

УДК 551.508.85 (551.576 + 551.577)

**В. Г. Путятин¹, С. Ю. Гуденко², С. И. Заичко²,
Д. В. Корбан², А. И. Князь²**

¹Институт проблем регистрации информации НАН Украины
ул. Н. Шпака, 2, 03113 Киев, Украина

²Национальный университет «Одесская Национальная Морская Академия»
ул. Дидрихсона, 8, 65029 Одесса, Украина

Радиофизическая модель отражающего объема тропосферы

Рассмотрена радиофизическая модель тропосферы, представляющая собой уравнение связи радиофизических параметров тропосферы с поляризационными параметрами электромагнитной волны, излучаемой и принимаемой антенной судовой радиолокационной станции. Радиофизическая модель позволяет на пути судна по измеренным градиентам показателя преломления определить вид траектории распространения электромагнитной волны, влияющей на радиолокационное обнаружение навигационных объектов.

Ключевые слова: радиофизическая модель, тропосфера, параметры Стокса, градиент коэффициента преломления тропосферы, неполяризованная волна линейной и круговой поляризации, коэффициенты матрицы.

Введение

В настоящее время практически все морские суда имеют в своем арсенале радиолокационную станцию (РЛС). По большому счету, судовые РЛС предназначены для безопасности плавания. Их задача обнаружить любой надводный объект, а также берег в любых погодных условиях и избежать столкновения с ним. В условиях ограниченной видимости (ночь, туман, шторм) радиолокационная станция помогает продолжать безопасный ход судна. Судовые РЛС позволяют измерять направления и расстояния до окружающих объектов в условиях плохой видимости. Благодаря этим свойствам, РЛС широко используется для определения места судна, обеспечения плавания в узкости и расхождения с другими судами. В настоящее время современные судовые РЛС получают информацию о навигационных объектах с помощью электромагнитных волн определенного диапазона [1]. Тропосферная рефракция изменяет направление распространения электромагнит-

ной волны, излучаемой антенной судовой РЛС, что приводит при определенных значениях вертикального градиента показателя преломления тропосферы [2] к обнаружению судовой РЛС (*необнаружение эхо-сигнала от цели в течение нескольких (например, семи) последовательных оборотов антенны*) навигационных объектов на пути судна. С целью повышения безопасности судовождения возникает необходимость в измерении вертикального градиента показателя преломления тропосферного воздуха судовой РЛС.

Радиофизические модели, связывающие радиофизические параметры тропосферы с параметрами излученной антенной судовой РЛС и отраженной от навигационных объектов волн, авторам не известны, или они отсутствуют [3–5].

Целью статьи является обоснование возможности использования модели тропосферы и алгоритма ее реализации для повышения безопасности судовождения.

Радиофизическая модель, реализующая алгоритм измерения вертикального градиента тропосферного воздуха

Определение. Тропосфера — пространство, лежащее на высоте порядка 15 км от поверхности земли; представляет собой неоднородную среду, свойства которой под действием метеорологических условий изменяются во времени, и которая характеризуется не только постепенным уменьшением коэффициента преломления с высотой, но и обладает локальными неоднородностями. Плавная неоднородность тропосферы приводит к искривлению траекторий распространяющихся в ней радиоволн, что способствует огибанию радиоволнами выпуклостей земного шара. От локальных неоднородностей возможно рассеяние радиоволн длиной волны короче 10 м, что приводит к возможности связи на расстоянии до 1000 км от передатчика. Тропосфера — самый нижний слой атмосферы, толщина которого над полюсами составляет 8–10 км, в умеренных широтах — 10–12 км, а над экватором — 16–18 км. В средних широтах тропосфера простирается до высоты около 11 км. Основная характеристика тропосферы — это коэффициент преломления $n = \sqrt{\varepsilon_{mp}}$, где ε_{mp} — относительная диэлектрическая проницаемость тропосферы. Этот коэффициент незначительно отличается от единицы и уменьшается с высотой над Землей (с высотой уменьшается температура и давление). В связи с этим радиоволны испытывают рефракцию (искривление траектории радиоволны). Поэтому движение радиоволны отклоняется от прямолинейной траектории, т.е. радиоволна либо приближается к Земле (положительная рефракция), либо от нее удаляется (отрицательная рефракция). Явление рефракции в тропосфере объясняется изменением диэлектрической проницаемости ε и соответственно показателя преломления n с высотой.

