции;
- 3) скорости движения АВ на различных участках ее существования;
- 4) скорость движения окружающего АВ фона обыкновенных волн.

Мы сознательно не рассматриваем стадию разрушения (опрокидывания) АВ, исходя из того, что нас интересует стадия развития АВ до момента достижения максимальной высоты, когда следует ожидать максимальной величины отраженного от АВ электромагнитного поля РЛС.

Источниками экспериментальной информации о временных характеристиках АВ служат:

- 1) визуальные наблюдения АВ членами экипажа судна;
- 2) измерения временных характеристик АВ морскими буями;
- 3) измерения характеристик АВ в лабораторных бассейнах;
- 4) радиолокационные измерения

К сожалению, информации о временных характеристиках АВ сравнительно меньше, чем о пространственной форме АВ.

Приближенно ситуацию с временными наблюдениями АВ можно оценить следующим образом. В качестве критерия обнаружения АВ с помощью обзорных навигационных РЛС, примем требование

$$T_{\min} \leq \tau, \quad (3)$$

где за T_{\min} следует принять минимальное время оборотов антенны, в течение которых должна наблюдаться АВ длительностью τ . Согласно требованиям [17] цель должна наблюдаться 8 оборотов антенны из 10-ти, при 20-ти

оборотах в минуту это время составляет 24 с. Указанная оценка будет уточнена во второй части работы с учетом того, что при определенных условиях для обнаружения цели может понадобиться иное число оборотов.

Практически представляет интерес не только обнаружение АВ, но и установление возможности столкновения ее с судном или нефтяной платформой. При этом следует принять во внимание такую характеристику РЛС, как мертвая зона локатора. Для судов больших размеров мертвая зона составляет 500 м, для судов малых размеров может составлять 50 м. Поскольку наблюдение АВ в мертвой зоне невозможно, на наш взгляд, может быть принято следующее правило: подача сигнала тревоги на судне при подходе АВ к границе мертвой зоны.

Наблюдения показывают, что в подавляющем числе случаев АВ возникают неожиданно и время их жизни мало [12].

Поэтому все возможные случаи наблюдения АВ можно разделить на 3 группы: ненаблюдаемые с помощью обзорных радиолокаторов АВ, не удовлетворяющие неравенству (3), наблюдаемые длительные АВ, удовлетворяющие сильному неравенству $T_{min} \ll \tau$ и АВ с временем существования $\tau \approx T_{min}$, обнаружение которых требует особого рассмотрения.

Информация о времени жизни АВ может быть получена визуальными либо инструментальными наблюдениями.

Использование буев и волновых бассейнов способно дать интересующую информацию о временных характеристиках АВ. К сожалению, волновые бассейны имеют свои ограничения, ключевое из которых – геометрические размеры бассейна. Фактически в волновых бассейнах удается моделировать волны на мелкой воде. Несмотря на это ограничение, эксперименты в волновых бассейнах представляются весьма полезными, в том числе для сопоставления с теоретическими моделями.

В качестве примера рассмотрим результаты измерений АВ в бассейне университета г. Ганновера глубиной 4 м ([27], см. также рис. 3.5 в [12]). Из

этого рисунка следует, что до дальности 50,05 м АВ имеет гладкий гребень, на дальности 70 м гребень становится клиновидным. Максимальная высота АВ достигается на расстоянии 84 м, далее АВ рассыпается. Время формирования АВ вплоть до времени разрушения (расстояния от 70 до 90 м) оценивается величиной несколько секунд.

Теоретические исследования пространственно-временных характеристик АВ вскрыли многообразие способов возбуждения и механизмов образования АВ в океане. Особый интерес представляют механизмы нелинейного формирования АВ, в том числе солитонов. Подобные экспериментальные ситуации изучены недостаточно.

Обсудим результаты, полученные с помощью эффективных численных методов, основанных на конформных преобразованиях, для решения в строгой постановке задачи гидродинамики о распространении волн вдоль морской поверхности. Этими методами, развитыми Чаликовым Д.В. с соавторами, решаются как двумерные, так и трехмерные задачи с высокой точностью и за достаточно короткое время [2,13].

Из численных результатов [2,13] следует, что одиночные АВ существуют весьма краткое время (единицы секунд), что согласуется с упомянутыми выше наблюдениями. Наряду с этим расчеты предсказывают существование групп с большим числом АВ (до 34), общее время существования которой приближается к минуте.

В качестве примера приведем результат из работы [2]. Согласно оценкам [2], время существования пика АВ $T_p = 1,4$ с. Длина цуга из восьми АВ составляет при этом 11 с. Число АВ в рассчитанных группах менялось от 1 до 34 [2]. Максимальному числу АВ в группе 34 соответствует время наблюдения группы 48 с. Минимальное время наблюдения группы АВ, достаточное для ее регистрации, при скорости вращения антенны РЛС 20 оборотов в минуту составляет, как было указано выше, 24 с. Следовательно, существует принципиальная возможность регистрации цуга АВ, содержащих не менее 17-ти АВ, Но такие длинные группы АВ согласно расчетам [2] весьма редки.

