



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.1.8>

УДК: 621.396.969; 551.466.2

ПРОБЛЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ ВОЛН НА ВОДЕ НАВИГАЦИОННЫМИ РАДИОЛОКАТОРАМИ.

2. РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИИ

Пермяков В.А., Баскаков А.И., Михайлов М.С., Пермяков С.В.

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

Статья поступила в редакцию 15 ноября 2023 г.

Аннотация. Вторая часть работы по проблеме радиолокации аномальных волн. Рассмотрены простые варианты эффективного поперечника аномальных волн в приближении геометрической оптики для двух видов целей: одиночной волны и белой стены. Уравнение радиолокации для дальности действия радиолокаторов по таким целям решено с учетом влияния значительной высоты волн на поперечник рассеяния аномальных волн и помехи вследствие рассеяния электромагнитных волн на морском волнении. Сформулированы условия на время существования и высоту аномальных волн, необходимые для наблюдения этих волн стандартными судовыми радиолокаторами.

Ключевые слова: эффективные поперечники рассеяния аномальных волн, приближение геометрической оптики, уравнение радиолокации, учет влияния морского волнения, судовой навигационный радиолокатор.

Автор для переписки: Михайлов Михаил Сергеевич, mikhailovms@mpei.ru

Введение

Проблема обнаружения, наблюдения, выяснения физических причин возникновения аномально высоких морских волн (АВ) изучается специалистами в области физики свыше 50 лет. Достигнуто значительное понимание процессов возникновения и развития АВ и их пространственно-временных характеристик. Развита методика экспериментального исследования АВ (морские буи, волновые бассейны, лазерные измерители, радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА)) и методы теоретического анализа АВ [1].

Мало исследованным остается до настоящего времени вопрос наблюдения АВ с помощью судовых навигационных радиолокаторов (СНР), являющихся стандартным оснащением морских судов [1]. Нас интересует не столько физический, сколько прикладной аспект реализации наблюдений АВ СНР. Дело в том, что по мере роста физических исследований АВ естественно возник вопрос, что эти исследования могут дать судоводителям для обнаружения потенциально опасных АВ и предупреждения катастроф. При этом сформировались две альтернативных точки зрения.

Первая точка зрения, высказанная специалистами–гидрофизиками [2], заключается в том, что судоводителям следует выдавать статистический прогноз областей океанов и морей, в которых возможно возникновение АВ, подобный прогнозу погоды. Аргументом этой точки зрения является тот факт, что длительность большинства АВ по визуальным наблюдениям очень невелика, значительно меньше, чем период волны (мнение профессора, д.ф.-м.н. Д. В. Чаликова (филиал ИО РАН, СПб)). На появление таких кратковременных АВ судоводитель отреагировать не сможет. Это, безусловно, серьезный аргумент, согласующийся с полученной в [1] оценкой времени наблюдения целей стандартными СНР. Согласно требованиям морского регистра, наблюдение целей СНР должно обеспечиваться в течение 8-ми оборотов антенны из 10-ти [3]. При 20-ти оборотах антенны в минуту это время равно 24 с, при 30-ти оборотах – 16 с. Соответственно при меньшем времени существования

АВ она может не наблюдаться стандартными СНР. Здесь мы различаем длительность АВ, как время, за которое АВ проходит мимо неподвижного буя, и время существования АВ, как время, в течение которого высота АВ H_{AW} удовлетворяет условию $H_{AW} > 2,2H_S$, где H_S – значительная высота волн. Сравнение этих времен позволяет разделить АВ на две группы: группу, в которой длительность и время существования АВ соизмеримы и группу, в которой время существования значительно больше длительности АВ.

Вторая точка зрения заключается в том, что следует искать пути наблюдения АВ стандартными или модифицированными СНР. Мы являемся сторонниками этой позиции. В ее обоснование укажем, что радиолокационные методы с использованием РСА и СНР могут существенно дополнить и облегчить набор статистических данных по АВ. Кроме того, они позволят наблюдать длительно существующие АВ, в том числе в ночное время. Необходимые для этого вспомогательные навигационные системы, которые работают совместно с СНР, уже созданы. Имеются в виду системы WaMoS II (ФРГ, 1991-1995 гг.) и SeeVision (РФ, 2022 г.). Однако вопрос обнаружения коротких АВ этими системами, насколько нам известно, не обсуждался и в данной статье также не рассматривается.

Система WaMoS II (см. ключевые публикации [4-6]) первоначально использовалась для определения значительной высоты волн. Алгоритм и методика применения системы WaMoS II к определению характеристик АВ изложены в [4-6]. Требования к локатору для установки системы WaMoS II: X диапазон, число оборотов антенны 32 об./мин., длительность импульса 80 нс, длина антенны 2,5 м.

Экспериментальным исследованиям АВ была посвящена специальная программа европейских стран MaxWave Project, выполнявшаяся в 2000-2005 гг. В публикациях итогов программы MaxWave Project основное внимание было уделено результатам, полученным с помощью РСА. Опубликованные результаты измерений АВ с помощью СНР относились к случаям измерений АВ с острова Гельголанд [7-9] и с нефтяной платформы Экофиск [7-9]

в Северном море стационарно установленными СНР на берегу и платформе. Хотя из публикации [9] следует, что измерения АВ проводились непосредственно с судна the Northern Pioneer, нам не удалось найти данных об этих измерениях, за исключением приведенных в [9]. Продолжением этой программы стала программа Maxwave Ocean [9] цель которой – использование данных РСА для построения карты мирового океана с указанием областей с наиболее вероятными условиями возникновения АВ. Для этой цели могут быть использованы и данные СНР.

Имеются данные о судовых измерениях АВ СНР после программы Maxwave Project [10, 11].

В России в последние годы по гранту РФФИ разработана система SeaVision [12], опробованная на СНР в морских экспедициях 2020-2021 годов, результаты которых изложены в [13]. Предполагается практическая доработка системы SeaVision для применения на судах морского флота.

