

Ревенко В. Ю.

ПОРІВНЯЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ АТМОСФЕРНОГО СЕРЕДОВИЩА НА ЗМІНУ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ДАЛЬНОСТІ ДО ОБ'ЄКТІВ, ЩО СПОСТЕРІГАЮТЬСЯ, НА ДВОХ ДІАПАЗОНАХ ХВИЛЬ СУДНОВОЮ РЛС

Розглянуто радіофізичні характеристики атмосфери та атмосферних утворень, вплив умов поширення радіолокаційних сигналів на дальність та точність виміру дальності морських об'єктів, залежність величини помилки радіолокаційного виміру дальності суднової РЛС від протяжності атмосферних утворень.

Представлено стосовно індикаторів з яркістю відміткою суднових РЛС контраст радіолокаційного зображення морського об'єкта, що спостерігається на тлі відображень від атмосферних утворень, залежно від дальності до антени суднової РЛС. Проведено аналіз основного рівняння радіолокації одиночних об'єктів з урахуванням зміни їхньої відображеної потужності на певній відстані залежно від інтенсивності атмосферного процесу. Проаналізовано вплив атмосферних утворень на параметри луна-сигналу морського об'єкта. Залежно від параметрів суднової РЛС ехо-сигнал морського об'єкта, що знаходиться в осадах різної інтенсивності, що забезпечуватиме різне відхилення потужності сигналу об'єкта до потужності сигналу атмосферних утворень, при якому ще можливе визначення відстані до морського об'єкта без створення аварійної ситуації, тобто при якому ще можливе виконання завдання суднової РЛС.

Показано, що для визначення судновою РЛС максимальної дальності виявлення морського об'єкта на робочій довжині хвилі достатньо знати лише відношення ефективної площі розсіювання до параметрів атмосферного утворення, переважно інтенсивності атмосферних утворень. Використовуючи ці відносини для різних відражаючих властивостей об'єкта і відражаючих властивостей атмосферних утворень можна здійснити прогноз максимальної дальності до морського об'єкта за його інтенсивності, що підвищує безпеку судноводіння у складних умовах атмосферного середовища.

Ключові слова: атмосфера, атмосферні утворення, суднова радіолокаційна станція, інтенсивність опадів, дальність виявлення, морський об'єкт, діелектрична проникність, радіолокаційне спостереження.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими чи практичними завданнями. При радіолокаційному спостереженні морських об'єктів, що у атмосферному середовищі, істотну роль грає точність виміру відстані до морського об'єкта на фоні природних атмосферних перешкод, що впливає на навігаційну безпеку судноводіння, особливо у обмежених районах плавання.

Незважаючи на існуючі методи вимірювання відстані до морського об'єкта при різних станах атмосферного середовища, до теперішнього часу радіолокаційний вимір відстані залишається проблематичним для суднових РЛС, так як використовуваний метод не враховує внутрішню структуру атмосферного утворення, що впливає на процеси взаємодії опромінювання атмосферного утворення електромагнітної хвилі певного діапазону.

Аналіз останніх досягнень та публікацій, в яких розпочато вирішення даної проблеми. При аналізі основного рівняння радіолокації враховується величина потужності опромінюючої хвилі на відстань R , вираженою у ватах на одиницю площі сфери, а розповсюдження хвилі відбувається в умовах середовища, відповідних вільному простору [1, 2, 12-21].

Оцінка втрат при пошуку та супроводі морського об'єкта включає і втрати потужності електромагнітної хвилі, яка опромінює об'єкт за рахунок ослаблення в атмосфері.

Однак вплив середовища на вимірювання відстані до об'єкта всередині атмосферної перешкоди не враховується, що призводить до помилок, в рахунок не тільки поглинання потужності опромінюючої, а й перевідображення відбитої потужності всередині атмосферного утворення, що вносить велику похибку у вимірювання відстані до морського об'єкта, що впливає на безпеку судноводіння у складних умовах атмосферного середовища.

Тому опис методу, що дозволяє врахувати вплив атмосферного середовища на вимірювання радіолокації дальності, є актуальним завданням.

Формулювання цілей статті (постановка задачі). Метою публікації є розробка способу оцінки впливу атмосферного середовища на вимірювання радіолокації дальності до морського об'єкта суднової РЛС.

Виклад основного матеріалу дослідження. Радіофізичні характеристики атмосфери і атмосферних утворень. Атмосфера з утвореннями є середовищем, в якому поширені радіолокаційні сигнали від антени суднової станції радіолокації до і від об'єкта назад до антени. При поширенні сигналів відбувається їх взаємодія із середовищем відповідно до рівнянь Максвелла:

$$\varepsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} + \sigma \bar{E} = r_0 \bar{I} \bar{H}, \quad (1)$$

$$-\mu \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} = r_0 \bar{I} \bar{E}, \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \bar{E} = \frac{\rho}{\varepsilon}, \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \bar{H} = 0, \quad (4)$$

де \bar{E} і \bar{H} – вектори напруженості електричного та магнітного полів;

σ – питома електрична провідність;

ρ – питома щільність зарядів;

ε і μ – діелектрична та магнітна проникність середовища.

Розв'язаннями цих рівнянь є функції:

$$E_z = E_0 \cos \omega \left(t \pm \frac{r}{v} \right), \quad (5)$$

$$H_y = \pm \frac{\sqrt{\varepsilon'}}{120\pi} E_z, \quad (6)$$

де v – швидкість поширення радіохвиль;

ω – кутова частота;

ε' – відносна діелектрична проникність.

З (5) і (6) випливає, що швидкість поширення радіохвиль в атмосфері однозначно визначається її діелектричною проникністю, оскільки

$$\varepsilon = n^2, \quad (7)$$

де n – коефіцієнт заломлення.

У розрахунках реальну атмосферу можна замінити моделлю, що складається із суміші сухого повітря, водяної пари та аерозольної фракції. Відомо, що коефіцієнт заломлення сухого повітря визначається співвідношенням

$$n_c = 1 + \frac{77,6}{T} P \cdot 10^{-6}, \quad (8)$$

а вологого співвідношенням

$$n_{вл} = 1 + \frac{77,6}{T} \left(P + \frac{4810}{T} \ell \right) \cdot 10^{-6}, \quad (9)$$

де P – тиск повітря, мбар;

ℓ – парціальний тиск водяної пари, мбар.

Розглянемо докладніше діелектричні властивості атмосферних утворень.

Відомо, що коефіцієнт діелектричної проникності середовища пов'язаний із його дипольним моментом співвідношенням

$$\varepsilon = 1 + 4\pi x, \quad (10)$$

де x – дипольний момент одиниці об'єму середовища.

Представимо атмосферне утворення у вигляді адитивної суміші вологого повітря та аерозолів, для якої дипольний момент одиниці об'єму дорівнюватиме.

$$x = x_r + x_a, \quad (11)$$

де x_r і x_a – дипольні моменти газової та аерозольної фракцій.

З (9) з використанням (10) знаходимо

$$x_r = \frac{40}{\pi T} \cdot 10^{-6} \left(P + \frac{4810}{T} \ell \right). \quad (12)$$

Обчислення дипольного тиску аерозольної фракції у загальному випадку пов'язані зі значними труднощами. Однак, як показано в [3-5], у тому випадку, коли гідрометеорний об'єм можна вважати суцільним тілом, дипольний момент аерозольної частини визначається виразом

$$x_a = na^3 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right| = \frac{3}{4\pi} \rho W \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|, \quad (13)$$

де n – число крапель в одиниці об'єму;

a – середній радіус крапель;

m – комплексний коефіцієнт заломлення речовини аерозолів;

ρ – щільність речовини;

W – водність атмосферного утворення.

