

**Ф. В. Кивва, И. М. Мыценко, А. Н. Роечко**

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины*

*12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина*

E-mail: [rk@ire.kharkov.ua](mailto:rk@ire.kharkov.ua)

## ЗАГОРИЗОНТНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН И РАДИОЛОКАЦИОННОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ОБЪЕКТОВ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА

Дальность действия судовых навигационных радиолокационных станций (РЛС) в различных районах Мирового океана во многом определяется условиями распространения радиоволн в этих районах. Поэтому особую ценность приобретают экспериментальные данные, способствующие уточнению методик диагноза и прогноза величины множителя ослабления радиоволн. В работе представлены результаты экспериментальных исследований дистанционных зависимостей множителя ослабления радиоволн и дальности действия судовых навигационных РЛС в северо-западной части Тихого океана. Определение ослабления поля прямого и отраженного сигналов проводилось одновременно с метеорологическими исследованиями и изучением условий образования приводных волноводов и инверсионных слоев. Получены дистанционные зависимости множителя ослабления радиоволн, статистические функции распределения высот волноводов испарения, дальности действия судовых навигационных РЛС. Результаты исследований способствуют более глубокому пониманию процессов, протекающих в нижних слоях атмосферы над океаном и определяющих условия распространения радиоволн и дальность действия судовых навигационных РЛС в различных районах Мирового океана. Ил. 17. Библиогр.: 8 назв.

**Ключевые слова:** множитель ослабления, дальность действия, приводный волновод, инверсионный слой, статистическая функция распределения.

В настоящее время большой интерес представляют условия распространения радиоволн и радиолокационной наблюдаемости объектов в северо-западной части Тихого океана, что связано с географическим расположением этого района Мирового океана и интересами России, Китая, Японии, Южной Кореи и других стран.

Многообразие геофизических процессов над поверхностью Мирового океана и их влияние на условия распространения радиоволн требует создания методик диагноза и прогноза величины множителя ослабления радиоволн за пределами радиогоризонта, а в прикладных задачах – дальности действия радиотехнических систем.

Впервые карты вероятности увеличения дальности действия радиолокационных станций (РЛС) были представлены для волн длиной 3, 10 и 25 см на каждый месяц года в работе [1].

Позднее в работе [2] описана методика использования метеорологических данных для прогнозирования вероятности увеличения дальности действия РЛС в северо-западной части Тихого океана. Для этой цели использовались материалы «Климатического атласа океанов», составленного на основании данных многолетних метеорологических наблюдений.

На рис. 1 показаны ожидаемые вероятности увеличения дальности действия РЛС ( $\lambda = 3$  см) для зимы и лета, полученные расчетным путем с помощью методики [2]. Как видно из рис. 1, с окончанием лета вероятность увеличения дальности действия РЛС во всех районах возрастает.

С 1980 по 1991 гг. Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

проводил комплексные радиофизические исследования распространения радиоволн и радиолокационной наблюдаемости объектов в Охотском, Японском морях и районах северо-западной части Тихого океана [3] (рис. 2).

По разным причинам результаты этих исследований плохо освещены в научной печати. Целью данной работы является представление результатов экспериментальных исследований распространения радиоволн и радиолокационной наблюдаемости объектов в районах северо-западной части Тихого океана и их связи с метеорологическими условиями в различное время года.

**1. Методики определения дистанционных зависимостей множителя ослабления радиоволн и исследования радиолокационного наблюдения надводных объектов.** Для расчета линий связи, дальности действия РЛС и определения необходимых параметров аппаратуры необходимо знать величину ослабления поля при распространении волны на данной трассе. Функция ослабления определяется как выраженное в децибелах отношение средних уровней сигналов в реальной среде к уровням сигналов, которые были бы приняты в свободном пространстве на том же расстоянии [4]. Это отношение не зависит от характеристик приемно-передающей аппаратуры и определяется только условиями распространения электромагнитной энергии в реальной среде:

$$V = 10 \lg \frac{W}{W_0} = 10 \lg \frac{P}{P_0} = 20 \lg \frac{E}{E_0}, \quad (1)$$

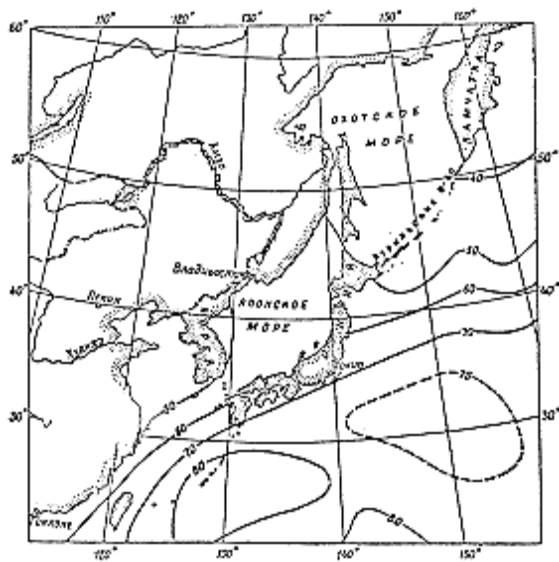
где  $W$ ,  $E$  и  $P$  – соответственно плотность потока электромагнитной энергии, напряженность электрического поля у приемной антенны и мощность,

поступающая в приемник при распространении электромагнитной энергии в реальной среде;  $W_0$ ,  $E_0$  и  $P_0$  – соответственно плотность потока электромагнитной энергии, напряженность электрического поля у приемной антенны и мощность, поступающая в приемник при распространении в свободном пространстве.