Задача данной статьи – разобраться в возможностях обнаружения и наблюдения АВ СНР на основе классических уравнений радиолокации, модифицированных на случай наблюдения АВ, без применения навигационных систем типа WaMoS II и SeaVision. Пространственно-временные характеристики АВ с этой точки зрения были рассмотрены в [1], где был дан сжатый обзор публикаций физического плана по этой теме. В настоящей работе в продолжение [1] рассматриваются два вопроса. 1) Определение эффективного поперечника рассеяния (ЭПР) простых моделей АВ. 2) Решение уравнения радиолокации для дальности действия РЛС с учетом влияния значительной высоты волн на ЭПР АВ и помехи радиолокатору от рассеяния электромагнитных волн взволнованной морской поверхностью.

1. ЭПР простых моделей АВ

Стартовав от широко используемой классификации АВ [7], а именно: 1) одиночные волны – башни (солитоны), 2) «три сестры» (две, три и более АВ, следующих друг за другом), 3) «белая стена», в [1] был предложен набор форм

двумерных моделей АВ, которые учитывают специфику работы радиолокатора. А именно учитывается только рассеяние электромагнитных волн на выступающей части АВ над значительной высотой волн, рассеянием на остальной части АВ пренебрегается. Также обращается внимание на то, что во многих случаях гребень АВ становится треугольным, что приводит к специфическим трудностям при электродинамическом анализе рассеяния электромагнитных волн на такой цели. Среди публикаций по рассеянию электромагнитных волн морскими волнами в этой связи следует отметить работу [14], в которой рассмотрена модель морской волны с треугольным гребнем и получены формулы для рассеянного электромагнитного поля такой волны в приближении геометрической теории дифракции. Однако дифракционные коэффициенты для данной модели морской волны не приведены. Это неудивительно, так как эталонной задачей для определения дифракционных коэффициентов является задача дифракции плоской волны на однородном диэлектрическом клине. Строгое аналитическое решение данной задачи появилось сравнительно недавно, но пока не доведено до инженерных приложений [15, 16]. Имеется также возможность численного решения данной задачи дифракции методом поверхностных интегральных уравнений [17, 18], но и она требует проведения дополнительной работы. Поэтому в этой статье мы сочли возможным ограничиться использованием достаточно грубых моделей АВ для определения эффективного поперечника (ЭПР) АВ.

Далее рассмотрим две модели АВ.

Первая – простейшая модель одиночной АВ, которую будем рассматривать, как выпуклое тело двойной кривизны с диэлектрической проницаемостью морской воды. ЭПР такого тела в приближении геометрической оптики может быть представлен в форме произведения ЭПР идеально проводящего тела на энергетический коэффициент отражения плоской электромагнитной волны от плоского слоя морской воды. В том случае, когда глубина проникновения электромагнитной волны в воду значительно меньше толщины АВ, коэффициент отражения электромагнитной волны может

быть определен для полупространства. В итоге ЭПР такой АВ определяется формулой:

$$\sigma = 0,785bH \cdot |\Gamma|^2 = qH, \quad (1)$$

где H – вертикальный диаметр (высота гребня относительно значительной высоты) АВ, b – горизонтальный диаметр (ширина) АВ, Γ – коэффициент отражения по полю плоской электромагнитной волны от слоя морской воды, $q = 0,785b \cdot |\Gamma|^2$. Первый сомножитель в (1) $0,785bH$ – ЭПР идеально проводящего выпуклого тела двойной кривизны в приближении геометрической оптики [19], второй – энергетический коэффициент отражения электромагнитной волны от слоя морской воды. В качестве второй модели АВ рассмотрим белую стену. В этом случае возможно электродинамическое представление АВ в виде вытянутого по горизонтали тела двойной кривизны, горизонтальный размер которого больше, чем ширина части АВ, облучаемой диаграммой направленности антенны РЛС в азимутальной плоскости b' , т.е.:

$$b \gg b' = 3,14r\alpha/180^\circ. \quad (2)$$

Здесь r – расстояние от локатора до цели, α – ширина главного лепестка диаграммы направленности антенны в азимутальной плоскости в градусах. В этом случае размер b в формуле (1) следует заменить величиной b' .

Предложенные модели ЭПР АВ являются максимально простыми и могут быть усовершенствованы различным образом. Вопрос уточнения электродинамических моделей АВ оставим на будущее.

2. Дальность действия радиолокатора по цели типа одиночной АВ

Для определения дальности действия навигационного локатора по цели типа одиночной АВ используем методику, изложенную в [20]. Методика [20] учитывает распространение радиоволн в приближении плоской земли (сферичность земли учтена только в окрестности радиогоризонта), влияние на дальность работы РЛС помехи вследствие обратного отражения радиоволн от

взволнованной поверхности моря, потери в чистой атмосфере и в осадках. Из перечисленных факторов для нас наиболее важен учет влияния взволнованной морской поверхности.

Учет рассеяния на морской поверхности проводится с помощью формулы дальности радиолокации (10.9) в [20], справедливой при малых углах места и упрощенной пренебрежением потерями в чистом воздухе и в осадках:

$$AH = r^4 + B\sigma_{\text{уд.м}}r, \quad (3)$$

$$A = \frac{P_{\text{и}}G^2\lambda^2}{(4\pi)^3 m_1 P_{\text{ш}}} q, \quad B = \frac{P_{\text{и}}G^2\lambda^2 l_{\text{и}} \theta_{\Gamma}}{128\pi^2 P_{\text{ш}}} \quad (4)$$

В (3), (4) $P_{\text{и}}$ – мощность излучения, $P_{\text{ш}}$ – мощность шума на входе СВЧ приемника, коэффициент m_1 определяется из графика (10.1) на стр. 171 в [20]. При условии вероятности правильного обнаружения 90% и ложной тревоги 10^{-4} для приема одиночного импульса $m_1 = 12$. G – коэффициент усиления антенны, λ – длина электромагнитной волны, r – дальность действия РЛС, $l_{\text{и}}$ – длина импульса РЛС, м, θ_{Γ} – угловой размер диаграммы направленности антенны по половинной мощности $f(\theta)$ в горизонтальной плоскости, $\sigma_{\text{уд.м}}$ – удельная ЭПР морской поверхности. Все линейные размеры в (3,4) выражаются в метрах.