Зауважимо, що цій умові приблизно задовольняють у мікрохвильовому діапазоні хвиль практично всі типи атмосферних утворень.

Таким чином, сумарний дипольний момент одиниці об'єму гідрометеорів може бути представлений у вигляді

$$x = 1 + \left[\frac{160}{T} \left(P + \frac{4810}{T} \ell \right) \cdot 10^{-6} + 3\rho W \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right| \right]. \quad (14)$$

В результаті підстановки (14) і (12) (11) отримуємо в остаточному вигляді вираз для коефіцієнта діелектричної проникності атмосферного утворення у вигляді

$$\varepsilon = \left\{ 1 + \left[\frac{160}{T} \left(P + \frac{4810}{T} \ell \right) \cdot 10^{-6} + 3\rho W \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right| \right] \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (15)$$

від якого відповідно до (7) можна перейти до коефіцієнта заломлення

$$n = \left\{ 1 + \left[\frac{160}{T} \left(P + \frac{4810}{T} \ell \right) \cdot 10^{-6} + 3\rho W \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right| \right] \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (16)$$

Розкладемо вираз (16) у степеневий ряд і обмежимо розкладання його першим членом. В результаті отримаємо

$$n = 1 + \frac{80}{T} \left(P + \frac{4810}{T} \ell \right) + \frac{3}{2} \rho W \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|. \quad (17)$$

Другий доданок (17) характеризує собою внесок, що визначається вологим повітрям, а третій – аерозольною фракцією. Орієнтовна оцінка величин вкладів цих доданків показує, що за $\rho = 1$, $\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right| \approx 1$ і $P = 1000$ мбар третій доданок має величину $1,5 \cdot 10^{-6}$. Для оцінювання величини вкладу другого доданку покладемо $T = 300$ К, $P = 1000$ мбар, $e = 26$ мбар, внаслідок чого отримаємо величину $1,5 \cdot 10^{-3}$.

Таким чином, очевидно, що коефіцієнт заломлення атмосферного утворення, в основному, визначається температурою і тиском повітря всередині атмосферного утворення і з достатньою для практики точністю може бути обчислений за формулою (8), поклавши в ній відносну вологість рівної 100%.

На рис. 1 представлені залежності коефіцієнта заломлення атмосферних утворень від температури біля земної поверхні при різних висотах атмосферних утворень, розраховані (17). Аналіз цих залежностей показує, що коефіцієнт заломлення атмосферних утворень практично у всіх реальних випадках полягає в інтервалі значень $(n - 1) \cdot 10^{-6}$ від 100 до 500.

Розглянуті співвідношення отримані у припущенні, що атмосферні утворення становлять середовище, не схильне до турбулентності.

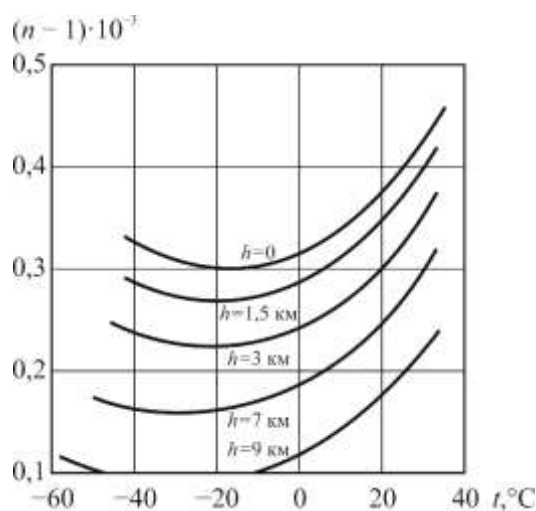


Рисунок 1. Залежності коефіцієнта заломлення атмосферних утворень

Про послаблюючі властивості опадів з урахуванням природи їх утворення. Дані про послаблюючі властивості опадів з урахуванням природи їхнього утворення представлені на рис. 2 і рис. 3 у вигляді залежності питомого коефіцієнта ослаблення від інтенсивності опадів, довжини хвилі та температури повітря.

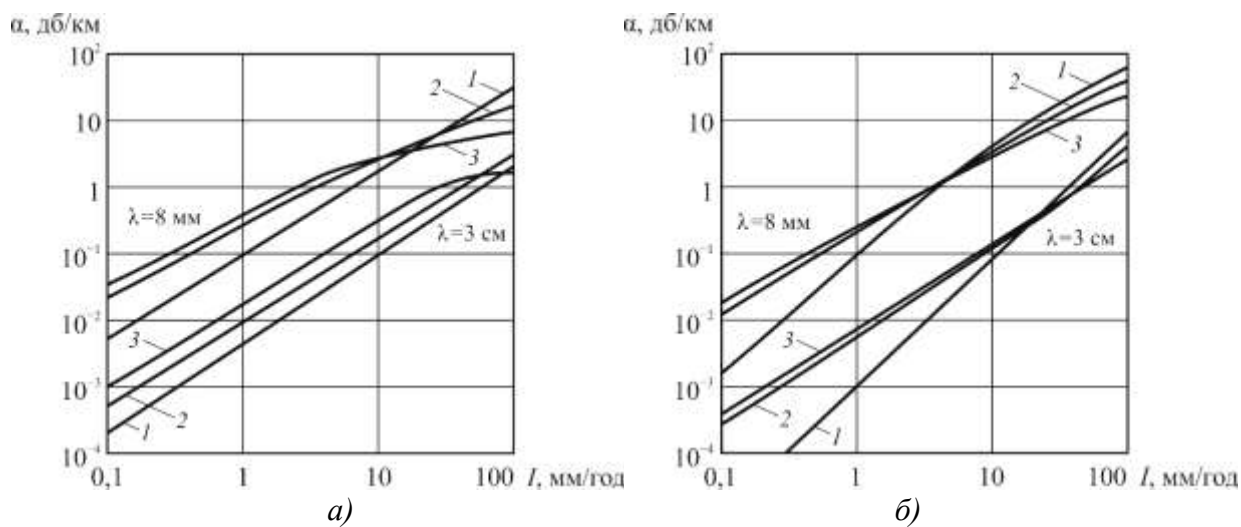


Рисунок 2:

а) розподіл Литвінова; б) розподіл Шифріна;
1 – дощ із крупи; 2 – дощ із обзерненого снігу; 3 – дощ із необзерненого снігу

