

УДК 551.508.85 (551.576 +551.577)

**В. Г. Путятин<sup>1</sup>, Д. В. Корбан<sup>2</sup>, А. И. Князь<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт проблем регистрации информации НАН Украины

ул. Н. Шпака, 2, 03113 Киев, Украина

<sup>2</sup>Национальный университет «Одесская Национальная Морская Академия»

ул. Дидрихсона, 8, 65029 Одесса, Украина

## **Влияние осадков на разрешающую способность радиолокационной станции по угловым координатам**

*Проведен анализ влияния выпадающего дождя на разрешающую способность судовой радиолокационной станции (РЛС) по угловым координатам, работающую в миллиметровом и сантиметровом диапазонах длин волн. Показано, что в сантиметровом диапазоне длин волн ( $\lambda = 3 \text{ см} \dots 10 \text{ см}$ ) имеет место улучшение разрешающей способности судовой РЛС по угловым координатам, а в миллиметровом диапазоне длин волн имеет место как улучшение разрешающей способности судовой РЛС по угловым координатам, так и ее ухудшение.*

**Ключевые слова:** угловые координаты, рассеяние, поглощение, излучение, функция рассеяния, разрешающая способность, диаграмма направленности антенны, границы раздела, телесный угол, судовая радиолокационная станция.

### **Введение**

Одна из важнейших проблем морского транспорта состоит в обеспечении безопасности судоходства, особенно в сложных метеорологических условиях, так как ее решение способствует уменьшению количества аварийных случаев и, как следствие, сохранению человеческих жизней, снижению нанесения вреда окружающей среде и перевозимому имуществу. Создаются предпосылки для возникновения аварийных ситуаций из-за плохой видимости в сильных снегопадах и интенсивных дождях, циклонических вихрях и торнадо. Маневрирование судов в таких погодных условиях становится сложным и опасным, особенно при одновременном расхождении нескольких судов, так как обеспечение требуемой точности контроля и прогноза места судна становится проблематичной. К настоящему времени разработаны математические модели оптимизации параметров водных путей в виде целевых функций, и результаты оптимизации имитационного моделирования поворота использованы на фарватере Свиноуйсце-Щецин, а также западного паромного причала Центрум в Свиноуйсце. Однако влияние метеороло-

© В. Г. Путятин, Д. В. Корбан, А. И. Князь

гических условий при движении судна в стесненных условиях и при выполнении различных маневров в данной модели не учтено [1].

Задача выбора оптимального маневра расхождения судов при опасных метеорологических условиях характеризуется высокой сложностью т.к. процесс управления движением судна является многомерным с нелинейными и нестационарными характеристиками. Проведенный В.М. Букатым анализ возможных критериев установления факта сближения судов, идущих прямо друг на друга противоположными курсами, показал, что невозможно уверенно судить ни по одному критерию об их сближении [2]. Попытка учета гидрометеорологических условий при управлении судном, сделанная В. Спеймен и К. Кримптон в работе [3], показала, что несмотря на внедрение в судостроение и судовождение самых передовых достижений науки, техники и технологий, количество аварий из-за экстремальных погодных условий, учет которых нивелируется при рассмотрении аварий, не уменьшается. Как отмечает В.А. Голиков, факторы морской стихии, а также быстрые по времени и значительные по величине изменения погодных условий не только повышают аварийность судов, но и оказывают отрицательное влияние на организм человека, что в итоге приводит к аварийным ситуациям [4].

При любых условиях внешней среды судовые РЛС обеспечивают постоянное наблюдение за окружающей обстановкой и производят измерения координат встречных судов, на точность которых влияют выпадающие интенсивные жидкие и твердые осадки. Поэтому оценка этого влияния повышает радиолокационный пеленг встречного судна и в итоге снижает аварийную ситуацию при неблагоприятных условиях среды.