Будем использовать при оценках характеристики навигационного радара японского производства JMA 5110 [21]. Длительность импульса $t_{\text{и}}$ согласно [21] может принимать значения 0,08; 0,25; 0,5; 1,0 мкс. Частота 9410 МГц, длина ЭМ волны 3,185 см, поляризация горизонтальная. Частота вращения антенны 24 оборота в минуту. Мощность излучения 10 кВт. Характеристики антенны: прямоугольный раскрыв с шириной диаграммы направленности по половинной мощности в горизонтальной плоскости $1,2^\circ$ и в вертикальной плоскости 20° [21]. В предположении равномерного распределения амплитуды и фазы поля в раскрыве и в пренебрежении потерями в антенне коэффициенте усиления антенны равен $G = 1351$.

Влияние взволнованной морской поверхности в (3) проявляется двойко. Во-первых, высота АВ, как радиолокационной цели, зависит от значительной высоты волн, так как рассеивает к локатору электромагнитную волну та часть АВ, которая выше значительной высоты волн: $H = H_+ - H_s$, где H_+ – высота гребня (положительной части АВ относительно среднего уровня моря), H_s – значительная высота волн. Это обстоятельство учитывается левой частью уравнения (3) через функцию H . Здесь следует указать, что H_s статистическая характеристика морских волн, а потому переменную H имеет смысл использовать только при условии

$$H = H_+ - H_s > \beta H_s, \tag{5}$$

где β – эмпирическая величина, которую примем равной 1,2, что согласуется с оценкой [22].

Во-вторых, отраженное к локатору взволнованной поверхностью электромагнитное поле создает помеху на входе приемника РЛС. Этот фактор введен в уравнение (3) вторым слагаемым в правой части уравнения, где учтено рассеяние электромагнитных волн на морских волнах множителем удельной ЭПР (УЭПР) взволнованного моря $\sigma_{уд.м.}$.

Сведем исходные данные для расчета дальности действия в таблицу.

Таблица 1. Характеристики РЛС, принятые при расчете.

$\lambda, см$	m_1	$\sigma, м^2$	G	$P_{ш}, Вт$	$P_a, кВт$	$f(\theta)$	$l_n, м$
3,185	12	переменная	1351	параметр	10	1	параметр

Далее предполагается, что максимум диаграммы направленности антенны всегда направлен непосредственно на цель, так что его значение равно 1. КПД антенны полагается равным 1. Высота антенны принята $h_a = 15$ м.

При дальнейших расчетах будем учитывать связь степени волнения моря в баллах со значительной высотой волн, приведенную в табл. 2 [3].

Таблица. 2. Значительная высота волн H_s при различных баллах волнения моря.

Степень волнения, баллы	1	2	3	4	5	6	7	8	9
H_s , м	0-0,25	0,25-0,75	0,75-1,25	1,25-2	2-3,5	3,5-6	6-8,5	8,5-11	11≤

Значения УЭПР морского волнения $\sigma_{уд.м.}$ в дБ при различной балльности моря и направлении линии локации на цель под углом 75° относительно вертикали берем из [20] (стр. 122, табл. 7.2, 7.3). Эти значения УЭПР пересчитываются в УЭПР для горизонтальной поляризации по формуле [20]:

$$\sigma_{уд.м.} = \sigma_{75}^{ГВ} + 10 \lg(h_a/r) + 5.84 \text{ дБ}, \quad (6)$$

справедливой при $h_a/r \ll 1$, что выполняется при $r > 50$ м. Результаты расчета искомой величины $r(H)$ приведены на рис. 1 при различных волнениях моря (0, 2, 4, 8 баллов). При этом коэф. q в формуле для A в (4) рассчитывался при энергетическом коэф. отражения для полупространства морской воды, равном 0,64 на частоте работы РЛС.

Из сопоставления рис. 1а)-1г) следует, что при достаточно больших высотах АВ графики дальностей практически не зависят от величины морского волнения.