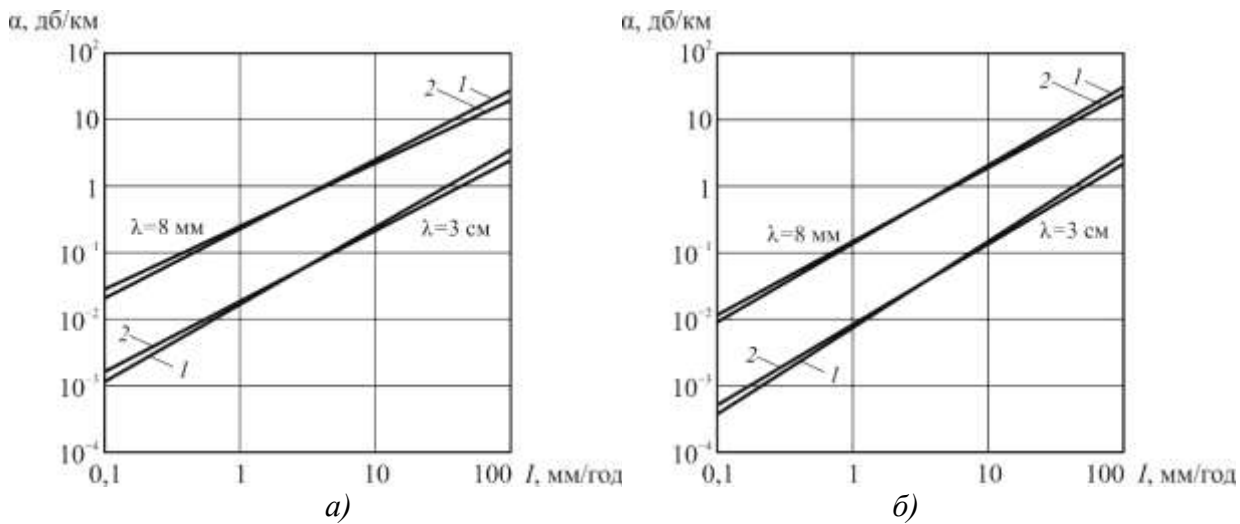


Рисунок 3:
 а) розподіл Литвінова; б) розподіл Шифріна;
 1 – 0°C; 2 – 18°C

Аналіз добутку залежностей показує, що з дощів з крупи, обзерненого снігу і необзерненого снігу залежність коефіцієнта ослаблення однієї й тієї ж довжини хвилі від температури виражена слабо. Це стосується як хвиль 3 см, так і хвиль 8 мм діапазону. Для дощів різної природи коефіцієнт ослаблення зростає із збільшенням частоти. Що стосується залежності коефіцієнта ослаблення від температури, то для 0°C і 18°C ця відмінність не перевищує 15%, тому в першому наближенні в розрахунках послаблюючої дії опадів можна користуватися даними, наведеними для 18°C.

Аналіз залежності величини коефіцієнта ослаблення від інтенсивності опадів за постійної температури для обох розподілів крапель за розмірами показує, що зі збільшенням інтенсивності дощу як діапазону 3 см, так і для 8 мм різко збільшується.

Аналіз впливу природи утворення опадів на коефіцієнт ослаблення в разі зміні їх інтенсивності показує, що в діапазоні хвиль 3 см до інтенсивності опадів 30 мм/год коефіцієнт ослаблення в дощі з необзерненого снігу менший, ніж у дощі з крупи. Потім зі збільшенням інтенсивності опадів коефіцієнт ослаблення дощу з крупи різко збільшується і стає вищим, ніж для дощів іншої природи. У той же час коефіцієнт ослаблення для дощу з необзерненого снігу різко зменшується у порівнянні з дощами іншої природи. Це характерно для обох розподілів крапель за розмірами.

Для 8 мм діапазону під час опадів до інтенсивності 10 мм/год велику величину має коефіцієнт ослаблення в разі дощу з обзерненого снігу та меншу за дощ з крупи. За інтенсивності опадів понад 10 мм/год збільшується коефіцієнт ослаблення для дощу з крупи; менше значення має коефіцієнт ослаблення в дощі з необзерненого снігу. Ця залежність спостерігається для обох розподілів крапель за розмірами.

Вплив умов поширення радіолокаційних сигналів на дальність радіолокаційного виявлення та точність вимірювання дальності об'єктів. Під час поширення радіолокаційних сигналів у газах атмосфери, тумані, хмарах та опадах відбувається їх помітне ослаблення. Особливо велике ослаблення у кисні та водяній парі атмосфери для хвиль міліметрового діапазону; у сантиметровому діапазоні хвиль воно відносно невелике. Однак, в разі радіолокаційного спостереження на значних відстанях, це ослаблення також необхідно враховувати. Що стосується ослаблення радіолокаційних сигналів атмосферними утвореннями, то воно набагато суттєвіше, ніж у газах атмосфери і особливо відчутно на хвилях коротше 5 см.

Скорочення максимальної дальності радіолокаційного спостереження в 3 см і 8 мм діапазонах хвиль може бути оцінено відповідно до виразів

$$R_0 = R \left[10^{-0,2(\alpha_r + \alpha_d)R} + 4 \cdot 10^7 \frac{I^{1,6}}{R^2} \right]^{\frac{1}{4}}, \quad (18)$$

$$R_0 = R \left[10^{-0,2(\alpha_r + \alpha_d)R} + 48 \cdot 10^7 \frac{I^{1,6}}{R^2} \right]^{\frac{1}{4}}, \quad (19)$$

де R_0 – дальність виявлення цілі у «хорошу» погоду;

I – інтенсивність опадів, мм/год;

α_r і α_d – питомі коефіцієнти ослаблення для газів атмосфери та дощу відповідно.

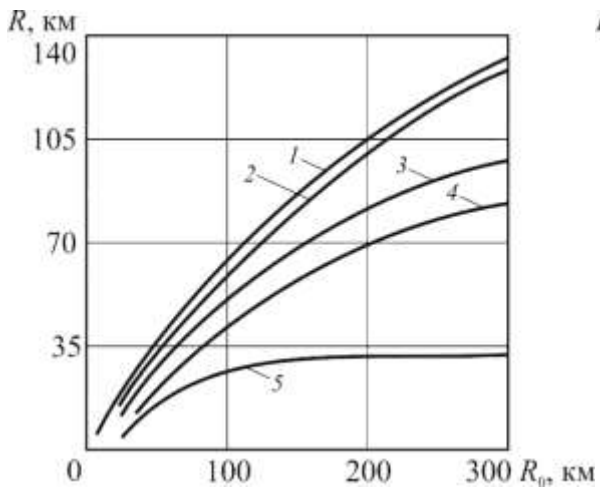
У роботах [6-11] проведено оцінку скорочення максимальної дальності об'єктів без урахування природи утворення опадів. У наведених розрахунках враховано природу утворення опадів та прийнято таку модель: опади повністю перекривають трасу розповсюдження сигналів і знаходяться також у районі морського об'єкту.

На рис. 4 наведено залежність максимальної дальності виявлення морського об'єкта у «погану» погоду від інтенсивності опадів для дощу з крупи, дощу з обзерненого снігу та дощу з необзерненого снігу за умови апроксимації закону розподілу крапель за розмірами розподілом Литвинова, а на рис. 5 для опадів тієї ж природи, але за умови апроксимації закону розподілу крапель за розмірами розподілом Шифрина (довжина хвиль 3 см).

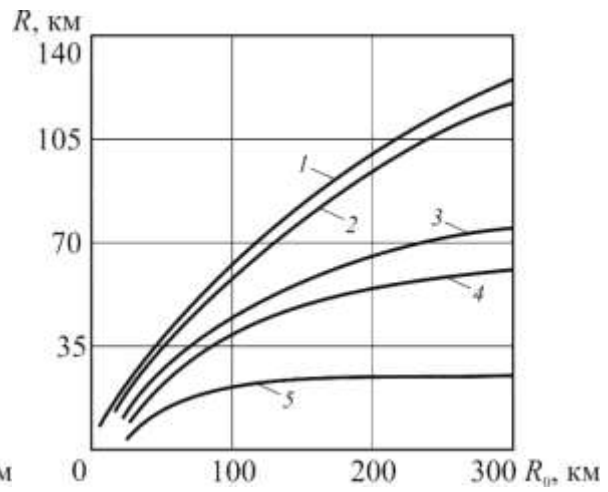
Ті ж залежності, але для хвилі 8 мм наведено на рис. 6 та рис. 7 відповідно. Аналіз наведених залежностей дозволяє зробити такі висновки.