В настоящее время в практику использования судовых РЛС начинают вводиться широкополосные сигналы, являющиеся наиболее информативным переносчиком радиолокационной информации о навигационных объектах на пути судна [1]. Это обусловлено сокращением периода времени  $T$ , за который судовой радиолокационный комплекс управляет судном, а сигналы должны донести экипажу всю необходимую информацию о наблюдаемой ситуации. Число состояний сигнала за этот промежуток времени должно быть не меньше разнообразия состояний наблюдаемой судовой РЛС транспортной ситуации. База сигналов при измерении только координатных параметров навигационных объектов судовой РЛС (дальности, скорости, угловых координат и т.д.) должна иметь значение  $B_f = T(f_n - f_0) = 10^7 - 10^9$ . Данная база сигналов позволяет судовым РЛС устойчиво функционировать в условиях мешающих воздействий и при наличии неблагоприятных метеоусловий на пути судна за счет присущей им высокой информационной избыточности. Но так как широкополосные сигналы обладают большими потенциальными возможностями при распознавании наблюдаемых судовой РЛС транспортных ситуаций, то за счет этого устраняется лишняя избыточность доставляемой экипажу судна радиолокационной информации, что улучшает управляемость, надежность и безопасность судна. Невзирая на то, что короткоимпульсные широкополосные сигналы судовых РЛС обеспечивают возможность высокого пространственного, углового и частотного разрешения, неблагоприятные метеорологические условия, в которых находится навигационный объект, влияют на разрешающую способность судовой РЛС по угловым координатам, которая характеризуется минимальной разностью углов места двух навигационных объектов

с одинаковыми дальностью и азимутом, при которых навигационные объекты наблюдаются раздельно.

Атмосферные образования на пути судна вносят ошибки в определении угловых координат навигационных объектов. До настоящего времени влияние облаков и осадков на разрешающую способность судовой РЛС по угловым координатам еще недостаточно исследовано, что не позволяет повысить точность измерения координат навигационных объектов в сложных ситуационных условиях окружающей среды. Судовые РЛС должны определять истинный курс судна, дальность нахождения навигационного объекта и его координаты в сложных метеоусловиях, килевой и бортовой качке, значительном поглощении и рассеянии радиоволн в тропосфере. Исследование влияния атмосферных образований на разрешающую способность судовой РЛС по угловым координатам является актуальной задачей, связанной с повышением безопасности судовождения.

Целью данной статьи является анализ влияния выпадающего дождя на разрешающую способность судовой РЛС по угловым координатам.

### Анализ решения задачи влияния выпадающего дождя на разрешающую способность судовой РЛС по угловым координатам

Для упрощения решения данной задачи атмосферные образования будем считать плоскопараллельной рассеивающей и поглощающей средой, удовлетворяющей рэлеевскому некогерентному рассеянию [2–5].

При облучении плоскопараллельного слоя выпадающих осадков монохроматической линейно поляризованной электромагнитной волной, излучаемой антенной судовой РЛС, происходит ее взаимодействие с частицами выпадающего дождя, что приводит к изменению мощности электромагнитной волны  $P(l, r)$  в некоторой точке  $l$  в направлении единичного вектора на расстоянии  $dr$ . Это изменение мощности можно представить в виде двух слагаемых:

$$dP(l, r) = -\overline{N\sigma_3}P(l, r)dr + \overline{N\sigma_p} \int P(l, r) f(r, r') d\omega'_r, \quad (1)$$

где  $\overline{N}$  — среднее число частиц в единице объема выпадающего дождя на пути судна;

$\overline{\sigma_3}$  — усредненная по всем размерам частиц дождя эффективная поверхность затухания;

$\overline{\sigma_p}$  — усредненная по всем размерам частиц дождя эффективная поверхность рассеяния;

$f(r, r')$  — нормированная угловая функция рассеяния;

$\omega'_r$  — элемент телесного угла рассеянного излучения в направлении  $r'$ .

В уравнении (1) первое слагаемое обусловлено затуханием волны за счет рассеяния и поглощения, а второе — соответствует рассеянию, за счет которого излучение в точку  $l$  приходит со всех сторон. Уравнение (1) можно представить в виде:

$$(r\nabla_l)P(l, r) = -\overline{N\sigma_3}P(l, r) + \overline{N\sigma_p} \int P(l, r) f(r, r') d\omega'_r. \quad (2)$$

Мощность излучения в точке  $l$  представим в виде суммы ослабленного падающего излучения  $P_{II}$  и излучения рассеянного  $P_p$ :

$$P(l, r) = P_{II}(l, r) + P_p(l, r). \quad (3)$$

Рассеянное излучение запишется в виде:

$$\begin{aligned} (r\nabla_l)P_p(l, r) = & -\overline{N\sigma_s}P_p(l, r) + \overline{N\sigma_p} \int P_p(l, r) f(r, r') d\omega'_r + \\ & + \overline{N\sigma_p} \int P_{II}(r') f(r, r') e^{-\overline{N\sigma_s}r'} d\omega'_r. \end{aligned} \quad (4)$$

В (4)  $r$  отсчитывается от границы раздела «атмосфера – зона выпадающего дождя».