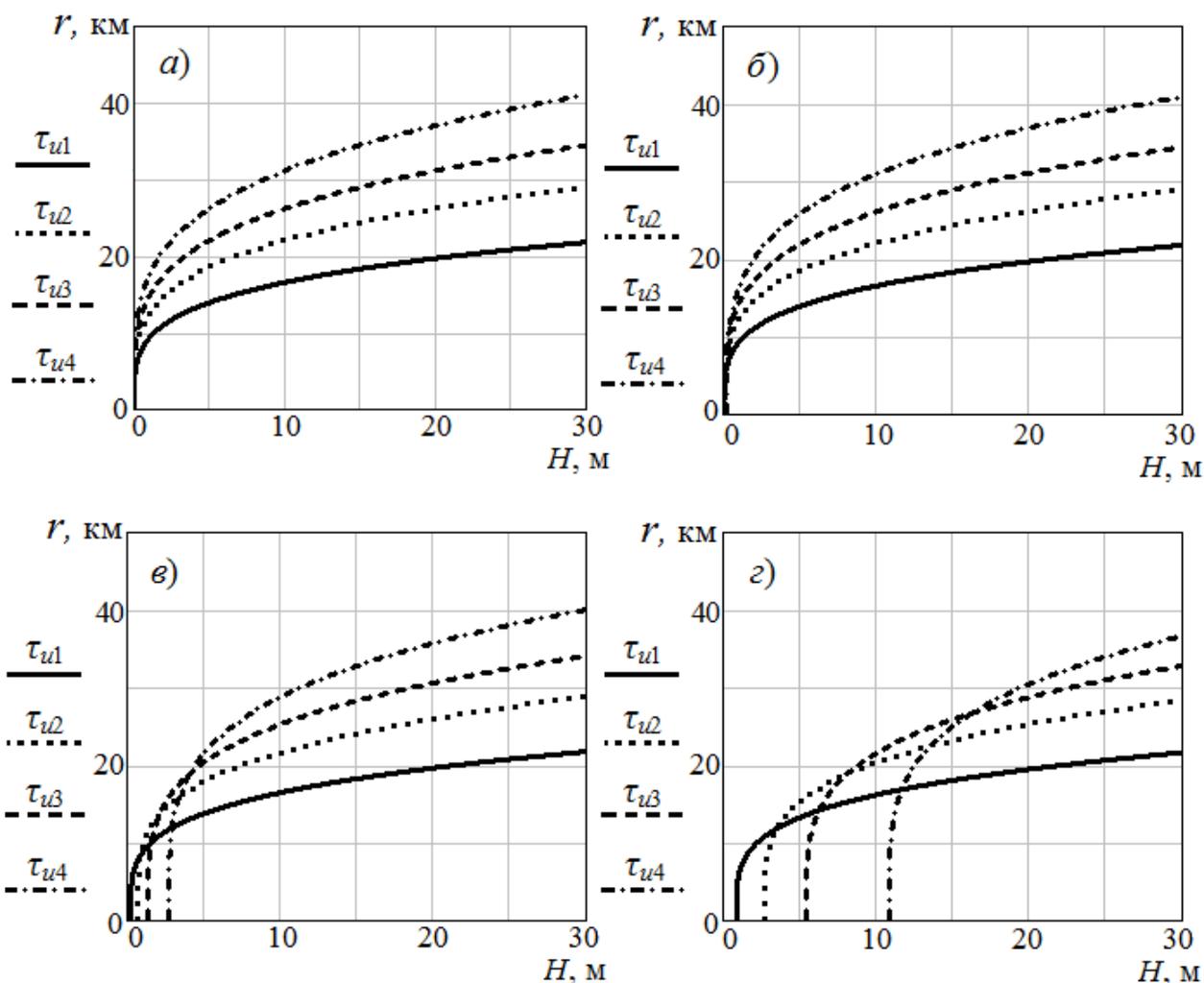


Рис. 1. Дальность действия РЛС как функция высоты АВ над значительной высотой волн.

Ширина АВ 1 м. а) штиль, б) волнение 2 балла, в) волнение 4 балла, г) волнение 8 баллов.

Длительности СВЧ импульса $\tau_{u1} = 0,08$ мкс, $\tau_{u2} = 0,25$ мкс, $\tau_{u3} = 0,5$ мкс, $\tau_{u4} = 1,0$ мкс.

Морское волнение проявляется только при приближении к локатору, когда, вследствие уменьшения высоты обнаруживаемых АВ и соответственно ЭПР АВ, начинает влиять помеха, вызванная отражением ЭМ поля от взволнованной морской поверхности.

Особенно сильно сказывается морское волнение при балльности 4 и выше, когда графики дальности качественно меняются в области относительно малых дальностей. Отметим, что все расчеты на рис. 1 и последующих рисунках справедливы вне мертвой зоны локатора. Согласно морскому регистру размер мертвой зоны меняется в пределах от 50 м для маломерных судов до 500 м для

судов больших размеров [3]. Кроме того, в случае малых H необходимо вводить поправку по формуле (5).

Аналогичная ситуация имеет место и при ширине АВ 10 м (рис. 2) с той разницей, что вследствие увеличения ЭПР АВ при этой ширине АВ по сравнению с рис. 1 графики дальности оказываются смещенными влево и заметное влияние морского волнения проявляется только при 8 баллах и расстояниях менее 20 км (рис. 2б).

Тот факт, что влияние морского волнения возрастает при движении цели к РЛС, хорошо известен. Он проявляется в увеличении засветки экрана, если не принимать мер подавления сигнала, отраженного от морской поверхности. Расчеты дальности обнаружения цели, приведенные на рисунках, в случае нормальной тропосферы справедливы до дальности, определяемой формулой [23]:

$$r_0 = 4.15 \left(\sqrt{h_a} + \sqrt{H_{AW}} \right) \text{ км}, \quad (7)$$

где h – высота подъема антенны РЛС, м, H_{AW} – высота АВ, превышающая значительную высоту волн, в м. Так, для высоты подъема антенны 15 м и такой же высоты H_{AW} АВ $r_0 = 32$ км. При этом на расстояниях свыше $0,2 r_0$ следует, строго говоря, учитывать кривизну земной поверхности и замену высот h_a и H_{AW} приведенными высотами [23], а также влияние морского волнения на коэф. отражения электромагнитного поля от морской поверхности [24-26].