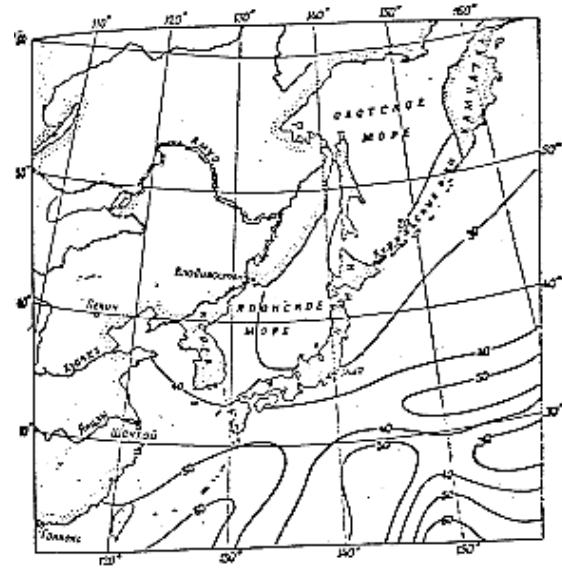
Как известно,

$$P_0 = \frac{P_{\text{изл}} G_1 G_2 \lambda^2}{(4\pi r)^2},$$

где  $G_1$  и  $G_2$  – коэффициенты усиления приемной и передающей антенн;  $\lambda$  – длина волны;  $r$  – расстояние.



а)



б)

Рис. 1. Ожидаемые вероятности увеличения дальности действия РЛС ( $\lambda = 3$  см) для зимы (а) и лета (б)

Дистанционная зависимость множителя ослабления радиоволн  $V(r)$  определялась с использованием двух судов, на одном из которых были установлены передатчики, а на другом – приемники. Измерения проводились на полупеременной трассе о. Шикотан – научно-исследовательское судно «Академик Александр Несмеянов» и стационарной трассе о. Сахалин – о. Шикотан (рис. 2).

Параллельно с исследованием поля прямого сигнала проводилось радиолокационное наблюдение надводных объектов. Особый интерес представляет распространение радиоволн сантиметрового диапазона, в котором работает большинство судовых навигационных РЛС. Для исследований использовались навигационные РЛС «Дон», «Наяда-5», «Океан-М». Всего было сопровождено около 6 000 судов.

Уровни отраженного сигнала определялись от судов с известной эффективной площадью рассеяния (ЭПР) и от случайных целей.

Метеорологические исследования заключались в проведении судовых гидрометеорологических измерений и расчете высоты волноводов испарения [5].

Кроме этого, через каждые три часа производился запуск шаров-зондов до высоты 5 км.

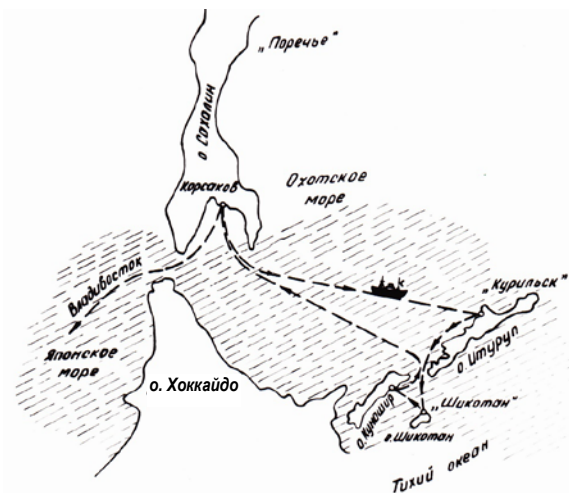


Рис. 2. Район проведения исследований

## 2. Результаты экспериментальных исследований и их связь с метеорологическими условиями в районах проведения исследований.

2.1. Исследование множителя ослабления радиоволн на стационарной трассе протяженностью 600 км ( $\lambda = 4,5$  см) о. Сахалин – о. Шикотан (рис. 2). Исследования показали, что

в зависимости от метеорологических условий величина множителя ослабления лежит в пределах 80...115 дБ. В период исследований (июль, август, сентябрь 1991 г.) величина множителя ослабления в 80 % сеансов лежала в пределах 100...115 дБ; 15 % – 90...100 дБ, и только 5 % – 80...90 дБ. При этом высота расположения передатчика (мыс Шпанберга) составляла ~45 м, а высота расположения приемного комплекса – 17,5 м над уровнем моря.