У трьох сантиметровому діапазоні хвиль вид розподілу крапель за розмірами в умовах опадів різної природи мало впливає на характеристики виявлення об'єктів в осадах. Однак природа утворення опадів по-різному впливає на максимальну дальність виявлення морських об'єктів. Так, у разі дощу з крупи опади слабкої інтенсивності близько 0,1 мм/год впливають на виявлення морських об'єктів, для яких $R_0 = 45$ км. Так, наприклад, якщо морський об'єкт за відсутності гідрометеорів на трасі поширення та в районі об'єкта виявляється на відстані 45 км, то опади з інтенсивністю 0,1 мм/год скорочують максимальну дальність виявлення до 35 км.

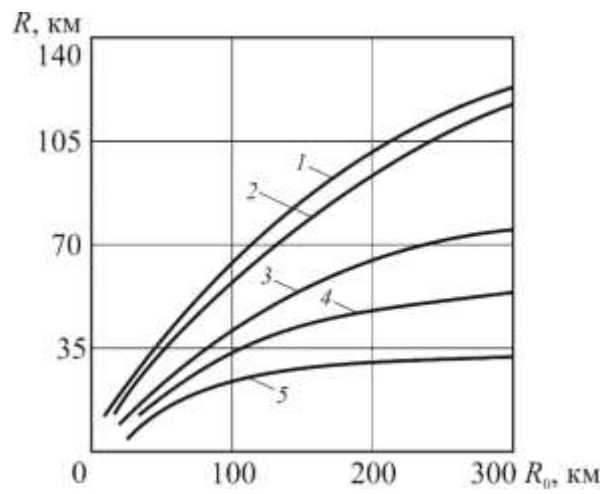
Слід зазначити, що збільшення дальності виявлення морського об'єкта в «хорошу» погоду, що еквівалентно збільшенню ефективної поверхні розсіювання об'єкта, призводить до відносного збільшення скорочення дальності виявлення в осадах. Так, за максимальної дальності виявлення морського об'єкта без опадів 70 км, об'єкт в опади виявляється вже тільки на максимальному видаленні 50 км. В разі виявлення морського об'єкта у «хорошу» погоду на відстані 140 км, у «погану» погоду дальність виявлення об'єкта скорочується до 80 км.



a)



б)

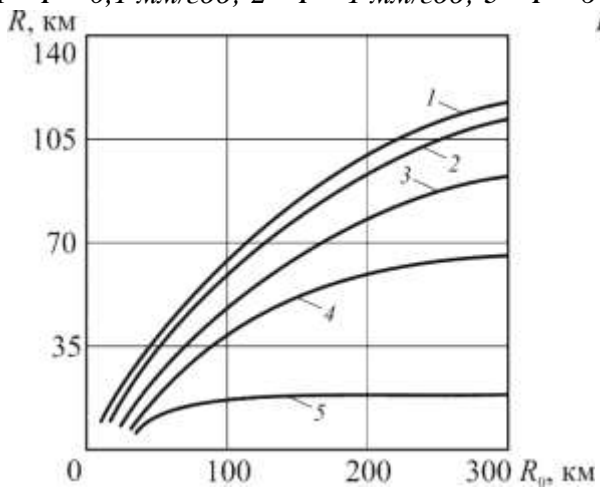


в)

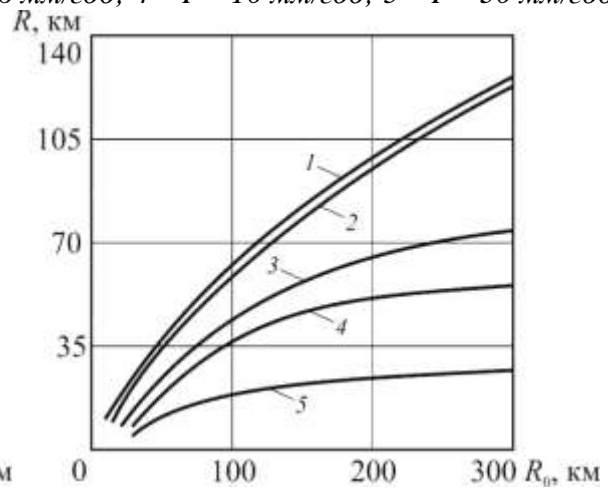
Рисунок 4. Розподіл Литвінова (довжина хвилі 3 см):

а) дощ із крупної снігу; б) дощ із обсервованого снігу; в) дощ із необсервованого снігу;

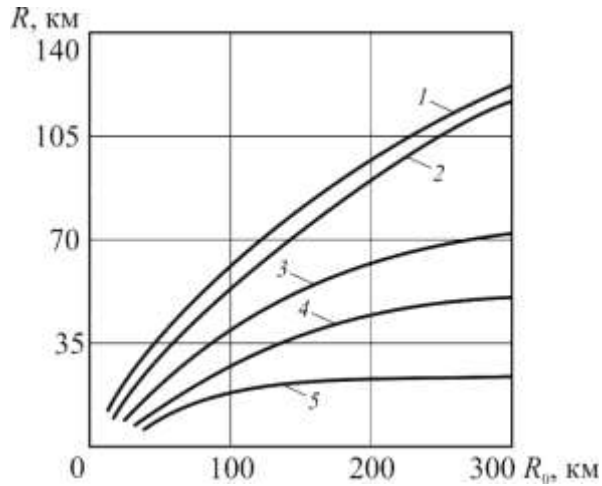
1 – $I = 0,1$ мм/год; 2 – $I = 1$ мм/год; 3 – $I = 6$ мм/год; 4 – $I = 10$ мм/год; 5 – $I = 30$ мм/год



a)



б)



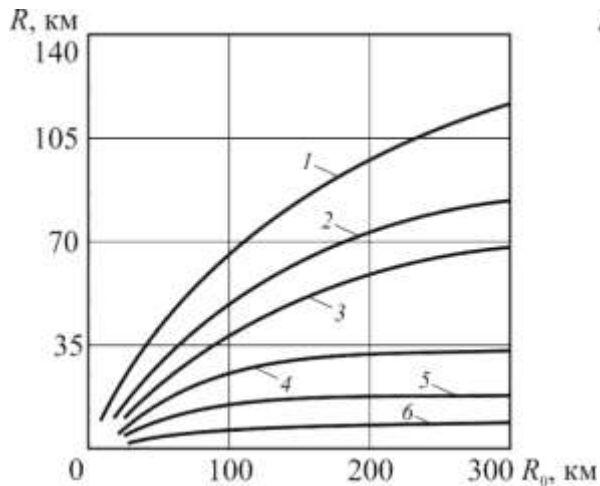
в)

Рисунок 5. Розподіл Шифрина (довжина хвилі 3 см):

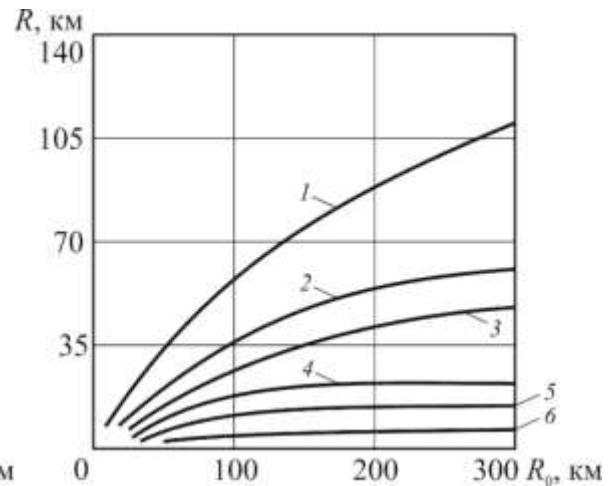
а) дощ із крупи; б) дощ із обзерненого снігу; в) дощ із необзерненого снігу;
 1 – $I = 0,1$ мм/год; 2 – $I = 1$ мм/год; 3 – $I = 6$ мм/год; 4 – $I = 10$ мм/год; 5 – $I = 30$ мм/год

Зі збільшенням інтенсивності опадів вплив їх на виявлення морських об'єктів зростає. Так, вплив опадів з інтенсивністю I мм/год починає позначатися вже для морських об'єктів, максимальна дальність виявлення яких за «хорошу» погоду становить величину, що перевищує 35 км. Якщо морський об'єкт, наприклад, виявлявся в «хорошу» погоду на відстані 37 км, то в разі опадів такої інтенсивності дальність виявлення скорочується до 30 км.