Определение. Тропосферная рефракция (tropospheric refraction) — рефракция, происходящая в тропосфере — рассеяние, преломление и поглощение радиоволн в атмосфере. Обычно это происходит с волнами УКВ диапазонов. Благодаря рефракции возможна дальняя связь на УКВ на расстояния, значительно превышающие расстояние прямого распространения радиоволн. Рефракция может происходить на разных высотах, начиная от 1–2 км в атмосфере до 20–50 км в тропосфере. Тропосферное распространение УКВ за счет рефракции возможно относительно постоянно, и часто используется соответствующими службами для даль-

ней связи на УКВ. Рефракция, происходящая в нормальной тропосфере, называется нормальной тропосферной рефракцией.

На пути судна с помощью судовой РЛС до настоящего времени не измеряются как высотный профиль показателя преломления, так и его градиент, по значению которых и определяется траектория распространения электромагнитной волны, излучаемой антенной судовой РЛС при радиолокационном наблюдении навигационных объектов. Задача радиолокационного наблюдения тесно связана с эффективным использованием радиофизического пространства на пути судна, участвующего в формировании дистанционной информации не только о навигационном объекте, но и параметрах окружающей его среды. Радиофизическая среда при определенных условиях изменяет траекторию распространения электромагнитной волны, что может привести к необнаружению не только навигационного объекта, но и других опасных объектов, влияющих на безопасность судовождения. Так как основным радиофизическим параметром тропосферы является показатель преломления, вертикальный градиент которого оказывает влияние на траекторию распространения электромагнитной волны при наблюдении навигационных объектов судовой РЛС, возникает необходимость в рассмотрении радиофизической модели, связывающей параметры электромагнитной волны при ее распространении в тропосфере с параметрами тропосферы.

При экспериментальном подходе к исследованию радиофизического состояния тропосферы большое значение приобретает физико-математическая модель, позволяющая описать сложный физический процесс рассеяния электромагнитных волн реальными отражающими неоднородностями показателя преломления тропосферного воздуха на пути судна.

Рассмотрим уравнение связи радиофизических параметров тропосферы с поляризационными параметрами электромагнитной волны, распространяющейся в тропосфере в виде матрицы, в которой параметры электромагнитной волны на излучение и прием представлены параметрами Стокса (параметрами, используемыми для описания состояния поляризации электромагнитных волн, введенных Дж.Г. Стоксом (G.G. Stokes) в 1852), а коэффициенты матрицы представляют градиенты показателя преломления, измеренные при различных поляризациях облучаемой волны. Радиофизическая модель отражающего объема тропосферы выглядит следующим образом:

$$\begin{bmatrix} I_{np} \\ Q_{np} \\ U_{np} \\ V_{np} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{dN}{dH}\right)_{11} & \left(\frac{dN}{dH}\right)_{12} & \left(\frac{dN}{dH}\right)_{13} & \left(\frac{dN}{dH}\right)_{14} \\ \left(\frac{dN}{dH}\right)_{21} & \left(\frac{dN}{dH}\right)_{22} & \left(\frac{dN}{dH}\right)_{23} & \left(\frac{dN}{dH}\right)_{24} \\ \left(\frac{dN}{dH}\right)_{31} & \left(\frac{dN}{dH}\right)_{32} & \left(\frac{dN}{dH}\right)_{33} & \left(\frac{dN}{dH}\right)_{34} \\ \left(\frac{dN}{dH}\right)_{41} & \left(\frac{dN}{dH}\right)_{42} & \left(\frac{dN}{dH}\right)_{43} & \left(\frac{dN}{dH}\right)_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{изл} \\ Q_{изл} \\ U_{изл} \\ V_{изл} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $I_{изл}, Q_{изл}, U_{изл}, V_{изл}$ и $I_{пр}, Q_{пр}, U_{пр}, V_{пр}$ — параметры Стокса принимаемой и излучаемой электромагнитной волны соответственно; $\frac{dN}{dH}_{11...44}$ — вертикальные градиенты показателя преломления тропосферы (N — показатель преломления; H — высота измерения, м).