2.2. *Исследование распространения радиоволн на полупеременных трассах.* Исследования проводились в северо-западной части Тихого океана в процессе выполнения научно-исследовательским судном «Академик Александр Несмеянов» галсов на удаление и сближение с передающим комплексом, расположенным на о. Шикотан (мыс Шпанберга).

Проведено четыре галса (максимальная протяженность – 202 км) с 7 по 10 сентября 1989 г. Определение дистанционных зависимостей  $V(r)$  проводилось по методике, изложенной в [6]. Передающий комплекс располагался на высоте 45 м и излучал горизонтально поляризованный сигнал в фиксированном направлении (азимут  $90^\circ$ ). Приемник с рупорной антенной был установлен на ходовом мостике судна на высоте 18 м над уровнем моря. Это позволяло выполнять галсы как на сближение, так и на удаление. Уровень мощности принятого сигнала регистрировался самописцем. Расстояние до передатчика в зоне прямой видимости определялось с помощью РЛС «Океан-5М», а на больших расстояниях – по счислению. На рис. 3 показаны экспериментальные результаты записей уровней сигналов в зоне интерференции, а на рис. 4 – расчетная интерференционная картина. Из рисунков видно, что местоположения первого максимума совпадают и дают возможность осуществлять привязку [5].

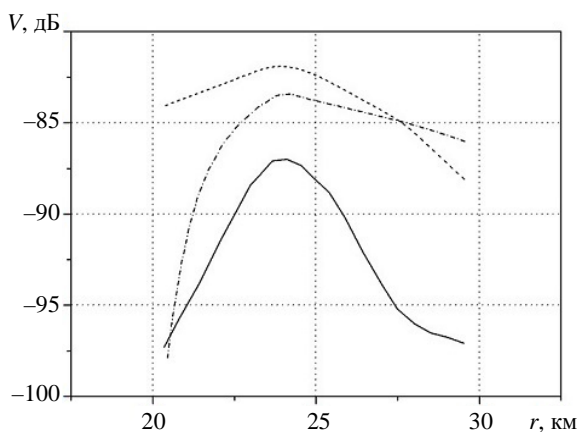


Рис. 3. Экспериментальные результаты записей уровней сигналов в зоне интерференции

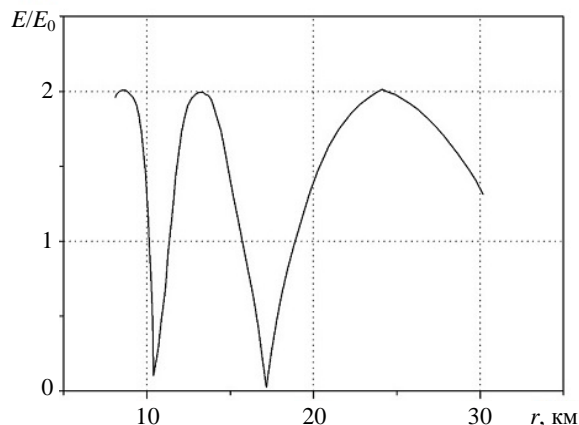


Рис. 4. Расчетная интерференционная картина

На рис. 5 представлены экспериментальные дистанционные зависимости множителя ослабления радиоволн для галсов 1–4 ( $\lambda = 4,5$  см). Максимальная дистанция равна 200 км, минимальная – 63 км. Протяженность галсов определялась не возможностями приемо-передающего комплекса (его энергопотенциалом), а насыщенностью научной программы судна.

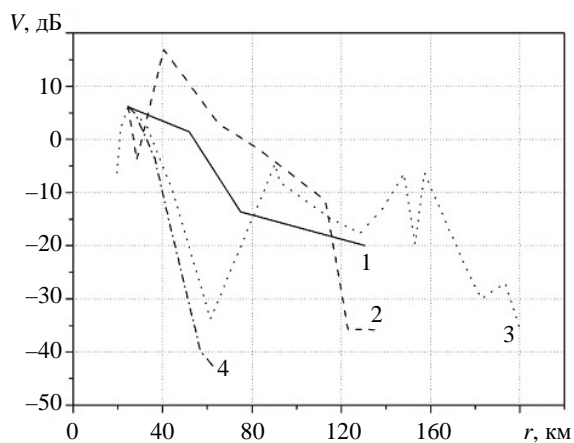


Рис. 5. Экспериментальные дистанционные зависимости множителя ослабления

Из рис. 5 видно, что дистанционная зависимость множителя ослабления изменялась от галса к галсу. Это связано с изменением метеоусловий. Дистанционная зависимость 1 характерна для распространения радиоволн в волноводе испарения. Интерес представляет дистанционная зависимость 2, где на расстоянии 40 км множитель имел положительное значение (+17 дБ). Такое явление возможно при достаточно мощном волноводе, когда наблюдается многолучевое распространение радиоволн и происходит суммирование нескольких лучей [7]. Дистанционная зависимость 3 характеризуется участками возрастания и убывания множителя ослабления с расстоянием, что говорит о наличии инверсионного слоя. Фор-

ма дистанционной зависимости 4 характерна для дифракционного механизма распространения радиоволн и отсутствия волновода испарения и инверсионного слоя в момент проведения исследований.