В общем числе расчетов групп АВ только одна группа имела число АВ больше 17-ти [2].

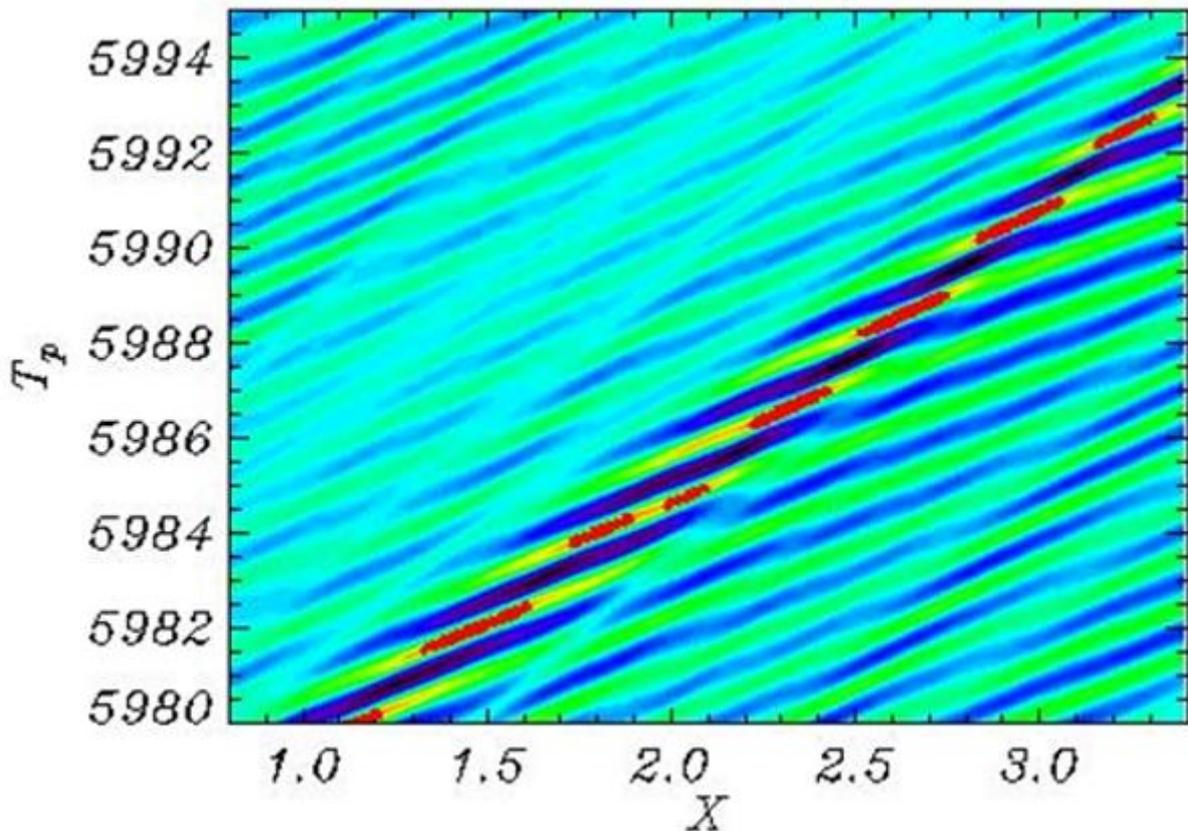


Рис. 7. Цуг из восьми АВ, рассчитанный в работе [2] для глубокого океана. Красным цветом отмечены индивидуальные АВ

Для оценок скорости движения АВ можно использовать теорию Римановых волн [12]. На рис. 8 приведен расчет групповой скорости Римановой волны, нормированной делением на величину групповой скорости волны в линейном приближении $v_{gr} = \sqrt{gh}$, здесь g – ускорение свободного падения, h – глубина воды.

Для определения групповой скорости волны с помощью графика рис.8 следует задаться глубиной воды h . Далее по рис. 8 и заданному волновому числу находится групповая скорость волны.

Вопрос существования долговременных АВ является предметом дискуссии. Тем не менее можно привести аргументы в пользу возможного существования АВ со временем единицы – десятки минут. Обратимся к наблюдению солитона Скоттом Расселом (см. приведенную выше цитату).