Решение уравнения (4) возможно только при граничных условиях, выражающих отсутствие отражений от границы раздела, т.е.

$$P_p(n_{\perp} \geq 0) = 0, \quad (5)$$

где  $n_{\perp}$  — внутренняя нормаль к поверхности раздела.

Для рэлеевского рассеяния эффективные поверхности рассеяния и затухания сферических частиц, выпадающих осадков выражаются известными зависимостями [6]:

$$\sigma_p = \frac{128\pi^5 d^6}{3\lambda^4} \cdot \left| \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right|^2, \quad (6)$$

$$\sigma_s = \frac{24\pi^2 d^3}{\lambda} \cdot \frac{\varepsilon''}{(\varepsilon' + 2)^2 + (\varepsilon'')^2}, \quad (7)$$

где  $\varepsilon$  — комплексная диэлектрическая проницаемость вещества частиц выпадающих осадков;  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  — действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости частиц осадков;  $d$  — диаметр частицы;  $\lambda$  — длина волны, излучаемая антенной судовой РЛС.

Распределение частиц по размерам в выпадающих осадках определяется в соответствии с соотношением [7]:

$$\frac{dN}{dd} = A e^{-\frac{2d}{b}}, \quad (8)$$

где  $A = 0,08$ ;  $b = \frac{1}{41} I^{0,21}$  — коэффициент, зависящий от интенсивности  $I$  выпадающих осадков на пути судна.

Осреднение эффективных поверхностей рассеяния и затухания по всем размерам частиц в осадках можно представить следующими зависимостями:

$$\overline{N\sigma_p} = \frac{240\pi^5 b^7 A}{\lambda^4} \cdot \frac{(\varepsilon' - 1)^2 + (\varepsilon'')^2}{(\varepsilon' + 2)^2 + (\varepsilon'')^2}, \quad (9)$$

$$\overline{N\sigma_3} = \frac{9\pi^2 b^4 A}{\lambda} \cdot \frac{\varepsilon''}{(\varepsilon' + 2)^2 + (\varepsilon'')^2}. \quad (10)$$

Из (9) и (10) получим коэффициент  $q$ , являющийся отношением эффективной поверхности рассеяния к эффективной поверхности затухания, который запишется в виде:

$$q = \frac{10}{3} \left( \frac{2\pi b}{\lambda} \right)^3 \cdot \frac{(\varepsilon' - 1)^2 + (\varepsilon'')^2}{\varepsilon''}. \quad (11)$$

Для сантиметрового диапазона длин волн, на котором работают судовые РЛС, ослабление электромагнитной энергии значительно превышает рассеяние, т.е.  $q \ll 1$ , и с уменьшением длины волны значение  $q$  приближается к единице. Так как в сантиметровом диапазоне длин волн  $q \ll 1$ , то уравнение (4) может быть решено методом последовательных приближений, разлагая  $P_p(l, r)$  по степеням коэффициента  $q$ .

Для миллиметрового диапазона длин волн  $q \geq 1$  и решение уравнения (4) будет иметь другой вид.

При осесимметричной диаграмме направленности антенны судовой РЛС, ось симметрии которой совпадает с нормалью к поверхности раздела «атмосфера – слой дождя», для чисто рассеянного излучения можно записать:

$$\begin{aligned} \frac{dP_p(z, \theta)}{dz} \cos \theta = & -\overline{N\sigma_3} P_p(z, \theta) + \overline{N\sigma_p} \int_0^\pi \overline{P_p(z, \theta)} f_0(\theta, \theta') P_p(z, \theta) f_0(\theta, \theta') \sin \theta' d\theta' + \\ & + \overline{N\sigma_p} \int_0^{\frac{\pi}{2}} P_{II}(\theta') f_0(\theta, \theta') \cdot \exp\left(-\frac{\overline{N\sigma_3} z}{\cos \theta'}\right) \cdot \sin \theta' d\theta', \end{aligned} \quad (12)$$

где  $\theta$  — угол прихода падающего излучения относительно внешней нормали;  
 $\theta'$  — угол прихода рассеянного излучения относительно этой нормали;  
 $f_0(\theta, \theta')$  — угловая функция рассеяния, проинтегрированная в азимутальной плоскости;

$\overline{P_p(z, \theta)}$  — мощность излучения в дожде, проинтегрированная в горизонтальной плоскости.