2.3. *Исследование радиолокационной наблюдаемости надводных объектов.* Исследование радиолокационной наблюдаемости проводилось в районах Охотского, Японского морей и прибрежной части Тихого океана (рис. 2).

Для этой цели использовались навигационная РЛС «Наяда-5», установленная на теплоходе «Ольга Андровская». Кроме того, использовалась навигационная РЛС «Океан-М», установленная на теплоходе «Академик Александр Несмеянов». Преимуществом этой РЛС является наличие двух диапазонов длин волн (3 и 10 см). Определение дальности действия РЛС проводилось как по судам с известной ЭПР, проходящим в зоне прямой видимости, так и по случайным судам за горизонтом. В этом случае устанавливалась радиосвязь и выяснялось водоизмещение судна для оценки ЭПР. Дальностью действия считалось расстояние, на котором отраженный от цели сигнал становился равным собственным шумам приемника. Определение дальности действия РЛС сопровождалось метеорологическими исследованиями с использованием аппаратуры, установленной на теплоходе «Ольга Андровская». Измерения проводились в июне – октябре 1989 г.

На рис. 6–12 приведены статистические функции распределения дальностей действия РЛС для Охотского, Японского морей и прибрежной части Тихого океана, разбитые по месяцам (июнь – октябрь),  $n$  – количество галсов.

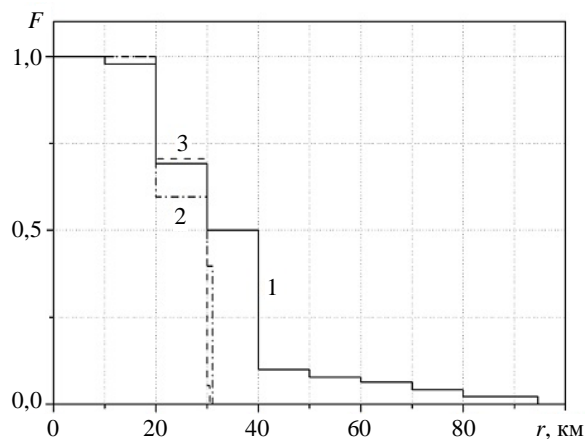


Рис. 6. Статистические функции распределения дальностей действия РЛС для Охотского (кривая 1,  $n = 81$ ), Японского (кривая 2,  $n = 11$ ) морей и прибрежной части Тихого океана (кривая 3,  $n = 16$ )

Как видно из рис. 6–12, начало лета в Охотском и Японском морях (июнь, июль) отличается малой дальностью действия РЛС в зоне

прямой видимости. В Охотском море максимальная дальность действия достигала 95 км.

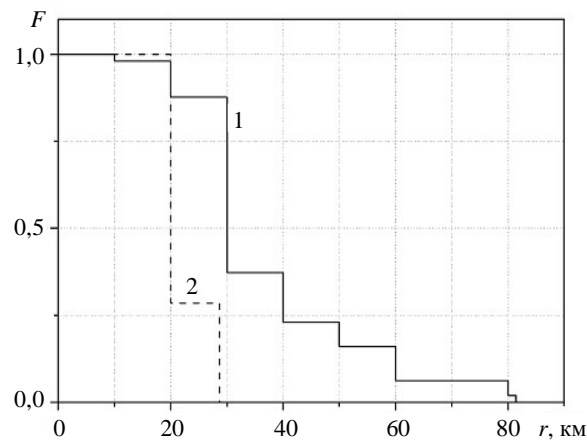


Рис. 7. Статистические функции распределения дальностей действия РЛС для Охотского моря (кривая 1,  $n = 51$ , июль) и прибрежной части Тихого океана (кривая 2,  $n = 7$ , июль)

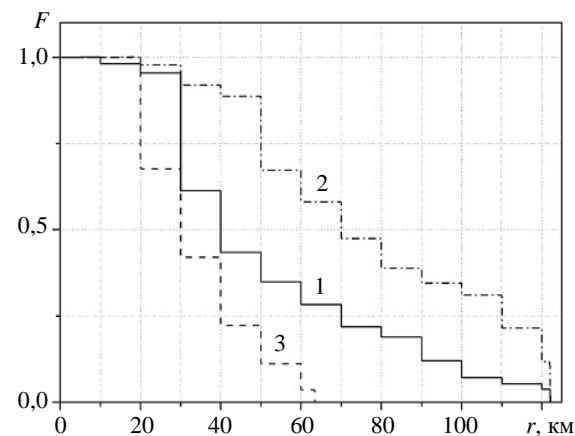


Рис. 8. Статистические функции распределения дальностей действия РЛС для Охотского (кривая 1,  $n = 147$ , август), Японского (кривая 2,  $n = 82$ , август) морей и прибрежной части Тихого океана (кривая 3,  $n = 66$ , август)