Збільшення максимальної дальності виявлення R_0 також призводить до відносного скорочення дальності виявлення морського об'єкта в опадах. Так, за $R_0 = 160$ км максимальна дальність виявлення морського об'єкта в опадах становить вже величину порядку 85 км.



а)



б)

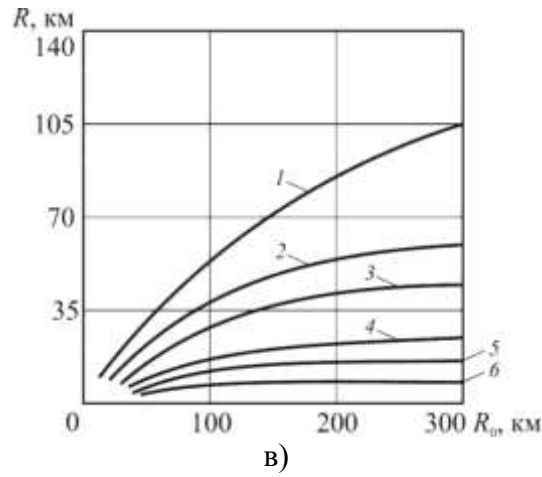
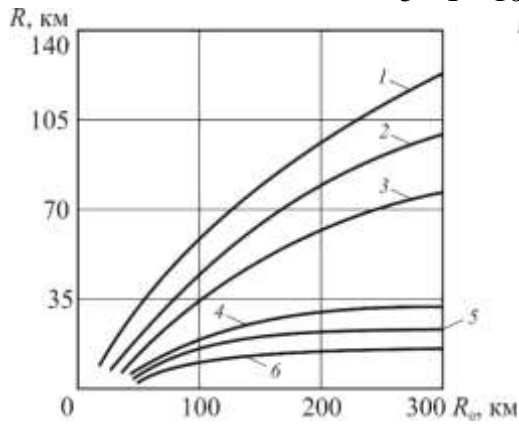
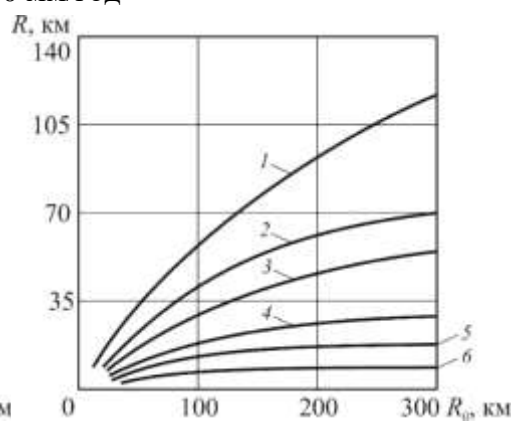


Рисунок 6. Розподіл Литвінова (довжина хвилі 8 мм):

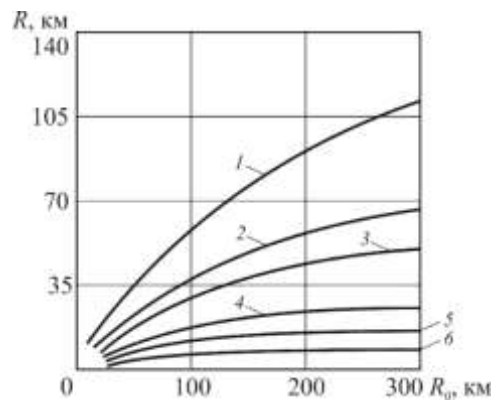
а) дощ із крупи; б) дощ із обзерненого снігу; в) дощ із необзерненого снігу;
 1 – $I = 0,1$ мм/год; 2 – $I = 0,6$ мм/год; 3 – $I = 1$ мм/год; 4 – $I = 3$ мм/год; 5 – $I = 6$ мм/год;
 5 – $I = 10$ мм/год



а)



б)



в)

Рисунок 7. Розподіл Шифрина (довжина хвилі 8 мм):

а) дощ із крупи; б) дощ із обзерненого снігу; в) дощ із необзерненого снігу;
 1 – $I = 0,1$ мм/год; 2 – $I = 0,6$ мм/год; 3 – $I = 1$ мм/год; 4 – $I = 3$ мм/год; 5 – $I = 6$ мм/год; 5 –
 $I = 10$ мм/год

У разі подальшого збільшення інтенсивності опадів спостерігається ще більший їх вплив на максимальну дальність виявлення морських об'єктів.

За інтенсивності дощу 6 мм/год максимальна дальність виявлення морських об'єктів, які виявляються в «хорошу» погоду на дальністях 12 км, становить величину порядку 6 км. За збільшення інтенсивності опадів до 10 мм/год їхній вплив, в основному, позначається на виявленні морських об'єктів, максимальна дальність виявлення яких у «хорошу» погоду значна.

У разі подальшого збільшення інтенсивності опадів від 10 до 30 мм/год – скорочує максимальну дальність виявлення морського об'єкта майже вдвічі.

Що стосується тропічних злив з інтенсивністю близько 100 мм/год, то в цих умовах морський об'єкт, для якого $R_0 = 130$ км, буде виявлено лише на відстані близько 10 км. У разі дощу з обзерненого снігу в діапазоні інтенсивностей від 0,1 до 1 мм/год ступінь скорочення максимальної дальності виявлення морських об'єктів приблизно такий самий, як і для дощу з крупи. За інтенсивності опадів більше ніж 6 мм/год вони починають позначатися на дальності виявлення морських об'єктів, котрим максимальна дальність виявлення в «хорошу» погоду має величину, що перевищує 10 км. Так, наприклад, якщо дальність виявлення морського об'єкта у «хорошу» погоду дорівнює 12 км, то в умовах опадів такої інтенсивності вона скорочується до 5 км.

Зі збільшенням максимальної дальності виявлення у «хорошу» погоду відносний вплив опадів на виявлення зростає: для морського об'єкта, що має $R_0 = 80$ км, максимальна дальність виявлення в опадах скорочується вдвічі. За подальшого збільшення інтенсивності опадів їхній вплив на виявлення морських об'єктів ще більше зростає.

Слід зазначити, що у разі дощу із обзерненого снігу вплив на характеристики виявлення морських об'єктів закону розподілу крапель за розмірами вже суттєвий: дощ із розподілом крапель за розмірами за Шифриним сильніше позначається на погіршенні виявлення морських об'єктів, ніж дощ із розподілом за Литвиновим.