Входящая в уравнение (12) угловая функция рассеяния определяется зависимостью

$$f_0(\theta, \theta') = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{3}{4} \left\{ 1 + [\cos \theta \cos \theta' + \sin \theta \sin \theta' \cdot \cos(\varphi - \varphi')] \right\} d\varphi', \quad (13)$$

где  $\varphi$  — случайный набег фазы слоя дождя;  $\varphi'$  — угол в азимутальной плоскости, отсчитываемый от оси  $X$  декартовой системы координат.

Представив суммарное излучение (12), состоящим из «нисходящего» ( $\cos \theta > 0$ ) и «восходящего» ( $\cos \theta < 0$ ) можно получить для него следующую систему уравнений:

$$\frac{dP_{P_+}(h, \theta)}{dh} \cos \theta = -P_{P_+}(h, \theta) + q \int_0^1 f_0(\theta, \theta') [P_{P_+}(h, \theta') + P_{P_-}(h, \theta')] d \cos \theta' + q \int_0^1 f_0(\theta, \theta') P_{\Pi}(\theta') e^{-\frac{h}{\cos \theta'}} d \cos \theta', \quad (14)$$

$$-\frac{dP_{P_-}(h, \theta)}{dh} \cos \theta = P_{P_-}(h, \theta) + q \int_0^1 f_0(\theta, \theta') [P_{P_+}(h, \theta') + P_{P_-}(h, \theta')] d \cos \theta' + q \int_0^1 f_0(\theta, \theta') P_{\Pi}(\theta') e^{-\frac{h}{\cos \theta'}} d \cos \theta', \quad (15)$$

где  $h = \overline{N\sigma_z}z$  — оптическая толщина слоя дождя по оси  $Z$ . Решение уравнений (14) и (15) выполняются при граничных условиях:

$$P_{P_+}(0, \theta) = P_{P_-}(0, \theta) = 0. \quad (16)$$

Тогда, с учетом граничных условий (16), решения уравнений (14) и (15) в первом приближении по коэффициенту  $q$  запишутся в виде:

$$P_{P_+}(h, \theta) = q \int_0^1 \frac{\cos \theta' f_0(\theta, \theta')}{\cos \theta - \cos \theta'} P_{\Pi}(\theta') \left[ e^{-\frac{h}{\cos \theta}} - e^{-\frac{h}{\cos \theta'}} \right] d \cos \theta', \quad (17)$$

$$P_{P_-}(h, \theta) = q \int_0^1 \frac{\cos \theta' f_0(\theta, \theta')}{\cos \theta - \cos \theta'} P_{\Pi}(\theta') e^{-\frac{h}{\cos \theta'}} \left[ 1 - e^{(h-h')\left(\frac{1}{\cos \theta} + \frac{1}{\cos \theta'}\right)} \right] d \cos \theta', \quad (18)$$

где  $h' = \overline{N\sigma_s}H$  — оптическая толщина слоя осадков протяженностью  $H$ .

Так как прошедший через слой дождя радиосигнал представляет собой сумму из ослабленного падающего излучения и излучения, рассеянного частицами выпадающего дождя, то суммарное излучение будет иметь следующее угловое распределение:

$$P(h, \theta) = P_{\Pi}(\theta) e^{-\frac{h}{\cos \theta}} + q \int_0^1 \frac{\cos \theta' f_0(\theta, \theta')}{\cos \theta - \cos \theta'} P_{\Pi}(\theta') \left[ e^{-\frac{h}{\cos \theta}} - e^{-\frac{h}{\cos \theta'}} \right] d \cos \theta'. \quad (19)$$