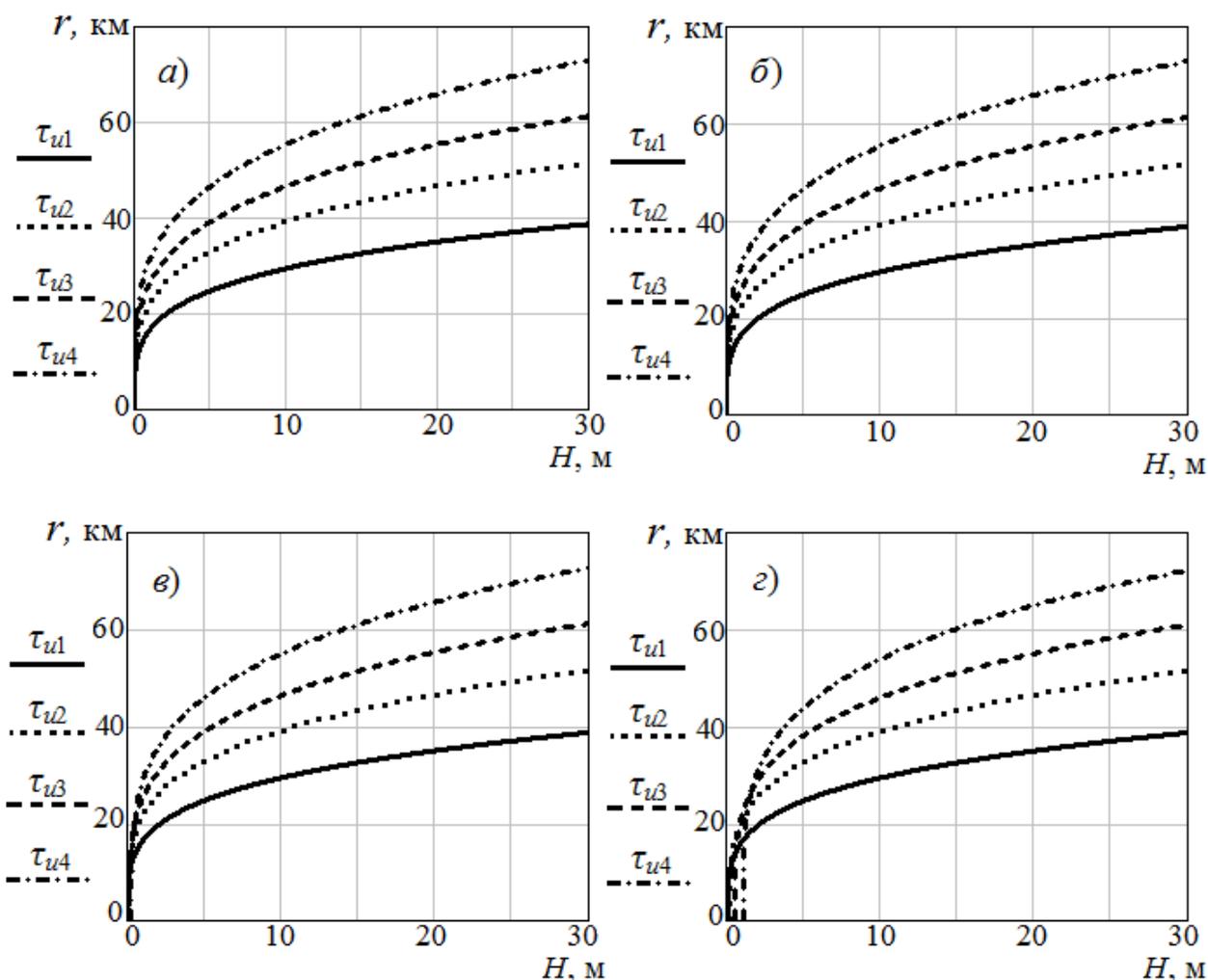


Рис. 2. Дальность действия РЛС как функция высоты АВ над значительной высотой волн.

Ширина АВ 10 м. а) штиль, б) волнение 2 балла, в) волнение 4 балла, г) волнение 8 баллов.

Длительности СВЧ импульса $\tau_{и1} = 0,08$ мкс, $\tau_{и2} = 0,25$ мкс, $\tau_{и3} = 0,5$ мкс, $\tau_{и4} = 1,0$ мкс.

Заметим, что ограничение, налагаемое формулой (7), снимается в случае критической рефракции, когда справедлива модель «эквивалентной» плоской Земли.

3. Дальность действия навигационного лоатора по цели – белая стена.

Основное отличие от предыдущего случая в том, что ширина отражающей поверхности белой стены b' , входящая в правую часть формулы (2), зависит от расстояния. С ростом расстояния увеличивается пропорционально ширина b' и ЭПР АВ. Заменяя далее ширину АВ в формуле ЭПР на величину b' из (2) и

подставив в (4), после непринципиальных упрощений получим в явном виде зависимость $r(H)$ для цели белая стена:

$$r^3 = A_1 H - B \sigma_{\text{уд.м.}}, \text{ где } A_1 = 0,25\pi |\Gamma|^2 \theta_r A, \quad (8)$$

где значения коэффициентов A и B определены в (4), причем множитель в A равен 0,64 на частоте 3,2 ГГц при типичных параметрах морской воды.

Результаты расчетов дальности действия РЛС по цели типа АВ – белая стена приведены на рис. 3 для излучаемой мощности 10 кВт и волнении 4 балла.

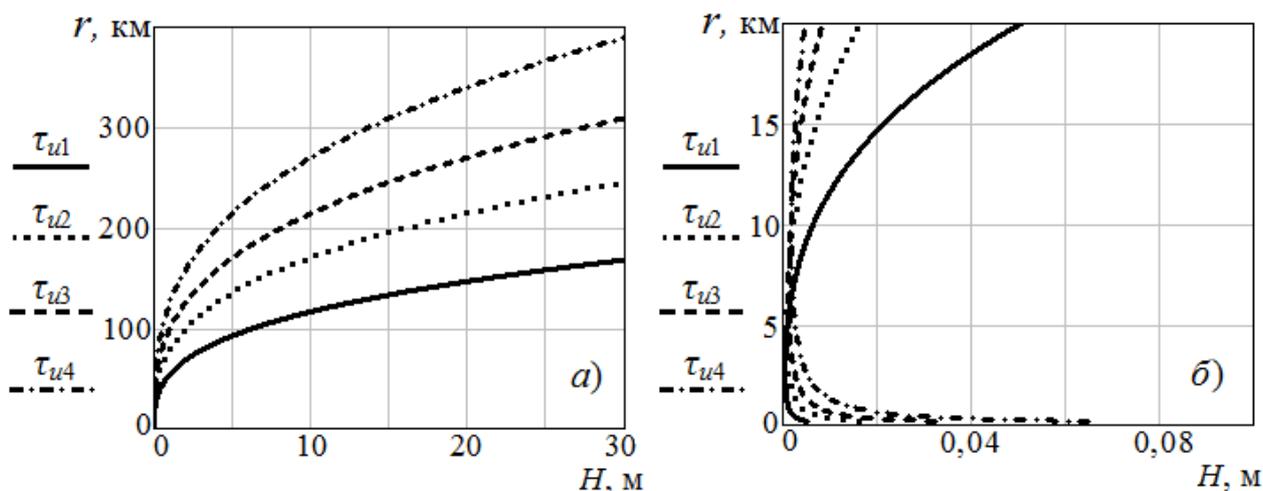


Рис. 3. Дальность действия РЛС как функция высоты АВ над значительной высотой волн. АВ типа «белая стена».

а) волнение 4 балла, большие дальности; б) то же волнение, на меньших дальностях. Длительности СВЧ импульса $\tau_{u1} = 0,08$ мкс, $\tau_{u2} = 0,25$ мкс, $\tau_{u3} = 0,5$ мкс, $\tau_{u4} = 1,0$ мкс.

Полученная оценка обнаружения АВ на малых дальностях (правый рис. 3) должна быть скорректирована в соответствии с требованием (5), так как флуктуации значительной высоты волн могут превышать столь небольшие значения высоты АВ H_{AW} , как показанные на рис. 3 при $r \ll 5$ км.

4. Влияние мощности излучения на дальность обнаружения АВ

На рис. 4-7 ниже приведены результаты расчета дальности обнаружения АВ при разных мощностях излучения антенны.