Для измерения 16-ти вертикальных градиентов показателя преломления объем тропосферного воздуха необходимо последовательно облучить:

а) неполяризованной волной с параметрами Стокса излучаемой волны $I_{изл}^I, Q_{изл}^I, U_{изл}^I, V_{изл}^I$ и параметрами Стокса принимаемой волны $I_{пр}^I, Q_{пр}^I, U_{пр}^I, V_{пр}^I$;

б) волной линейной вертикальной поляризации ($I_{изл}^{II}, Q_{изл}^{II}, U_{изл}^{II}, V_{изл}^{II}$ и $I_{пр}^{II}, Q_{пр}^{II}, U_{пр}^{II}, V_{пр}^{II}$);

в) волной линейной поляризации с наклоном электрического вектора под углом 45° ($I_{изл}^{III}, Q_{изл}^{III}, U_{изл}^{III}, V_{изл}^{III}$ и $I_{пр}^{III}, Q_{пр}^{III}, U_{пр}^{III}, V_{пр}^{III}$);

г) волной круговой поляризации ($I_{изл}^{IV}, Q_{изл}^{IV}, U_{изл}^{IV}, V_{изл}^{IV}$ и $I_{пр}^{IV}, Q_{пр}^{IV}, U_{пр}^{IV}, V_{пр}^{IV}$).

В принципе можно использовать набор и других поляризаций облучающей волны.

Законы прохождения радиолокационного сигнала опишем матричным произведением:

$$I_{пр} = \left(\frac{dN}{dH}\right)_{11} I_{изл} + \left(\frac{dN}{dH}\right)_{12} Q_{изл} + \left(\frac{dN}{dH}\right)_{13} U_{изл} + \left(\frac{dN}{dH}\right)_{14} V_{изл}, \quad (2)$$

$$Q_{пр} = \left(\frac{dN}{dH}\right)_{21} I_{изл} + \left(\frac{dN}{dH}\right)_{22} Q_{изл} + \left(\frac{dN}{dH}\right)_{23} U_{изл} + \left(\frac{dN}{dH}\right)_{24} V_{изл}, \quad (3)$$

$$U_{пр} = \left(\frac{dN}{dH}\right)_{31} I_{изл} + \left(\frac{dN}{dH}\right)_{32} Q_{изл} + \left(\frac{dN}{dH}\right)_{33} U_{изл} + \left(\frac{dN}{dH}\right)_{34} V_{изл}, \quad (4)$$

$$V_{пр} = \left(\frac{dN}{dH}\right)_{41} I_{изл} + \left(\frac{dN}{dH}\right)_{42} Q_{изл} + \left(\frac{dN}{dH}\right)_{43} U_{изл} + \left(\frac{dN}{dH}\right)_{44} V_{изл}. \quad (5)$$

Для исследования радиофизического состояния тропосферы на пути судна с целью решения задачи идентификации на определенной высоте величины градиента показателя преломления необходимо определить все коэффициенты матрицы, характеризующие радиофизическое состояние тропосферы.

Дистанционное радиолокационное измерение градиентов показателя преломления тропосферы на пути судна выполним путем последовательного облучения электромагнитной волной четырех фиксированных поляризаций исследуемого объема тропосферы:

- 1) неполяризованной волной;
- 2) волной линейной вертикальной поляризации;
- 3) волной линейной поляризации с наклоном электрического вектора под углом 45° ;
- 4) волной круговой поляризации.

Можно использовать набор и других поляризаций облучающей волны.