С учетом того, что в сантиметровом диапазоне длин волн  $q \ll 1$ , все экспоненты в (19) можно разложить в ряд по коэффициенту  $q$ . После разложения и удержания первых двух членов уравнение (19) запишется в виде:

$$P(h, \theta) = P_{\Pi}(0) \left( 1 - \frac{h}{\cos \theta} \right) + \frac{hq}{\cos \theta} \int_0^1 f_0(\theta, \theta') P_{\Pi}(\theta') d \cos \theta'. \quad (20)$$

У радиолокационных судовых антенн с узкими диаграммами направленности ( $\theta_0$ ) только в небольшом диапазоне углов  $\theta$  падающее излучение отлично от нуля, и имеет место неравенство:

$$\cos \theta_0 \leq \cos \theta \leq 1. \quad (21)$$

С учетом (21) входящий в (20) интеграл является плавной функцией угла  $\theta$  и записывается следующим образом:

$$\int_0^1 f_0(0,0) P_{II}(\theta') d \cos \theta' = f(0,0) P_{II}(0, -\cos \theta_0). \quad (22)$$

Запишем условие, при котором находится изменение полуширины диаграммы направленности антенны судовой РЛС:

$$P(h, \theta) = \frac{1}{2} P(h, 0). \quad (23)$$

Подставив (23) в (22), получим изменение полуширины диаграммы направленности антенны судового радиолокатора в виде

$$\Delta \theta = -\frac{h}{2} \left( \theta_{1/2}^2 - \frac{3}{4} q \beta \right) |\operatorname{ctg} \delta|, \quad (24)$$

где  $\theta_{1/2}$  — ширина диаграммы направленности падающего излучения по точкам половинной мощности;  $\beta$  — полуширина диаграммы направленности, рассчитанная по нулям;  $\delta$  — угол наклона касательной к диаграмме направленности  $P_{II}(\theta)$  в точке половинной мощности.

Из анализа (24) следует, что при выполнении условия

$$q < \frac{4\theta_{1/2}^2}{3\beta^2} \quad (25)$$

улучшается разрешающая способность антенны по угловым координатам во всем сантиметровом диапазоне длин волн, на которых работают судовые РЛС.

При использовании в судовых РЛС миллиметрового диапазона длин волн исходным уравнением является следующая зависимость:

$$\begin{aligned} \frac{dP(h, \theta)}{dh} \cos \theta = & P(h, \theta) + q \int_0^1 P(h, \theta') f_0(\theta, \theta') d \cos \theta' + \\ & + q \int_0^1 f_0(\theta, \theta') F(\theta') e^{-\frac{h}{\cos \theta'}} d \cos \theta', \end{aligned} \quad (26)$$

где  $F(\theta')$  — нормированная диаграмма направленности антенны судового радиолокатора.

Решение уравнения (26) также производится при граничных условиях (5) методом последовательных приближений по малым значениям параметра  $h$ .

Роль многократного рассеяния будет мала при  $h \ll 1$  и поэтому достаточно только учесть рассеяние первого порядка. Тогда угловое распределение излучения, которое проходит сквозь слой дождя, описывается следующей приближенной зависимостью:

$$P(h, \theta) = F(\theta') e^{-\frac{h}{\cos \theta}} + q P_1(h, \theta), \quad (27)$$

где  $P_1(h, \theta)$  для прошедшего через слой дождя и отраженного от него излучения задается с помощью следующих уравнений:

— при  $\cos \theta > 0$ :

$$P_1(h, \theta) = \int_{-1}^{+1} \frac{\cos \theta' f_0(\theta, \theta')}{\cos \theta' - \cos \theta} \cdot \left( e^{-\frac{h}{\cos \theta'}} - e^{-\frac{h}{\cos \theta}} \right) d \cos \theta'; \quad (28)$$

— при  $\cos \theta \leq 0$ :

$$P_1(h, \theta) = \int_{-1}^{+1} \frac{\cos \theta' f_0(\theta, \theta') F(\theta')}{\cos \theta' - \cos \theta} \cdot \left[ 1 - e^{-h \left( \frac{1}{\cos \theta} - \frac{1}{\cos \theta'} \right)} \right] d \cos \theta'. \quad (29)$$

Изменение полуширины диаграммы направленности антенны судовой РЛС при прохождении излучения сквозь слой выпадающего дождя определяется из условия (23).