У разі дощу з необзерненого снігу в межах інтенсивностей від 0,1 до 3 мм/год вплив його на скорочення максимальної дальності виявлення морських об'єктів приблизно аналогічно впливу дощів, утворених з крупи та обзерненого снігу з розподілом крапель за Литвиновим. Істотна відмінність у впливі дощу з необзерненого снігу, порівняно з дощем іншої природи, спостерігається за опадів інтенсивністю 6 мм/год в разі виявлення морських об'єктів, у яких дальність виявлення в «хорошу» погоду $R_0 = 100$ км. Так, наприклад, якщо ціль у «хорошу» погоду виявлятиметься на дальностях близько 250 км, то в дощі з необзерненого снігу з інтенсивністю 6 мм/год вона вже виявлятиметься лише на дальностях близько 60 км.

Зміна інтенсивності опадів в інтервалі 6–10 мм/год мало позначається на виявленні морських об'єктів, у яких максимальна дальність виявлення в «хорошу» погоду мала і проявляється сильніше для об'єктів, у яких вона велика. Наприклад, у разі виявлення морського об'єкта, у якого максимальна дальність виявлення в «хорошу» погоду 100 км у таких опадах інтенсивністю 6 мм/год максимальна дальність його виявлення становить величину близько 35 км, а об'єкта з $R_0 = 200$ км ця дальність виявлення буде 45 км.

В опадах значної інтенсивності близько 30 мм/год особливо сильно позначається виявлення морських об'єктів, мають значні дальності виявлення в «хорошу» погоду. Наприклад, морський об'єкт, для якого $R_0 = 300$ км, у таких опадах виявлятиметься лише на дальностях близько 30 км.

Що стосується впливу закону розподілу крапель за розмірами, то слід зауважити, що у разі опадів, утворених шляхом танення необзерненого снігу, дощі з розподілом крапель за Шифриним мають сильніший вплив, ніж дощі з розподілом крапель за Литвиновим.

Перейдемо тепер до аналізу отриманих результатів у міліметровому діапазоні хвиль. У цьому діапазоні для дощу з крупни характерним є його однаковий вплив на скорочення максимальної дальності виявлення морських об'єктів незалежно від закону розподілу крапель за розмірами. Характер впливу інтенсивності опадів на зміну максимальної дальності виявлення морських об'єктів в цьому діапазоні хвиль такий самий, як і в 3 сантиметровому діапазоні. Однак у міліметровому діапазоні ступінь впливу значно сильніший.

У разі опадів інтенсивністю до 30 мм/год, утворених таненням обзерненого та необзерненого снігу, їх вплив на скорочення максимальної дальності виявлення морських об'єктів однаково. Однак за цих інтенсивностей має місце відмінність у впливі закону розподілу крапель за розмірами на ефективність виявлення морських об'єктів. Так, морські об'єкти, що виявляються в «хорошу» погоду на відстанях, що не перевищують 300 км, в опадах такої природи за інтенсивності 30 мм/год з розподілом крапель за розмірами за Литвиновим ще можуть бути виявлені на дальності близько 5 км, тоді як в опадах з розподілом крапель за Шифриним виявлені бути не можуть.

Атмосферні утворення крім скорочення максимальної дальності виявлення морських об'єктів можуть істотно впливати і на точність вимірювання дальності.

За наявності в атмосфері атмосферних утворень траєкторія поширення електромагнітних хвиль до радіолокаційної цілі і назад не проходить в чистій однорідній атмосфері, хоча насправді й чисту атмосферу не можна вважати ідеально однорідною через наявність у ній неоднорідностей, обумовлених турбулентним перемішуванням повітряних мас, а частково чи повністю проходить через атмосферні утворення. В результаті цього швидкість поширення радіохвиль по траєкторії не буде постійною, а матиме різні значення на різних ділянках. Внаслідок цього й матимуть місце помилки у вимірі дальності до морських об'єктів.

Оцінимо величину помилки вимірювання дальності за рахунок відмінностей у швидкостях поширення радіохвиль у гідрометеорах та в чистій атмосфері.

Нехай на траєкторії поширення радіолокаційних сигналів розташована атмосферне утворення, що має протяжність R_a вздовж лінії, що з'єднує суднову радіолокаційну станцію з морським об'єктом. І тут на ділянці траєкторії R_a час поширення електромагнітної хвилі до цілі і назад дорівнюватиме

$$t = 2 \int_0^{R_a} \frac{dR}{v(R_a)}, \quad (20)$$

де $v(R_a)$ – закон зміни швидкості поширення хвилі на даній ділянці траєкторії.

Різниця часів поширення хвилі в гідрометеорах та чистій атмосфері на цій ділянці буде

$$\Delta t = 2 \int_0^{R_a} \left[\frac{1}{v(R_a)} - \frac{1}{c} \right] dR, \quad (21)$$

де c – швидкість поширення хвилі у чистій атмосфері.

Помилка у визначенні дальності до об'єкта відповідно до (20) та (21) дорівнюватиме

$$\Delta R = \int_0^{R_a} \left[\frac{c}{v(R_a)} - 1 \right] dR = \int_0^{R_a} [n(R_a) - 1] dR, \quad (22)$$

де $n(R_a)$ – закон зміни коефіцієнта заломлення гідрометеорів трасою поширення радіохвиль.

У разі наявності на ділянці поширення сигналів однорідного середовища коефіцієнт заломлення якого по всій ділянці R_a однаковий, вираз для помилки набуває вигляду

$$\Delta R = (n - 1) R_a. \quad (23)$$

За наявності на трасі поширення радіохвиль кількох ділянок з різними значеннями коефіцієнта заломлення (20) може бути узагальнено і цей випадок

$$\Delta R = \sum_{i=1}^k (n_i - 1) R_{ai}. \quad (24)$$

З (23) і (24) випливає, що для того, щоб оцінити вплив атмосферних утворень на точність радіолокаційного вимірювання дальності суднової РЛС необхідно визначити межі зміни величини коефіцієнта заломлення для різних типів атмосферних утворень.

В результаті підстановки (17) (22) отримуємо співвідношення

$$\Delta R = \left[\frac{80}{1} \cdot 10^{-6} \left(P + \frac{4810}{T} \ell \right) + \frac{3}{2} \rho W \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right| \right] R_a. \quad (25)$$

У (25) перший доданок визначається вологим повітрям усередині атмосферного утворення, а другий – його аерозольною фракцією. Аналіз (25) показує, що за реальних водностей атмосферних утворень, тисках і температурах, доданок, зумовлений аерозольною фракцією, на три порядки менше доданку, обумовленого вологим повітрям і їм практично можна знехтувати. Таким чином, під час практичних розрахунків помилки виміру дальності за рахунок впливу атмосферних утворень можна користуватися співвідношенням для помилки, обумовленої лише впливом вологого повітря поклавши у ньому відносну вологість, що дорівнює 100%.

$$\Delta R = \frac{80}{1} \cdot 10^{-6} \left(P + \frac{4810}{T} \ell \right) R_a, \quad (25)$$

На рис. 8 представлені графіки залежностей величини помилки радіолокаційного визначення дальності суднової РЛС від протяжності шару гідрометеорів на трасі поширення радіохвиль для різних значень $(n - 1)$. Аналіз цих залежностей показує, що помилка у визначенні дальності за рахунок впливу гідрометеорів становить десятки і може сягати кількох сотень метрів, що в ряді випадків може з'явитися неприпустимим.