При облучении объема тропосферы неполяризованной волной при наличии в ней градиентов температуры и влажности, получим первые четыре вертикальных градиента показателя преломления тропосферы. Показатель преломления атмосферы существенным образом зависит от таких метеопараметров как: температура, давление, удельная влажность, водность облаков и интенсивность осадков. Указанные метеопараметры изменяются случайным образом, а показатель преломления атмосферы N является функцией температуры T , влажности q и давления воздуха P . Практический интерес представляют статистические характеристики связи показателя преломления с определяющими его метеопараметрами.

Матрицы излучаемой, отраженной волны, и градиентов показателя преломления запишутся в виде:

$$\begin{bmatrix} I_{изл} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} I_{np} \\ Q_{np} \\ U_{np} \\ V_{np} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \left(\frac{dN}{dH}\right)_{11} & 0 & 0 & 0 \\ \left(\frac{dN}{dH}\right)_{21} & 0 & 0 & 0 \\ \left(\frac{dN}{dH}\right)_{31} & 0 & 0 & 0 \\ \left(\frac{dN}{dH}\right)_{41} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

После перемножения трех матриц в (6) получим четыре уравнения, позволяющие определить первый столбец градиентов показателя преломления тропосферы:

$$I_{np}^I = \left(\frac{dN}{dH}\right)_{11} I_{изл}^I, \quad (7)$$

$$Q_{np}^I = \left(\frac{dN}{dH}\right)_{21} I_{изл}^I, \quad (8)$$

$$U_{np}^I = \left(\frac{dN}{dH}\right)_{31} I_{изл}^I, \quad (9)$$

$$V_{np}^I = \left(\frac{dN}{dH}\right)_{41} I_{изл}^I. \quad (10)$$

По значениям измеренных параметров Стокса принимаемой волны и известным параметрам Стокса излучаемой волны получаем:

$$\left(\frac{dN}{dH}\right)_{11} = \frac{I_{np}^I}{I_{изл}^I}, \quad (11)$$

$$\left(\frac{dN}{dH}\right)_{21} = \frac{Q_{np}^I}{I_{изл}^I}, \quad (12)$$

$$\left(\frac{dN}{dH}\right)_{31} = \frac{U_{np}^I}{I_{изл}^I}, \quad (13)$$

$$\left(\frac{dN}{dH}\right)_{41} = \frac{V_{np}^I}{I_{изл}^I}. \quad (14)$$

Для получения второго столбца коэффициентов $\frac{dN}{dH}$ матрицы (1) необходимо излучить электромагнитную волну линейной вертикальной поляризации. Для линейно поляризованной волны, излучаемой антенной судовой РЛС в направлении n_i , вектор поляризации обозначим через e , который составляет с вектором направления n_i угол α и является единичным вещественным вектором.

Для линейно поляризованной волны эффективная площадь σ рассеяния единицы объема тропосферы запишется в виде:

$$\sigma = \gamma \sigma_{ск}, \quad (15)$$

где $\sigma_{ск}$ — скалярная эффективная поверхность рассеяния (ЭПР); γ — поляризационный множитель, связанный с углом α зависимостью:

$$\gamma = \sin^2 \alpha \quad (16)$$

или в общем виде:

$$\gamma = 1 - (n_i e)^2, \quad (17)$$

С учетом (16) ЭПР единицы объема тропосферы равна:

$$\sigma = \sigma_{ск} \sin^2 \gamma. \quad (18)$$

Множитель $\sin^2 \gamma$ обращается в нуль в направлениях, коллинеарных с e , что связано с дипольным характером рассеяния электромагнитной волны в каждом элементе рассеивающего объема тропосферы.

Определение. Вектора, параллельные одной прямой или лежащие на одной прямой называют коллинеарными векторами.