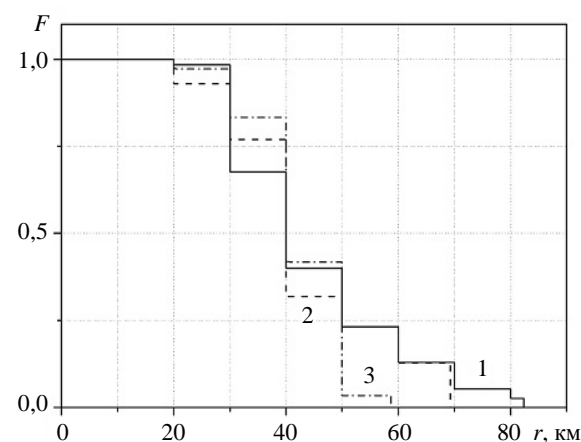


Рис. 9. Статистические функции распределения дальностей действия РЛС для Охотского (кривая 1,  $n = 94$ , сентябрь), Японского (кривая 2,  $n = 36$ , сентябрь) морей и прибрежной части Тихого океана (кривая 3,  $n = 61$ , сентябрь)

Однако вероятность появления дальности действия, равной 1,5–2 радиогоризонтам, очень мала. С середины лета (август, рис. 8) дальность действия резко увеличивается во всех районах. В Охотском и Японском морях появляются дальности, в три раза превышающие радиогоризонт (до 125 км). Особенно велика вероятность загоризонтного обнаружения в Охотском море  $P = 0,9$ . С приближением осени (сентябрь, октябрь, рис. 9, 10) дальность действия РЛС в Охотском и Японском морях незначительно падает, а в прибрежной части Тихого океана возрастает (рис. 10) до двух радиогоризонтов.

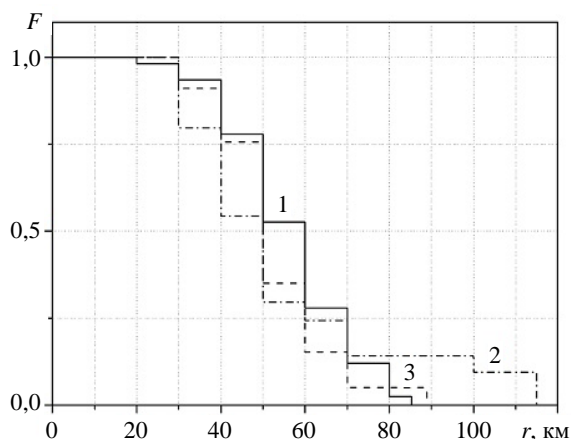


Рис. 10. Статистические функции распределения дальностей действия РЛС для Охотского (кривая 1,  $n = 66$ , октябрь), Японского (кривая 2,  $n = 40$ , октябрь) морей и прибрежной части Тихого океана (кривая 3,  $n = 20$ , октябрь)

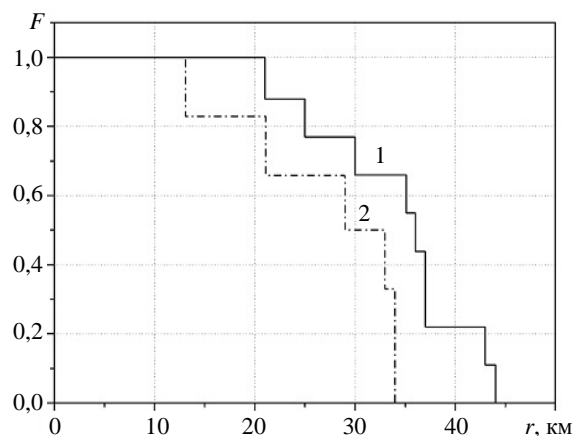


Рис. 11. Статистические функции распределения дальностей действия РЛС для Японского моря, сентябрь: 1 –  $\lambda = 3$  см; 2 –  $\lambda = 10$  см

Проведено определение дальности действия РЛС в центральной части Охотского и Японского морей с помощью навигационной РЛС «Океан-М», установленной на теплоходе «Академик Александр Несмеянов». Всего выполнено

33 наблюдения в 3-см диапазоне и 25 наблюдений в 10-см диапазоне длин волн. Как видно из рис. 11, 12, дальность действия лежит в основном в пределах прямой видимости. При одинаковом энергопотенциале дальность действия в 3-см диапазоне несколько выше, чем в 10-см диапазоне.