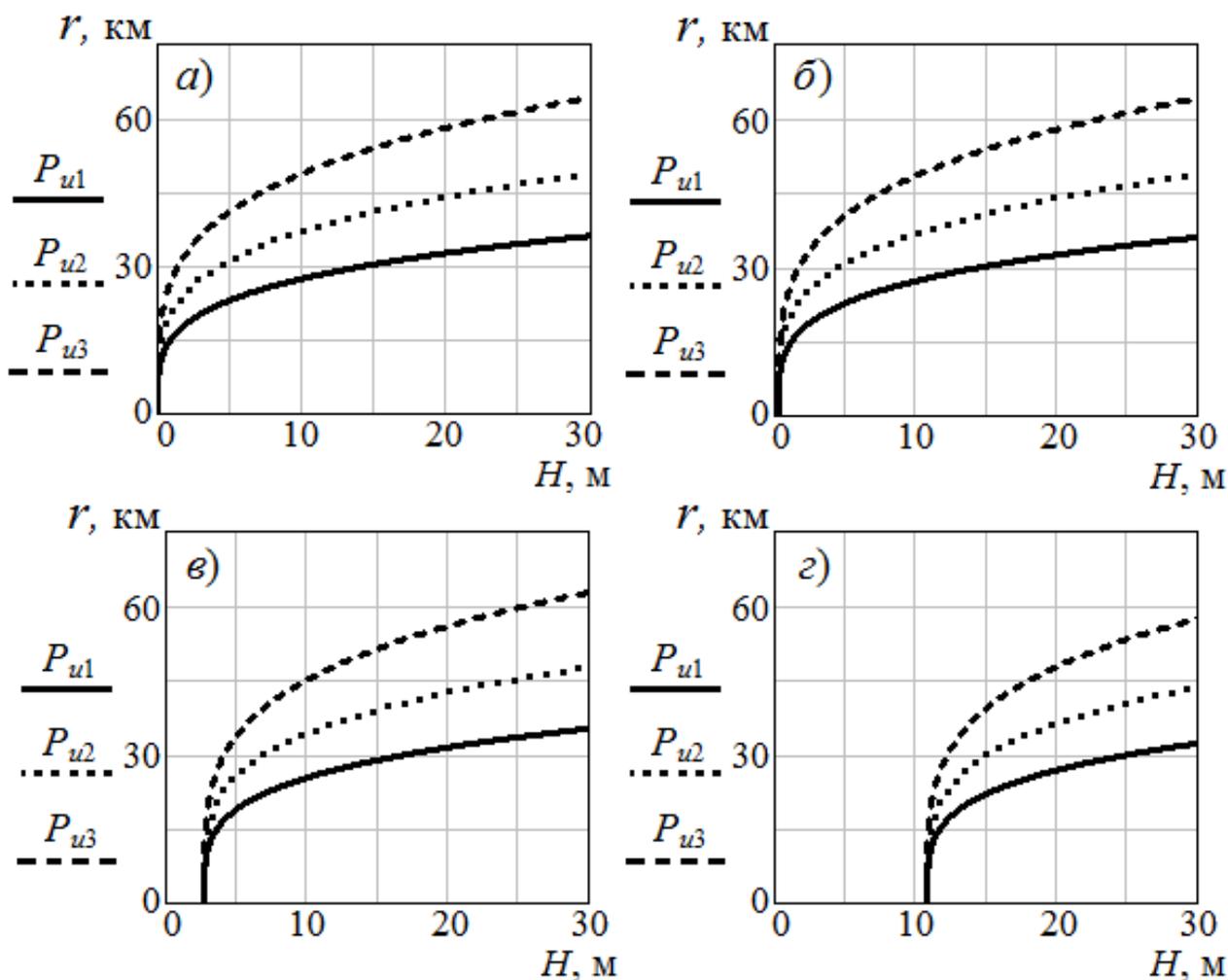


Рис. 4. Дальность действия РЛС как функция высоты АВ над значительной высотой волн. Ширина АВ 1 м. а) штиль, б) волнение 2 балла, в) волнение 4 балла, г) волнение 8 баллов. Длительность СВЧ импульса $\tau_{и} = 1,0$ мкс. Мощность излучения $P_{и1}=6$ кВт, $P_{и2}=20$ кВт, $P_{и3}=60$ кВт.

Результаты, приведенные на рис. 1-7, относятся к АВ, существующим достаточно длительное время (несколько десятков секунд и более), в течение которого выполняется сформулированное в [1] условие наблюдения АВ

$$T_{min} < T_{AW}, \tag{9}$$

где T_{min} – минимальное время числа оборотов антенны, требуемое для обнаружения АВ, T_{AW} – время существования АВ.

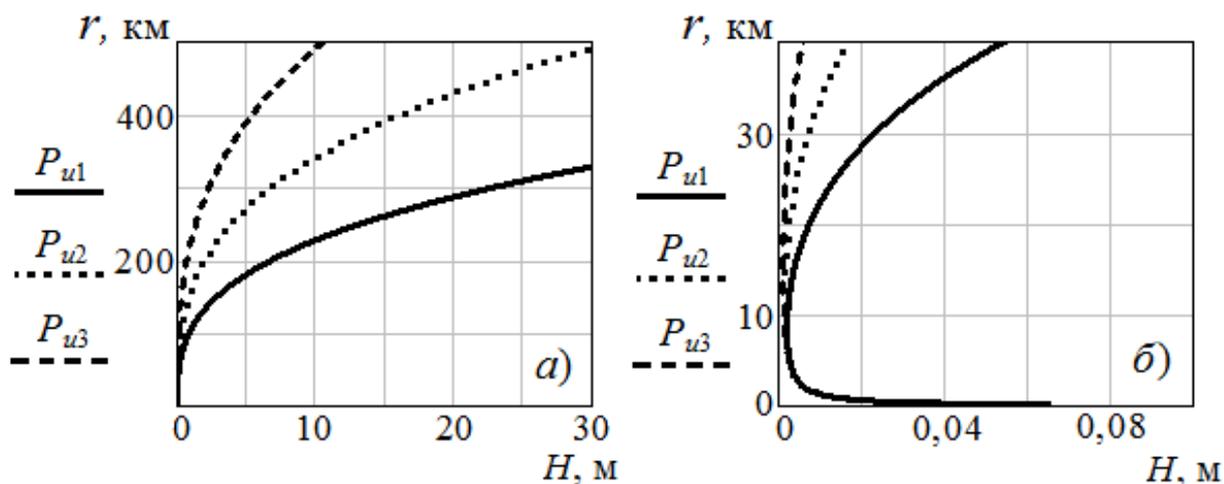


Рис. 5. Дальность действия РЛС как функция высоты АВ над значительной высотой волн. Белая стена, волнение 4 балла. Длительность СВЧ импульса $\tau_{и} = 1,0$ мкс. Мощность излучения $P_{и1}=6$ кВт, $P_{и2}=20$ кВт, $P_{и3}=60$ кВт
 а) область больших дальностей, б) область малых дальностей.