Для линейно поляризованной волны вертикальной поляризации параметры Стокса запишутся в виде:

$$\begin{bmatrix} I_{изл}^{II} \\ Q_{изл}^{II} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

а уравнение (1) при этом представим следующим образом:

$$\begin{bmatrix} I_{np}^{II} \\ Q_{np}^{II} \\ U_{np}^{II} \\ V_{np}^{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{dN}{dH}\right)_{11} & \left(\frac{dN}{dH}\right)_{12} & \left(\frac{dN}{dH}\right)_{13} & \left(\frac{dN}{dH}\right)_{14} \\ \left(\frac{dN}{dH}\right)_{21} & \left(\frac{dN}{dH}\right)_{22} & \left(\frac{dN}{dH}\right)_{23} & \left(\frac{dN}{dH}\right)_{24} \\ \left(\frac{dN}{dH}\right)_{31} & \left(\frac{dN}{dH}\right)_{32} & \left(\frac{dN}{dH}\right)_{33} & \left(\frac{dN}{dH}\right)_{34} \\ \left(\frac{dN}{dH}\right)_{41} & \left(\frac{dN}{dH}\right)_{42} & \left(\frac{dN}{dH}\right)_{43} & \left(\frac{dN}{dH}\right)_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{изл}^{II} \\ Q_{изл}^{II} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

После перемножения двух матриц получаем четыре линейных уравнения:

$$I_{np}^{II} = \left(\frac{dN}{dH}\right)_{11} I_{изл}^{II} + \left(\frac{dN}{dH}\right)_{12} Q_{изл}^{II}, \quad (21)$$

$$Q_{np}^{II} = \left(\frac{dN}{dH}\right)_{21} I_{изл}^{II} + \left(\frac{dN}{dH}\right)_{22} Q_{изл}^{II}, \quad (22)$$

$$U_{np}^{II} = \left(\frac{dN}{dH}\right)_{31} I_{изл}^{II} + \left(\frac{dN}{dH}\right)_{32} Q_{изл}^{II}, \quad (23)$$

$$V_{np}^{II} = \left(\frac{dN}{dH}\right)_{41} I_{изл}^{II} + \left(\frac{dN}{dH}\right)_{42} Q_{изл}^{II}. \quad (24)$$

С учетом того, что $Q_{изл}^{II} = I_{изл}^{II}$, получим градиенты показателя преломления второго столбца матрицы (20):

$$\left(\frac{dN}{dH}\right)_{12} = \frac{I_{omp}^{II}}{I_{изл}^{II}} - \left(\frac{dN}{dH}\right)_{11}, \quad (25)$$

$$\left(\frac{dN}{dH}\right)_{22} = \frac{Q_{omp}^{II}}{I_{изл}^{II}} - \left(\frac{dN}{dH}\right)_{21}, \quad (26)$$

$$\left(\frac{dN}{dH}\right)_{32} = \frac{U_{omp}^{II}}{I_{изл}^{II}} - \left(\frac{dN}{dH}\right)_{31}, \quad (27)$$

$$\left(\frac{dN}{dH}\right)_{42} = \frac{V_{omp}^{II}}{I_{изл}^{II}} - \left(\frac{dN}{dH}\right)_{41}. \quad (28)$$

Излучая электромагнитную волну линейной поляризации с наклоном электрического вектора под 45° , получим градиенты показателя преломления третьего столбца матрицы (20).

Для третьего случая запишем матрицу излучаемой волны:

$$\begin{bmatrix} I_{изл}^{III} \\ 0 \\ U_{изл}^{III} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (29)$$

И по аналогии с предыдущим решением получим градиенты показателя преломления третьего столбца матрицы (1):

$$\left(\frac{dN}{dH}\right)_{13} = \frac{I_{omp}^{III}}{I_{изл}^{III}} - \left(\frac{dN}{dH}\right)_{11}, \quad (30)$$

$$\left(\frac{dN}{dH}\right)_{23} = \frac{Q_{omp}^{III}}{I_{изл}^{III}} - \left(\frac{dN}{dH}\right)_{21}, \quad (31)$$

$$\left(\frac{dN}{dH}\right)_{33} = \frac{U_{omp}^{III}}{I_{изл}^{III}} - \left(\frac{dN}{dH}\right)_{31}, \quad (32)$$

$$\left(\frac{dN}{dH}\right)_{43} = \frac{V_{omp}^{III}}{I_{изл}^{III}} - \left(\frac{dN}{dH}\right)_{41}. \quad (33)$$