С учетом того, что в рассматриваемой области углов  $\cos \theta \leq 1$  и полагая острую диаграмму направленности антенны  $F(\theta')$  судовой РЛС, разложение в ряд компоненты, содержащей параметр  $h$ , позволяет получить выражение, характеризующее изменение полуширины диаграммы направленности антенны в виде:

$$\Delta \theta_{1/2} = -\frac{h}{4} \theta_{1/2}^2 \left[ 1 - \frac{q}{2} f(0) \right] |\operatorname{ctg} \delta|, \quad (30)$$

где  $f(0)$  — значение угловой функции рассеяния с учетом рассеяния «вперед» ( $\cos \theta = 1$ );  $\theta_{1/2}^2$  — ширина диаграммы направленности антенны до прохождения слоя дождя.

Анализ (30) показывает, что в миллиметровом диапазоне длин волн при прохождении излучением слоя дождя возможно как улучшение разрешающей способности судовой РЛС по угловым координатам, так и ее ухудшение, т.е.:

- при  $\frac{q}{2} f(0) < 1$  будет иметь место улучшение разрешающей способности;
- при  $\frac{q}{2} f(0) > 1$  будет иметь место ухудшение разрешающей способности.

Так как в миллиметровом диапазоне длин волн  $q > 1$  и  $f(0) < 1$ , то здесь всегда будет наблюдаться ухудшение разрешающей способности судовой РЛС по угловым координатам.

Для реальных случаев при различной интенсивности выпадающих осадков на пути судна и технических параметров судовой РЛС ухудшение разрешающей способности по угловым координатам может достигать 10 %.

## Выводы

Проведенный анализ влияния выпадающего дождя на разрешающую способность судовой РЛС по угловым координатам показал следующее:



1) улучшение разрешающей способности по угловым координатам в сантиметровом диапазоне длин волн;

2) в миллиметровом диапазоне длин волн будет иметь место как улучшение разрешающей способности по угловым координатам, так и ее ухудшение в зависимости от рассеивающих и ослабляющих свойств осадков на пути судна.

1. Гуцма С.Ф. Моделирование движения судна в узкостях и при швартовках. *Сб. науч. тр. Балт. гос. акад. рыбопромысл. флота*. 1997. № 16. С. 85–91.

2. Букатый В.М., Морозова С.Ю. Определение ситуации сближения судов, подпадающей под правило 14 МППСС-72. Управление безопасностью мореплавания и подготовка морских специалистов SSN/2007: Материалы 6 Международной конференции (9–11 окт. 2007 г., Калининград). Калининград: БГАРФ, 2007. С. 43–52.

3. Das risiko in begegnungssituationen. *Hansa*. 1988. 125. N 19. P. 1219–1222.

4. Голиков В.А. Повышение эффективности и оптимизация режимов работы систем судового микроклимата: дис. докт. техн. наук. Одесса, 2000. 408 с.

5. Авишев В.Б., Козлов А.И., Сарычев В.А. Анализ преобразований поляризации структуры сигналов в информационном канале транспортных РЭК. В кн.: Поляризация сигналов в сложных транспортных радиоэлектронных комплексах/под ред. и с предисл. А.И. Козлова, В.А. Сарычева. Санкт-Петербург: Хронограф, 1994. 460 с.

6. Бин Б.Р., Даттон Е. Дж. Радиометеорология/пер. с англ. под ред. А.А.Семенова. Ленинград: Гидрометеоздат, 1971. 362 с.

7. Колосов М.А., Шабельников А.В. Рефракция электромагнитных волн в атмосферах Земли, Венеры и Марса. Москва: Сов. радио, 1976. 220 с.

8. Теоретические основы радиолокации: учеб. пособ. для ВУЗов/под ред. В.Е. Дулевича. Изд. 2-е, перераб. и доп. — Москва: Сов. радио, 1978. 608 с.

9. Красюк Н.П., Коблов В.Л., Красюк В.Н. Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС. Москва: Радио и связь, 1988. 213 с.

10. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии. Ленинград: Гидрометеоздат, 1966. 350 с.

11. Матвеев Л.Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. Ленинград: Гидрометеоздат, 1965. 875 с.

Поступила в редакцию 29.11.2017