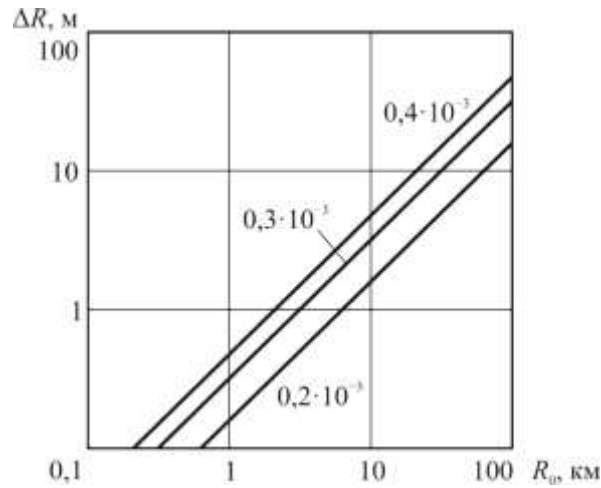


Рисунок 8. Залежність величини помилки радіолокаційного визначення дальності суднової РЛС

За необхідності обчислення сумарної помилки радіолокаційного визначення дальності суднової РЛС морських об'єктів, обумовленої впливом атмосфери та атмосферних утворень, необхідно користуватися виразом

$$\Delta R = \sum_{i=0}^K (n_i - 1) R_i + \sum_{j=0}^{\ell} (n_a - 1) R_j, \quad (25)$$

де n – коефіцієнт заломлення безхмарної атмосфери;

n_a – коефіцієнт заломлення атмосферних утворень;

K – кількість ділянок безхмарної атмосфери на трасі поширення радіохвиль;

ℓ – кількість ділянок з гідрометеорами;

R_i – протяжність ділянок безхмарної атмосфери;

R_j – протяжність гідрометеорів.

Висновки. Представлені залежності коефіцієнта заломлення атмосферних утворень від температури біля земної поверхні при різних висотах атмосферних утворень та показано, що коефіцієнт заломлення атмосферних утворень практично у всіх реальних випадках полягає в інтервалі значень $(n - 1) \cdot 10^{-6}$ від 100 до 500.

Показано, що зі збільшенням інтенсивності дощу як для діапазону 3 см, так і для 8 мм залежність величини коефіцієнта ослаблення від інтенсивності опадів за постійної температури для обох розподілів крапель за розмірами різко збільшується.

Показано вплив природи утворення опадів на коефіцієнт ослаблення в разі зміни їх інтенсивності – в діапазоні хвиль 3 см до інтенсивності опадів 30 мм/год коефіцієнт ослаблення в дощі з необзерненого снігу менший, ніж у дощі з крупи; зі збільшенням інтенсивності опадів коефіцієнт ослаблення дощу з крупи різко збільшується і стає вищим, ніж для дощів іншої природи; коефіцієнт ослаблення для дощу з необзерненого снігу різко зменшується у порівнянні з дощами іншої природи. Для 8 мм діапазону під час опадів до інтенсивності 10 мм/год велику величину має коефіцієнт ослаблення в разі дощу з оберненого снігу та меншу за дощ з крупи; за інтенсивності опадів понад 10 мм/год збільшується коефіцієнт ослаблення для дощу з крупи; менше значення має коефіцієнт

ослаблення в дощі з необзерненого снігу. Ця залежність спостерігається для обох розподілів крапель за розмірами.

Показано скорочення максимальної дальності радіолокаційного спостереження за рахунок атмосферних утворень на хвилях коротше 5 см, а саме в порівнянні 3 см і 8 мм діапазонів хвиль.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кобзарев Ю.Б. Современная радиолокация. Анализ, расчет и проектирование систем. М., 1969. 704 с.
2. А.А. Коростельев, Н.Ф. Ключев, Ю.А. Мельник и др. Теоретические основы радиолокации учебник для студ. радиотех. спец. вузов. М., 1978. 607 с.
3. Вильский Г. Б., Мальцев А. С., Бездольный В. В., Гончаров Е. И. Навигационная безопасность при лоцманской проводке судов. Одесса: «Феникс», 2007. 445 с.
4. Демиденко П. П. Судовые радиолокационные и радионавигационные системы. Одесса: «Феникс», 2009. 372 с.
5. Вагущенко В. В. Судовые навигационные информационные системы. Одесса: «Феникс», 2004. 302 с.
6. Морозов А. В. РЛС в судовождении. Одесса: ВПП «Друкарський дім», 2013. 464 с.
7. Козлов И. М. Параметры двухточечной статистической модели для Имитации сложного радиолокационного объекта. Вісті вищих учбових закладів. Радіоелектроніка, 43(6). С. 19-23.
8. Трофименко І. В. Визначення перспективних напрямків розвитку навігаційного забезпечення судноводіння з використанням радіолокаційних систем. НОВІТНІ технології. 2017. № 2. С. 29-42.
9. Путятин В. Г., Корбан Д.В., Князь А.И. Влияние осадков на разрешающую способность радиолокационной станции по угловым координатам. Реєстрація, зберігання і обробка даних. 2017. Т. 19, № 4. С. 26-34.
10. Иванов О. В. Распространение электромагнитных волн в анизотропных и бианизотропных слоистых структурах. Ульяновск : УлГТУ, 2010. 262 с.
11. Седлецкий Р. М. Эффективная площадь рассеяния идеально проводящих тел простейшей формы в средах с комплексной проницаемостью. Журнал Радиозлектроники. 2001. No 9. С. 1-4.
12. Yadnya M. S., Sudiartha I. W. Attenuation model from drop size distribution of rain for millimeter wave communication channel. 2017 11th International Conference on Telecommunication Systems Services and Applications (TSSA). IEEE, 2017. P. 1-4. <https://doi.org/10.1109/TSSA.2017.8272936>.
13. Veselovska G., Khlopov G. Modeling of scattering of electromagnetic waves by snow crystals. 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF). IEEE, 2017. P. 351-354. <https://doi.org/10.1109/YSF.2017.8126646>.
14. Norouzian F. Marchetti E., Gashinova M., et al. Rain attenuation at millimeter wave and low-THz frequencies. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2019. Vol. 68, No 1. P. 421-431. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2938735>.
15. Hong E., Lane S., Murrell D., et al. Terrestrial link rain attenuation measurements at 84 GHz. 2017 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM). IEEE, 2017. P. 1-2. <https://doi.org/10.1109/USNC-URSI-NRSM.2017.7878267>.
16. Grabner M., Pechac P., Valtr P. Analysis of propagation of electromagnetic waves in atmospheric hydrometeors on lowelevation paths. Radioengineering. 2018. Vol. 27, No 1. P. 29-33. <https://doi.org/10.13164/re.2018.0029>.

17. Nagel D. Detection of rain areas with airborne radar. 2017 18th International Radar Symposium (IRS). IEEE, 2017. P. 1-7. <https://doi.org/10.23919/IRS.2017.8008094>.
18. Averyanova Y., Rudi-akova A., Yanovsky F.J. Segregating deformation of scattering rain-drops using several receive antennas with different polarization angles. 2017 18th International Radar Symposium (IRS). IEEE, 2017. P. 1-6. <https://doi.org/10.23919/IRS.2017.8008260>.
19. Navarro K. M. M., Costa E., Rodriguez C.A.M., et al. Realistic rain model for the estimation of the rainfall rate from radar measurements. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2019. Vol. 67, No. 9. P. 6104-6114. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2921006>.
20. Setijadi E., Matsushima A., Tanaka N., et al. Effect of temperature and multiple scattering on rain attenuation of electromagnetic waves by a simple spherical model. Progress in Electromagnetics Research. 2009. Vol. 99. P. 339-354. <https://doi.org/10.2528/PIER09102609>.
21. Odedina M. O., Afullo T. J. Determination of rain attenuation from electromagnetic scattering by spherical raindrops: Theory and experiment. Radio Science. 2010. Vol. 45, Iss. 1, pp. 1-15. <https://doi.org/10.1029/2009RS004192>.