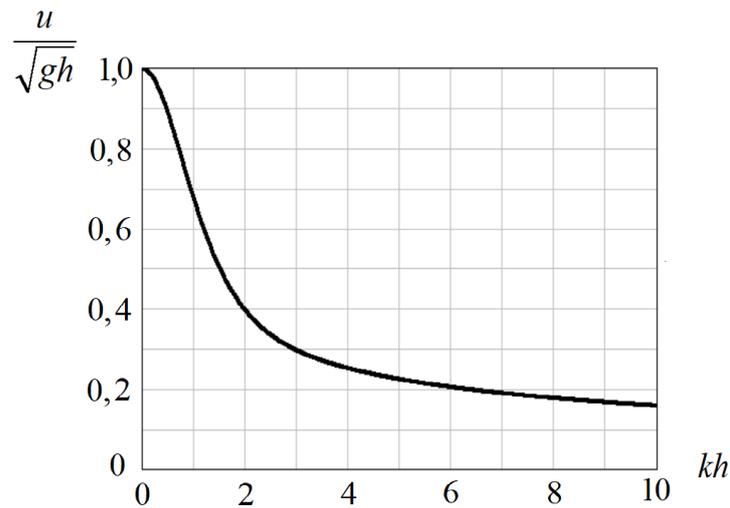


Рис. 8. Групповая скорость Римановой волны, нормированная на скорость в линейном приближении \sqrt{gh} , как функция kh (k – волновое число, h – глубина воды)

Примем среднее значение скорости солитона 8,5 миль в час. Тогда время существования солитона с учетом разброса приведенной Расселом оценки дальности пробега солитона 1-2 мили составит 7-14 минут. Это уже достаточно большая величина для наблюдения солитона с помощью РЛС.

Единственным аргументом против такой оценки является то, что солитон Расселла был не естественным порождением свободных волн, а искусственным явлением, полученным в специальных условиях.

Возможность существования долговременных АВ рассмотрена в работе [19]. Физический механизм, приводящий к возникновению АВ в [19], заключается в возникновении аномально больших волн зыби на фоне слабого ветрового волнения. Оценки [19] дали следующий результат «для соотношения $H/H_s = 2.2$ время исчезновения «одной, двух, трех и четырех сестер» составляет соответственно 1.5, 9, 15 и 80 мин.»

С учетом всех ограничений, при которых получены эти оценки, из них следует возможность существования АВ вплоть до прихода АВ к судну с радиолокатором по крайней мере для двух и более сестер, если АВ обнаружены на подходе к мертвой зоне локатора размером от 50 м до 500 м (при скоростях движения АВ 6 м/с, принятых в [19]).

Подводя итоги анализа временных характеристик АВ, приведем мнение специалистов – гидродинамиков [3, 13], согласно которому имеет смысл только вероятностный прогноз возникновения АВ в различных областях земного шара в тесной увязке с погодными условиями.

Вероятностные прогнозы возникновения АВ безусловно необходимы. В то же время, на наш взгляд, целесообразно проанализировать возможности использования классических навигационных РЛС, являющихся стандартным оснащением судов, для наблюдения длительно живущих АВ со временем жизни единицы и более минут, при мертвой зоне РЛС от 50-ти до 500 метров. Локационное обнаружение АВ, удовлетворяющих условию (3), может быть полезно по мере накопления числа наблюдений АВ для сопоставления с расчетной статистикой.

В этой связи отметим, что морские радары использовались для обнаружения АВ в программе MAXWAVE [15], но условий и результатов работы этих радаров по целям типа АВ нам найти не удалось. Вопросы обнаружения и наблюдения АВ классическими обзорными радарными предполагается детально рассмотреть в продолжении данной работы.

Благодарим за весьма полезные дискуссии и замечания Д.В. Чаликова, В.И. Маслова и М.В. Исакова.

Заключение

Целью настоящей работы было обсуждение аномальных волн (АВ) большой высоты, представляющих опасность для морских судов и платформ по добыче газа и нефти. Характеристики АВ, известные из публикаций физического плана, обсуждаются с позиций обнаружения АВ стандартными судовыми навигационными радиолокаторами. Известная в литературе классификация АВ (одиночные АВ, «три сестры», белая стена) дополнена учетом АВ с треугольным гребнем. При радиолокационном наблюдении АВ играет роль только часть АВ, возвышающаяся над волнами значительной высоты. С учетом этого предложены формы АВ, которые должны учитываться

при определении основного радиолокационного параметра АВ – ЭПР. Обсуждены также временные параметры АВ. В качестве критерия обнаружения АВ предложено сравнение времени существования АВ с временем определенного числа оборотов антенны РЛС, в течение которого фиксируется АВ на экране РЛС. Оценены возможности обнаружения АВ по известным сведениям о времени существования АВ. Исследования будут продолжены с целью более детального изучения условий обнаружения АВ современными навигационными радиолокаторами.