Для получения четвертого столбца градиентов показателя преломления будем излучать электромагнитную волну круговой поляризации, у которой мощность компонент P_1 и P_2 электромагнитной волны определена из условия [6–9]:

$$P_1 = \pm \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad P_2 = \pm \frac{1}{\sqrt{2}},$$

где (+) — правое направление вращения вектора;
(–) — левое направление вращения вектора.

Поляризационный множитель волны γ запишется следующим образом:

$$\gamma = 1 - \frac{1}{2}(\cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \alpha_2), \quad (34)$$

где угол α_1 — угол между единичным вектором e_1 и n_i ; α_2 — угол между единичным вектором e_2 и n_i .

В силу взаимной ортогональности векторов e_1 , e_2 и n_i можно записать:

$$\cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \alpha_2 + \cos^2 Q = 1.$$

Исходя из этого, для волны круговой поляризации поляризационный множитель зависит только от угла рассеяния Q , т.е.:

$$\gamma = \frac{1}{2}(1 + \cos^2 Q). \quad (35)$$

Тогда матрица излученной волны запишется в виде:

$$\begin{bmatrix} I_{изл}^{IV} \\ 0 \\ 0 \\ V_{изл}^{IV} \end{bmatrix}. \quad (36)$$

По аналогии с предыдущими определениями коэффициентов матрицы (1) находим градиенты показателя преломления четвертого столбца:

$$\left(\frac{dN}{dH}\right)_{14} = \frac{I_{omp}^{IV}}{I_{изл}^{IV}} - \left(\frac{dN}{dH}\right)_{11}, \quad (37)$$

$$\left(\frac{dN}{dH}\right)_{24} = \frac{Q_{omp}^{IV}}{I_{изл}^{IV}} - \left(\frac{dN}{dH}\right)_{21}, \quad (38)$$

$$\left(\frac{dN}{dH}\right)_{34} = \frac{U_{omp}^{IV}}{I_{изл}^{IV}} - \left(\frac{dN}{dH}\right)_{31}, \quad (39)$$

$$\left(\frac{dN}{dH}\right)_{44} = \frac{V_{omp}^{IV}}{I_{изл}^{IV}} - \left(\frac{dN}{dH}\right)_{41}. \quad (40)$$

При оперативной работе судовой РЛС можно ограничиться излучением электромагнитной волны одной из четырех рассмотренных поляризаций и получением любого градиента показателя преломления матрицы (1).

Если измеренное значение $\frac{dN}{dH} > 0$ (N — растет с высотой), то траектория радиолуча обращена выпуклостью к морской поверхности, отрицательная рефракция приведет к необнаружению навигационных объектов.

Если измеренное значение градиента показателя преломления $\frac{dN}{dH} < 0$, то имеет место положительная рефракция, при которой траектория радиолуча обращена выпуклостью вверх от морской поверхности, что приведет к увеличению дальности прямой видимости навигационных объектов, однако при этом образуется область радиотени, где навигационный объект не обнаруживается.

Если измеренное значение градиента показателя преломления $\frac{dN}{dH} = -0,04 \text{ 1/м}$ (показатель преломления изменяется по линейному закону), то присутствует нормальная рефракция, а траектория радиолуча имеет вид окружности радиусом 2500 км.

Если измеренное значение градиента показателя преломления $\frac{dN}{dH} = -0,157 \text{ 1/м}$ радиолуч распространяется параллельно земной (водной) поверхности, а радиус радиолуча равен радиусу Земного шара 6370 км, то наблюдается критическая рефракция.

При $\frac{dN}{dH} > -0,157 \text{ 1/м}$ траектория радиолуча параллельна морской поверхности.

Если $\left(-0,04 < \frac{dN}{dH} < -0,157\right) \text{ 1/м}$, наблюдается повышенная дальность радиолокационного обнаружения навигационных объектов.