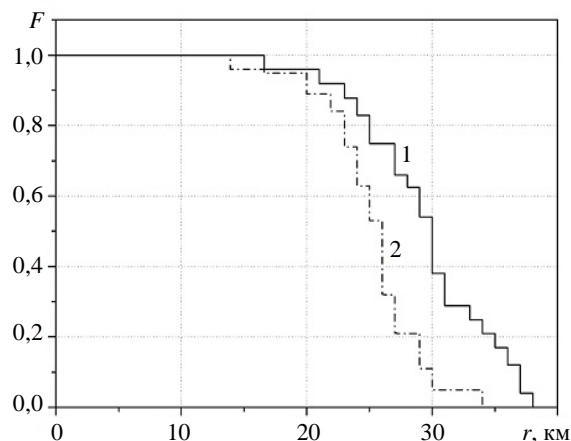


Рис. 12. Статистические функции распределения дальностей действия РЛС для Охотского моря, сентябрь: 1 –  $\lambda = 3$  см; 2 –  $\lambda = 10$  см

#### 2.4. Метеорологические исследования.

Метеорологические исследования заключались в определении стандартного набора метеорологических параметров, позволяющих определить высоту приводного тропосферного волновода  $H_0$  и  $M$ -дефицит. В период определения дальности действия РЛС такие измерения проводились ежедневно. Кроме того, в точках пересечения стандартной трассы о. Сахалин – о. Шикотан с курсом теплохода «Ольга Андровская» определение стандартного набора метеорологических параметров являлось обязательным.

Статистические функции распределения высот волноводов  $H_0$  для исследованных районов Охотского, Японского морей и прибрежной части Тихого океана (рис. 2) приведены на рис. 13–15, а на рис. 16 – временной ход  $H_0(t)$  высоты волновода испарения для Японского моря. На рис. 17 приведена зависимость  $\Delta M$ -дефицита от высоты волновода  $H_0$ , полученной расчетным путем с использованием стандартного набора метеорологических параметров.

Как видно из рис. 13, в июле в Охотском море вероятность появления волноводов, способных существенно увеличить дальность действия РЛС, очень мала. Это связано с движением теплых воздушных масс над более холодной водной поверхностью, что не способствует формированию волноводов испарения. Такая же картина в

июле наблюдается и в прибрежной части Тихого океана (рис. 2), где высоты волноводов не превышают 2,5 м (рис. 14).

В августе в результате прогрева воды (рис. 13, 14) в Охотском, Японском морях и прибрежной части Тихого океана высота волноводов существенно увеличилась, что привело к увеличению дальности действия РЛС (рис. 8). Этому способствовали большие значения градиентов влажности при значительных скоростях ветра. Основные параметры приводных тропосферных волноводов во всех районах заметно менялись. Для примера на рис. 16 приведен временной ход  $H_0(t)$  высоты волновода для Японского моря.

Осенний период (сентябрь, октябрь) характеризуется движением более холодных воздушных масс над более теплой водой, что привело к существенному увеличению высот волноводов, особенно в прибрежной части Тихого океана (рис. 13, 14).

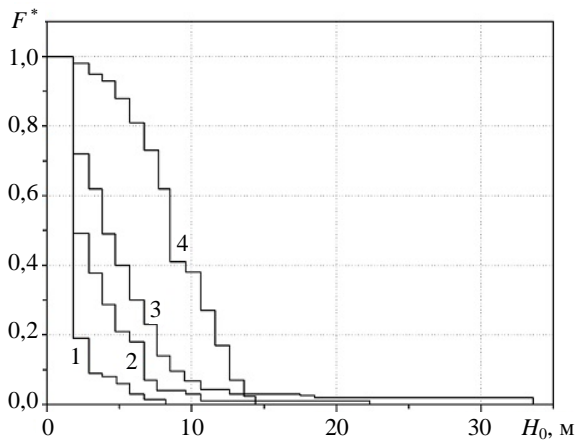


Рис. 13. Статистические функции распределения высот волноводов  $H_0$ , Охотское море: 1 – июль; 2 – август; 3 – сентябрь; 4 – октябрь

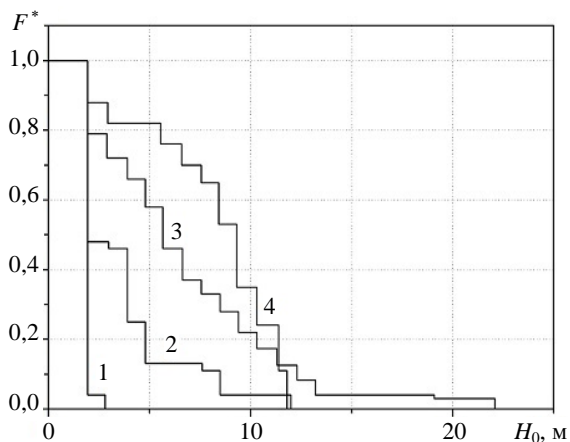


Рис. 14. Статистические функции распределения высот волноводов  $H_0$ , Тихий океан: 1 – июль; 2 – август; 3 – сентябрь; 4 – октябрь