Литература

1. Винокуров В.И. *Морская радиолокация*. Ленинград, Судостроение. 1986. 256 с.
2. Чаликов Д.В. О природе экстремальных волн в океане. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2020. Т.13. №4. С.5-18. <https://doi.org/10.7868/S2073667320040012>
3. Бухановский А.В., Лопатухин Л.И. Экстремальные и необычные ветровые волны: измерения, расчет, прогноз. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2011. Т.4. №4. С.5-17.
4. Захаров В.Е. Устойчивость периодических волн конечной амплитуды на поверхности глубокой жидкости. *Прикладная механика и техническая физика*. 1968. №2. С.85-94.
5. Zakharov V.E., Dyachenko A.I. About shape of giant breather. *European Journal of Mechanics B/Fluids*. 2010. V.29. №2. P.127-131. <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2009.10.003>
6. Захаров В.Е., Дьяченко А.И. Вычислительные эксперименты и волны-убийцы. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2012. Т.5. №1. С.64-76.
7. Чаликов Д.В., Булгаков К.Ю. Волны Стокса на конечной глубине. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*, 2014. Т.7. №4. С.3-15.

8. Пелиновский Е.Н., Слюняев А.В. Волны-убийцы. *Физика*. 2006. №2. С.29-36.
9. Didenkulova E. Catalogue of rogue waves occurred in the World Ocean from 2011 to 2018 reported by mass media sources. *Ocean & Coastal Management*. 2020. V.188. №1. P.105076. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.105076>
10. Слюняев А.В., Пелиновский Е.Н. Волны-убийцы: мифы и реальность. *Природа*. 2021. №10. С.10-25. <https://doi.org/10.7868/S0032874X21100021>
11. Kharif C., Pelinovsky E., Slunyaev A. *Rogue Waves in the Ocean*. Springer. 2009. 216 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88419-4>
12. Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. *Волны-убийцы: факты, теория и моделирование*. Изд. 2. Москва-Берлин, Директ Медиа. 2016. 178 с.
13. Chalikov D.V. *Numerical Modelling of Sea Waves*. Switzerland, Springer International Publishing. 2016. 330 p. <https://doi.org/10.1134/S0001433820030032>
14. Rosenthal W., Lehner S. Results of the MAXWAVE project. *Proc. 14th Aha Huliko 'a Winter Workshop, Honolulu, Hawaii*. 2005.
15. Lehner S., Gunther H. Extreme wave statistics from radar data sets. *2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2004. V.3. P.1880-1883. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2004.1370707>
16. Чаликов Д.В. Портрет волны-убийцы. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2012. Т.5. №1. С.5-18.
17. *Правила по оборудованию морских судов. Часть 5. Навигационное оборудование*. Санкт-Петербург, ФАУ «Российский морской регистр судоходства». 2021. 269 с.
18. Will Cousins, Themistoklis P. Sapsis. Quantification and prediction of extreme events in a one-dimensional nonlinear dispersive wave model. *Physika D*. 2014. V.280-281. P.48-58. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2014.04.012>
19. Шургалина Е.Г., Пелиновский Е.Н. Проявление аномально больших волн зыби на фоне слабого ветрового волнения. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2012. Т.5. №1. С.77-88.

20. Додд Р., Эйлбек Дж., Гиббон Дж., Моррис Х. *Солитоны и нелинейные волновые уравнения*. Москва, МИР. 1988. 694 с.
21. Юдин А.В. Типичные картины геометрии волн-убийц в вычислительных экспериментах. *Вестник РУДН. Серия Математика. Информатика. Физика*. 2013. №4. С.181-189.
22. Stokes G.G. Supplement to a paper on the theory of oscillatory waves. *Mathematical and Physical Papers*. 1880. V.1. P.314-326.
23. Крейг В., Вейн К.Е. Математические аспекты поверхностных волн на воде. *Успехи математических наук*. 2007. Т.62. №3(375). С.95-116. <https://doi.org/10.1070/RM2007v062n03ABEH004413>
24. Amick C.J., Fraenkel L.E., Toland J.F. On the Stokes conjecture for the wave of extreme form. *Acta Math*. 1982. V.148. №1. P.193-214. <https://doi.org/10.1007/BF02392728>
25. Шелковников Н.К. Солитонная версия формирования волн-убийц в океане. *Морской гидрофизический журн*. 2012. №5. С.34-42.
26. Маслов В.И. Исследование генерирования волны-убийцы в мореходном бассейне. *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2019. №2. С.91-98. <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2019-2-S-I-91-98>
27. Clauss G. Dramas of the sea: episodic waves and their impact on offshore structures. *Applied Ocean Research*. 2002. V.24. P.147-161.
28. *Альбом планшетов стереофотограмметрической съемки волн. Антарктида*. Ленинград, Гидрометеиздат. 1960. 48 с.

Для цитирования:

Пермяков В.А., Баскаков А.И., Пермяков С.В., Фирсов Н.А. Проблема обнаружения аномальных волн на воде навигационными радиолокаторами 1. Модели аномальных волн. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.11.12>