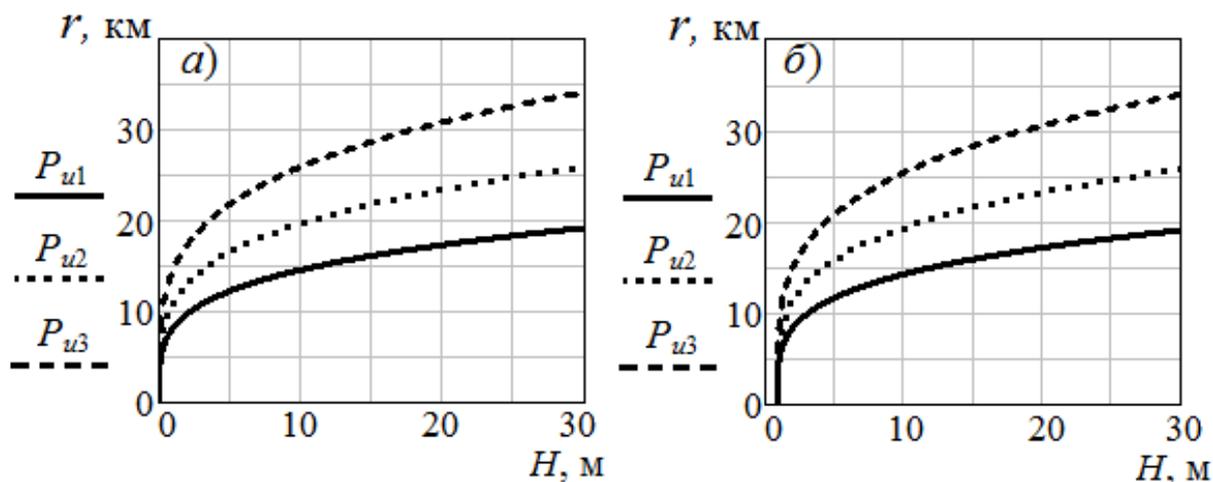


Рис. 6. Дальность действия РЛС как функция высоты АВ над значительной высотой волн. Ширина АВ 1 м. а) штиль, б) волнение 8 баллов. Длительность СВЧ импульса $\tau_{и} = 80$ нс. Мощность излучения $P_{и1} = 6$ кВт, $P_{и2} = 20$ кВт, $P_{и3} = 60$ кВт.

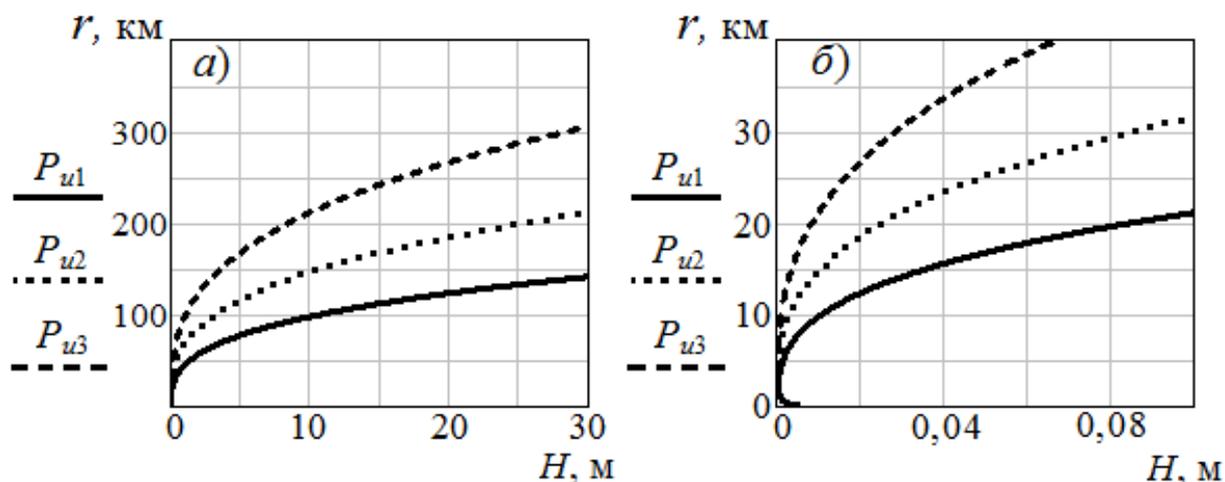


Рис. 7. Дальность действия РЛС как функция высоты АВ над значительной высотой волн.

Белая стена, волнение 4 балла. Длительность СВЧ импульса $\tau_{и} = 80$ нс.

Мощность излучения $P_{и1}=6$ кВт, $P_{и2}=20$ кВт, $P_{и3}=60$ кВт

а) область больших дальностей, б) область малых дальностей

Влияние мощности излучения и длительности импульса РЛС на дальность обнаружения АВ очевидно. С увеличением мощности излучения и длительности импульса энергия импульса и дальность обнаружения растут. При этом следует иметь в виду, что разрешение по дальности пропорционально длительности импульса, т.е. наилучшее при $\tau_{и} = 80$ нс.

Заключение

Радиолокационные наблюдения АВ представляют интерес для предупреждения экипажа судна или морской платформы о подходе АВ, а также для накопления статистических данных об АВ.

Важным выводом статьи является возможность наблюдения стандартными судовыми радиолокаторами АВ с высотой H_{AW} и временем существования T_{AW} , удовлетворяющим неравенствам (5) и (8) соответственно.

Результаты данной статьи могут быть полезны при наблюдении АВ СНР в реальных условиях и при изучении курсов радиолокации в ВУЗах.

В заключение перечислим вопросы, которые требуют дальнейшего изучения.

1) Построение моделей АВ и разработка методов расчета ЭПР АВ, близких к реальным АВ.