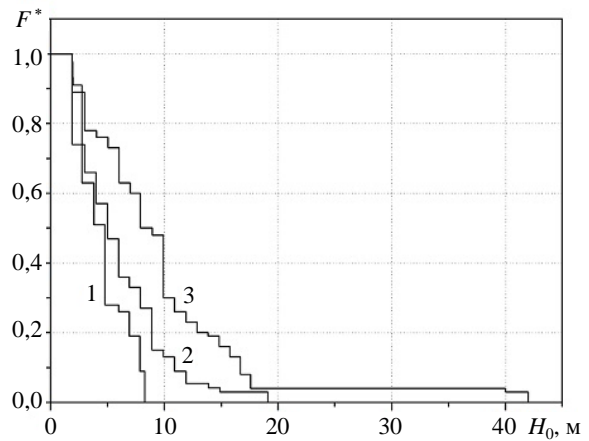


Рис. 15. Статистические функции распределения высот волноводов  $H_0$ , Японское море: 1 – август; 2 – сентябрь; 3 – октябрь

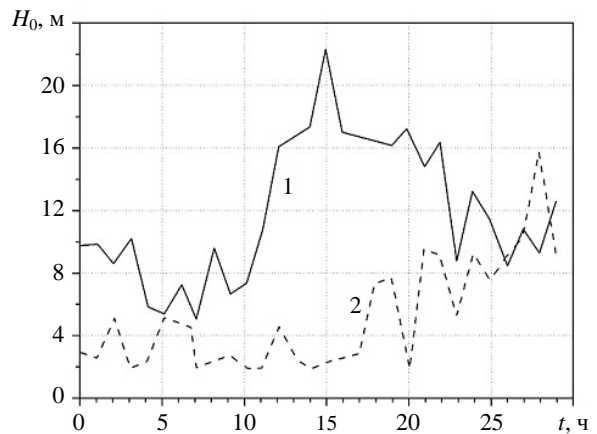


Рис. 16. Временной ход  $H_0(t)$  высоты волновода испарения для Японского моря: 1 – 20–21.09.89; 2 – 23–24.09.89

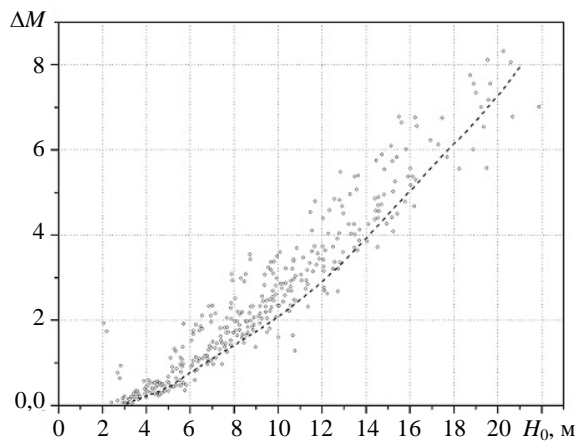


Рис. 17. Зависимость  $\Delta M$ -дефицита от высоты волновода  $H_0$

Кроме того, с целью увеличения количества метеорологических данных на акватории Охотского моря из архивных материалов была произведена выборка такого рода данных за прошедшие годы. В качестве основного материала для исследования изменчивости параметров при-

водного волновода использовались данные научно-исследовательских судов «Шокальский», «Прибой» и «Волна» в 1965–1966 гг. и 1976–1979 гг. Эти суда проводили измерения в южной части Охотского моря и прилегающей части Тихого океана. Анализ этих данных показывает, что в осенне-летний период существуют весьма низкие приводные волноводы в данной акватории, что связано с интенсивным затоком в это время года теплых и влажных масс воздуха с юга (теплое течение Куроисио). Эти данные очень схожи с данными, полученными в период проведения исследований (рис. 6–17).

Для анализа параметров инверсионных слоев использованы данные станций аэрологического зондирования (г. Южно-Сахалинск, Поронайск, Южно-Курильск, Уруп и Северо-Курильск). Анализ показывает практически полное отсутствие инверсионных слоев с градиентами показателя преломления, отличными от стандартных.

Если вернуться к работе [2], которая была выполнена в северо-западной части Тихого океана в 1955 г., и сравнить ее результаты с экспериментальными данными наших работ (1985–1991 гг.), то окажется, что сезонная зависимость сохраняется: в летний период условия распространения радиоволн хуже, чем в осенне-зимний. Объяснение этому явлению приведено выше.

**Выводы.** Физические процессы, протекающие в нижних слоях тропосферы над океаном, при наличии градиентов захвата приводят к образованию приводных тропосферных волноводов, которые существенным образом влияют на дальность действия РЛС. Высокие волноводы отмечаются в случаях больших значений градиента влажности и при значительных скоростях ветра. Низкие волноводы обусловлены адвекцией тепла – воздух часто был теплее воды. Северо-западная часть Тихого океана (Охотское, Японское, Желтое и Южно-Китайское моря) является прибрежной, что приводит к наличию влияния на метеорологические условия распространения радиоволн материка и островов. Это влияние привело к появлению волноводов с высотами до 33 м, которые наблюдались вблизи островов, а также в Японском море, где сказывается влияние материка. Наблюдается резко выраженная сезонная зависимость – с наступлением зимы вероятность увеличения дальности действия РЛС увеличивается. Представляет интерес форма зависимости  $\Delta M$ -дефицита от высоты волновода испарения  $H_0$ , которая говорит о возможности использования высоты волновода  $H_0$  для диагностики условий распространения радиоволн сантиметрового диапазона. Возможность такой диагностики показана в работе [7].