REFERENCES

1. Kobzarev U.B. Sovremennaya radiolokaciya. Analiz, raschet i proectirovanie sistem. M., 1969. 704 p.
2. Korostelev A.A., Kluev H.F., Melnik U.A. Teoreticheskie osnovi radiolokacii. M., 1978. 607 p.
3. Vil'skij G. B., Mal'cev A. S., Bezdol'nij V. V., Goncharov E. I. Navigacionnaya bezopasnost' pri loemanskoj provodke sudov [Navigational safety in ship pilotage]. Odessa: «Feniks», 2007. 445 p.
4. Demidenko P. P. Sudovye radiolokacionnye i radionavigacionnye sistemy [Shipborne radar and radio navigation systems]. Odessa: «Feniks», 2009. 372 p.
5. Vagushchenko V. V. Sudovye navigacionnye informacionnye sistemy [Ship navigation information systems]. Odessa: «Feniks», 2004. 302 p.
6. Morozov A. V. RLS v sudovozhdenii [Radar stations in navigation]. Odessa: VPP «Drukars'kij dim», 2013. 464 p.
7. Kozlov I. M. Parametry dvuhtocheknoj statisticheskoj modeli dlya imitacii slozhnogo radiolokacionnogo ob'ekta [Parameters of a Two-Point Statistical Model for Simulating a Complex Radar Object]. Visti vishchih uchbovih zakladiv. Radioelektronika, 43(6). P. 1923.
8. Trofimenko I. V. Vznachennya perspektivnih napryamkiv rozvitku navigacii nogo zabezpechennya sudnovodinnya z vikoristannyam radiolokacii nih sistem [Determination of perspective directions of navigation support development shipping with the use of radar systems]. Novitni tekhnologii. 2017. No. 2. P. 29-42.
9. Putyatin V. G., Korban D.V., Knyaz' A.I. Vliyanie osadkov na razreshayushchuyu sposobnost' radioiokacionno stancii po ugiovym koordinatam [Influence of precipitation on the resolution of the radar station in angular coordinates]. Reestraciya, zberigannya i obrobka danih. 2017. T. 19, No. 4. P. 26-34.
10. Ivanov O. V. Rasprostranenie elektromagnitnyh voln v anizotropnyh i bianizotropnyh sloistyh strukturah [Propagation of electromagnetic waves in anisotropic and bianisotropic layered structures]. Ul'yanovsk : UIGTU, 2010. 262 p.
11. Sedleckii R. M. Effektivnaya ploshchad' rasseyaniya ideal'no provodyashchih tel prosteishei

- formy v sredah s kompleksnoi pronicaemost'yu [Effective scattering area of ideally conducting bodies of the simplest shape in media with complex permeability]. Zhurnal Radioelektroniki. 2001. No 9. P. 1-4.
12. Yadnya M. S., Sudiarta I. W. Attenuation model from drop size distribution of rain for millimeter wave communication channel. 2017 11th International Conference on Telecommunication Systems Services and Applications (TSSA). IEEE, 2017. P. 1-4. <https://doi.org/10.1109/TSSA.2017.8272936>.
 13. Veselovska G., Khlopov G. Modeling of scattering of electromagnetic waves by snow crystals. 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF). IEEE, 2017. P. 351-354. <https://doi.org/10.1109/YSF.2017.8126646>.
 14. Norouzian F. Marchetti E., Gashinova M., et al. Rain attenuation at millimeter wave and low-THz frequencies. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2019. Vol. 68, No 1. P. 421-431. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2938735>.
 15. Hong E., Lane S., Murrell D., et al. Terrestrial link rain attenuation measurements at 84 GHz. 2017 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM). IEEE, 2017. P. 1-2. <https://doi.org/10.1109/USNC-URSI-NRSM.2017.7878267>.
 16. Grabner M., Pechac P., Valtr P. Analysis of propagation of electromagnetic waves in atmospheric hydrometeors on lowelevation paths. Radioengineering. 2018. Vol. 27, No 1. P. 29-33. <https://doi.org/10.13164/re.2018.0029>.
 17. Nagel D. Detection of rain areas with airborne radar. 2017 18th International Radar Symposium (IRS). IEEE, 2017. P. 1-7. <https://doi.org/10.23919/IRS.2017.8008094>.
 18. Averyanova Y., Rudi-akova A., Yanovsky F.J. Segregating deformation of scattering raindrops using several receive antennas with different polarization angles. 2017 18th International Radar Symposium (IRS). IEEE, 2017. P. 1-6. <https://doi.org/10.23919/IRS.2017.8008260>.
 19. Navarro K. M. M., Costa E., Rodriguez C.A.M., et al. Realistic rain model for the estimation of the rainfall rate from radar measurements. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2019. Vol. 67, No. 9. P. 6104-6114. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2921006>.
 20. Setijadi E., Matsushima A., Tanaka N., et al. Effect of temperature and multiple scattering on rain attenuation of electromagnetic waves by a simple spherical model. Progress in Electromagnetics Research. 2009. Vol. 99. P. 339-354. <https://doi.org/10.2528/PIER09102609>.
 21. Odedina M. O., Afullo T. J. Determination of rain attenuation from electromagnetic scattering by spherical raindrops: Theory and experiment. Radio Science. 2010. Vol. 45, Iss. 1, pp. 1-15. <https://doi.org/10.1029/2009RS004192>.

Revenko V. Yu.

COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF THE ATMOSPHERIC ENVIRONMENT ON THE CHANGE OF THE RADAR RANGE TO THE OBJECTS TO BE OBSERVED IN TWO WAVE RANGES BY SHIP RADAR

The radiophysical characteristics of the atmosphere and atmospheric formations, the influence of the conditions of propagation of radar signals on the range and accuracy of measuring the range of marine objects, the dependence of the magnitude of the error in the radar measurement of the range of a ship's radar station on the extent of the atmospheric formation are considered.

The contrast of the radar image of a marine object observed against the background of reflections from atmospheric formations, depending on the distance to the ship's radar antenna, is presented in relation to indicators with a brightness mark of shipborne radars. The analysis of the basic equation of radar of single objects is carried out, taking into account the change in their reflected power at a certain distance depending on the intensity of the atmospheric process.

The influence of atmospheric formation on the parameters of the echo signal of a marine object is analyzed. Depending on the parameters of the ship's radar, the echo signal of a marine object in precipitation of varying intensity will provide a different deviation of the signal strength of the object to the signal strength of the atmospheric formation, at which it is still possible to determine the distance to the marine object without creating an emergency, that is, at which it is still possible to fulfill the task of the ship's radar.

It is shown that in order to determine the maximum detection range of a marine object at the operating wavelength of a shipborne radar, it is sufficient to know only the ratio of the effective scattering area to the parameters of the atmospheric formation, mainly to the intensity of the atmospheric formation. Using these ratios for various reflective properties of an object and the reflective properties of an atmospheric formation, it is possible to predict the maximum distance to a marine object at a given intensity, which increases the safety of navigation in difficult atmospheric conditions.

Key words: *atmosphere, atmospheric formations, ship radar station, rainfall intensity, detection range, marine object, dielectric permittivity, radar observation.*