2) Анализ возможностей обнаружения кратковременно существующих АВ, для которых условие (8) не выполняется.

3) Учет рассеяния вперед импульса ЭМ поля на морской поверхности и возникающую при этом интерференцию прямо падающего на АВ поля ЭМ волны и рассеянного вперед поля морской поверхностью. Учет сферической кривизны морской поверхности. Учет гидрометеоров.

4) Анализ возможностей загоризонтного обнаружения АВ при волноводном распространении электромагнитных волн в тропосфере

5) Выработка рекомендаций судоводителям по наблюдению АВ СНР в реальных условиях

Рассмотрение указанных вопросов вкуче с возможной модернизацией СНР позволит вести накопление экспериментальных данных по наблюдению АВ средствами радиолокации, что наряду с использованием системы SeeVision позволит уменьшить число опасных встреч судов и платформ с АВ

Литература

1. 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>
2. Бухановский А. В., Лопатухин Л. И. Экстремальные и необычные ветровые волны: измерения, расчет, прогноз // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2022. – Т. 4. – №. 4. – С. 5-17.
3. Правила по оборудованию морских судов. Часть 5. Навигационное оборудование. Санкт–Петербург. ФАУ Российский морской регистр судоходства. Изд. 2021. 268 с.

4. Borge J.C. N., Reichert K., Dittmer J. Use of nautical radar as a wave monitoring instrument // Coastal Engineering. – 1999. – Т. 37. – №. 3-4. – С. 331-342., [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(99\)00032-0](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(99)00032-0)
5. Dankert H. Measurement of waves, wave groups and wind fields using nautical radar-image sequences: дис. – Staats-und Universitätsbibliothek Hamburg Carl von Ossietzky, 2003.
6. Dankert H., Rosenthal W. Ocean surface determination from X-band radar-image sequences // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2004. – Т. 109. – №. C4. <https://doi.org/10.1029/2003JC002130>
7. Rosenthal W. Results of the MAXWAVE Project. URL: <https://www.soest.hawaii.edu/PubServices/2005pdfs/Rosenthal.pdf>
8. Lehner S., Gunther H. Extreme wave statistics from radar data sets // IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – IEEE, 2004. – Т. 3. – С. 1880-1883. <http://doi.org/10.1109/IGARSS.2004.1370707>
9. Rosenthal, Wolfgang & Lehner, Susanne. (2008). Rogue Waves: Results of the MaxWave Project // Journal of Offshore Mechanics and Artic Engineering. 130. 21006-21013. <https://doi.org/10.1115/1.2918126>
10. Cifuentes-Lorenzen A. et al. A multisensor comparison of ocean wave frequency spectra from a research vessel during the Southern Ocean Gas Exchange Experiment // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. – 2013. – Т. 30. – №. 12. – С. 2907-2925. <https://doi.org/10.1029/2011JC007022>
11. Liu X. et al. Wave height estimation from shipborne X-band nautical radar images // Journal of Sensors. – 2016. – Т. 2016. <http://doi.org/10.1155/2016/-1078053>
12. Создана система мониторинга ветрового волнения в открытом океане // РФФ 20 сентября 2022. URL: <https://rscf.ru/news/presidential-program/sistema-monitoringa-volneniya-v-otkrytom-okeane/> (дата обращения: 08.11.2023)
13. Tilinina N. et al. Wind waves in the North Atlantic from ship navigational radar: SeaVision development and its validation with the Spotter wave buoy and WaveWatch III // Earth System Science Data. – 2022. – Т. 14. – №. 8. – С. 3615-3633. <http://doi.org/10.5194/essd-14-3615-2022>

14. Кравцов Ю.А., Митягина М.И., Чурюмов А.Н. Нерезонансный механизм рассеяния электромагнитных волн на морской поверхности: рассеяние на крутых заостренных волнах // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 1999. – Т. 42. – №. 3. – С. 240-254.
15. Daniele V., Lombardi G. The Wiener-Hopf solution of the isotropic penetrable wedge problem: diffraction and total field // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2011. – Т. 59. – №. 10. – С. 3797-3818. <http://doi.org/10.1109/TAP.2011.2163780>
16. Бабич В.М., Мокеева Н.В., Самокиш Б.А. Задача рассеяния плоской волны прозрачным клином. Вычислительный подход // Радиотехника и электроника. – 2012. – Т. 57. – №. 9. – С. 978-978.
17. Васильев Е.Н., Солодухов В.В. Дифракция электромагнитных волн на диэлектрическом клине // Известия ВУЗов, Радиофизика. – 1974. – Т. 17. – №. 10. – С. 1518-1528.
18. Комаров А.А., Пермяков В.А. Дифракция плоской электромагнитной волны на прямоугольном диэлектрическом клине. Анализ численных результатов // Журнал радиоэлектроники. – 2011. – №. 9. – С. 6-6.
19. Кобак В.О. Радиолокационные отражатели. – Советское радио, 1975.
20. Красюк Н.П., Коблов В.Л., Красюк В.Н. Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС. – РиС, 1988.
21. СУДОВАЯ РЛС Модель JMA-5104/5106/5110, URL: <https://4250107.ru/files/0001483-Брошюра%20JMA-5106.pdf>
22. Чаликов Д.В. О природе экстремальных волн в океане // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2020. – Т. 13. – №. 4. – С. 5-15. <http://doi.org/10.7868/S2073667320040012>
23. Пермяков В.А. и др. Распространение радиоволн: учеб. Пособие / Под ред. В.А. Пермякова, В.В. Солодухова. – 2006.
24. Керр Д.Е. Распространение ультракоротких радиоволн / Пер. с англ. под ред. БА Шиллерова // М.: Сов. радио. – 1954.

25. Сколник М., Трофимов К.Н. (ред.). Справочник по радиолокации: В 4-х т. – Сов. радио, 1976.
26. Кравченко В.Ф., Луценко В.И., Луценко И.В. Рассеяние радиоволн морем и обнаружение объектов на его фоне // М.: Физматлит. – 2015.

Для цитирования:

Пермяков В.А., Баскаков А.И., Михайлов М.С., Пермяков С.В. Проблема обнаружения аномальных волн на воде навигационными радиолокаторами. 2. Решение уравнения радиолокации. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.1.8>