## Библиографический список

1. Far East radio-radar propagation conditions for fleet units / U.S. Navy Electronic Lab. – 1952. – Rep. N 319.
2. Anderson L., Gossard E. // Trans. IRE. – 1955. – AP-3, N 4. – P. 163–167.
3. Мыценко И. М. Экспериментальное исследование дальности действия судовых навигационных РЛС сантиметрового диапазона в районах Мирового океана / И. М. Мыценко, Л. С. Панкратов, С. И. Хоменко // 36. науч. праць / Харківський військовий ун-т. Міністерство оборони України. – Х., 2001. – Вип. 2(32). – С. 56–59.
4. Дальнее тропосферное распространение ультракоротких радиоволн / под ред. Б. А. Введенского и др. – М.: Сов. радио, 1965. – 415 с.
5. Гаврилов А. С. Методы расчета структуры приводного слоя атмосферы применительно к задачам радиолокации над океаном // Рассеяние и дифракция радиолокационных сигналов и их информативность / А. С. Гаврилов, Ю. С. Петров. – Л.: Северо-Западный заочный политех. ин-т, 1984. – С. 31–36.
6. Мыценко И. М. Дистанционные зависимости множителя ослабления радиоволн 3, 10, 50, 200 см диапазонов в районах Мирового океана // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2006. – 11, № 3. – С. 393–399.
7. Особенности пространственно-временной структуры радиосигналов СВЧ-диапазона на приводных трассах прямой видимости / А. С. Брюховецкий, В. А. Кабанов, В. Б. Синицкий и др. – Х.: ИРЭ, 1983. – 37 с. (Препр. / АН УССР. Ин-т радиофизики и электрон.; № 220).
8. Мыценко И. М. Диагностика и прогнозирование дальности действия судовых навигационных РЛС трехсантиметрового диапазона / И. М. Мыценко, А. Н. Роечко, С. И. Хоменко // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2001. – 6, № 1. – С. 67–71.

*Рукопись поступила 17.05.2016.*

F. V. Kivva, I. M. Mytsenko, A. N. Roenko

## BEYOND-THE-HORIZON RADIO WAVE PROPAGATION AND SURFACE OBJECTS RADAR OBSERVATION IN THE NORTH-WESTERN AREA OF THE PACIFIC OCEAN

In general, the coverage range of vessel navigation radars in different areas of the World Ocean is determined by radio wave propagation conditions in these areas. Therefore, the experimental data introducing clarity into diagnosis and prognosis methodology of radio wave attenuation factor is of a great interest. The paper presents the results of experimental researches on radio wave attenuation factor distance dependences and coverage range of vessel navigation radars in the north-western part of the Pacific Ocean. The attenuation factor of direct and reflected signals was studied simultaneously with meteorological researches and investigations of formation conditions of surface ducts and inverse layers. Attenuation factor distance dependences, statistical distribution functions of evaporation duct heights, and data on vessel navigation radar coverage ranges were obtained. The results of the researches promote deeper understanding of the processes in the lower atmosphere layer above the ocean surface that determine the conditions of radio wave propagation and coverage range of vessel navigation radars in different areas of the World Ocean.

**Key words:** attenuation factor, coverage range, surface duct, inverse layer, statistical distribution function..

Ф. В. Ківва, І. М. Миценко, О. М. Роєнко

ЗАГОРИЗОНТНЕ ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ І  
РАДІОЛОКАЦІЙНЕ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ОБ'ЄКТІВ  
У ПІВНІЧНО-ЗАХІДНІЙ ЧАСТИНІ  
ТИХОГО ОКЕАНУ

Дальність дії суднових навігаційних радіолокаційних станцій (РЛС) у різних районах Світового океану здебільшого визначається умовами поширення радіохвиль у цих районах. Тому особливу цінність набувають експериментальні дані, які дозволяють уточнювати методики діагнозу і прогнозу величини множника послаблення радіохвиль. У роботі представлено результати експериментальних досліджень дистан-

ційних залежностей множника послаблення радіохвиль і дальності дії суднових навігаційних РЛС у північно-західній частині Тихого океану. Визначення послаблення поля прямого і відбитого сигналів проводилися одночасно з метеорологічними дослідженнями і вивченням умов утворення приводних хвилеводів та інверсійних шарів. Отримано дистанційні залежності множника послаблення радіохвиль, статистичні функції розподілу висот хвилеводів випаровування, дальності дії суднових навігаційних РЛС. Результати досліджень сприяють глибшому розумінню процесів, що відбуваються у нижніх шарах атмосфери над океаном і визначають умови поширення радіохвиль і дальність дії суднових навігаційних РЛС у різних районах Світового океану.

**Ключові слова:** множник послаблення, дальність дії, приводний хвилевід, інверсійний шар, статистична функція розподілу.