При угле излучения антенны судовой РЛС $Q = 0$, кривизна траектории луча равна $\frac{1}{R_3}$, а K_p кривизна его относительно водной поверхности определяется из условия [7, 8]:

$$K_p = -\frac{1}{R_s} - \frac{dN}{dH}, \quad (41)$$

где R_s — радиус Земли.

Из (41) видно, что траектория является прямой линией, а знак минус означает определение траектории относительно прямой линии.

Информация о градиенте показателя преломления поступает на вход приемника судовой РЛС от объема тропосферы, заключенного между пространственной протяженностью импульса $h = \frac{c\tau_u}{2}$ и диаграммой направленности антенны.

Поэтому целесообразно получать информацию о градиенте показателя преломления от всего объема при различных сочетаниях амплитуд и фаз эхо-сигнала, что позволяет последовательное излучение и прием электромагнитной волны четырех приведенных поляризаций.

Научные исследования выполнялись в рамках госбюджетной НИР «Теоретические основы гарантированной безопасности судоходства в территориальном море, внутренних водах и портах Украины» (2010–2012 гг.) № ДР 0110U00280, а также 7-й рамочной транспортной программой Европейского союза проект MOWE – IT «Управление погодными явлениями в транспортной сфере» № ДР 0114U000343 (2012–2014 гг.), грант № 314506.

Выводы

1. Представленная радиофизическая модель тропосферы представляет собой уравнение связи радиофизических параметров тропосферы с поляризационными параметрами электромагнитной волны, излучаемой и принимаемой антенной судовой РЛС. Модель отражающих свойств тропосферы основана на взаимодействии электромагнитной волны, представленной на излучение и прием параметрами Стокса, с радиофизическими параметрами отражающего объема, позволяющая по эхо-сигналам определить вертикальный градиент показателя преломления, изменяющий траекторию электромагнитной волны при наблюдении навигационных объектов. Радиофизическая модель позволяет на пути судна по измеренным градиентам показателя преломления определить вид траектории распространения электромагнитной волны, влияющей на радиолокационное обнаружение навигационных объектов.

2. Обоснована возможность использования модели тропосферы и алгоритма ее реализации для повышения безопасности судоходства.

1. Байрашевский А.М., Ничипоренко Н.Т. Судовые радиолокационные системы. Москва: Транспорт, 1982. 311 с.

2. Справочник по радиолокации. Т. 1. Основы радиолокации; пер. с англ.: под ред. Я.С. Ицхоки. Москва: Сов. радио. 1976. 456 с.

3. Заичко С.И., Князь А.И. Радиофизические характеристики атмосферы над морской поверхностью. *Судоходство: сб. науч. трудов*. Одесса: ОНМА, 2013. С. 123–134.

4. Князь А.И. Совершенствование методов и средств дистанционного наблюдения навигационных объектов на пути судна. Дисс. ... канд. техн. наук. ОНМА. Одесса, 2015. 196 с.
5. Карлов Д.В., Мисайлов В.Л., Петрушенко Н.Н., Окунев О.О., Луковский О.Я., Титков П.В. Модель пространственного распределения коэффициента преломления нижнего слоя тропосферы вблизи морской береговой черты. *Системы обработки інформації*. 2004. № 5(33). С. 82–87.
6. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. Ленинград: Гидрометеиздат, 1981. 583 с.
7. *Поляризация сигналов в сложных транспортных радиоэлектронных комплексах*; под ред. Вице президентов Академии транспорта А.И. Козлова и В.А. Сарычева. Санкт-Петербург: Хронограф, 1994. 460 с.
8. Довиак Р., Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. Ленинград: Гидрометеиздат, 1988. 511 с.
9. Hofmann-Wellenhoff В., Lichtenegger Н., Collins J. Global Positioning System. Theory and Practice. 2-nd ed. Springer-Verlag. Wien. New York. 326 p.

Поступила в редакцию 25.08.2017