

Оценка возможности прогнозирования рефракции радиоволн

А. Д. Кузнецов¹, В. Ю. Жуков², В. С. Никитина¹

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет
192007, г. Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79.

E-mail: rector@rshu.ru

² Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13.

E-mail: vra@mil.ru

В работе производится оценка влияния метеорологических параметров на тип рефракции в нижних слоях атмосферы Земли. Рассчитаны значения погрешностей, вносимых рефракцией, при определении координат гипотетической цели методом радиолокации. Установлено, что наибольшее влияние на погрешности оказывают нижние слои атмосферы. Проведен натурный эксперимент по определению пространственной связи между коэффициентами преломления на двух близлежащих метеорологических станциях с целью оценить радиус корреляции коэффициентов преломления. Сделаны выводы о возможном способе учета влияния распределения метеорологических параметров на искривление радиолуча в нижних слоях атмосферы.

Ключевые слова: радиолокация, радиолокационные наблюдения рефракция, траектория радиолуча, погрешности определения координат цели, статистическая обработка данных, численное моделирование, натурные эксперименты.

Assessing the possibility of predicting radio wave refraction

A. D. Kuznetsov¹, V. Yu. Zhukov², V. S. Nikitina¹,

¹ Russian State Hydrometeorological University

² A. F. Mozhaisky Military Aerospace Academy

This paper evaluates the influence of meteorological parameters on the type of refraction in the lower layers of the Earth's atmosphere. The values of errors introduced by refraction are calculated when determining the coordinates of a hypothetical target using the radar method. It has been established that the lower layers of the atmosphere have the greatest influence on errors. A full-scale experiment was conducted to determine the spatial relationship between refractive indices at two nearby meteorological stations in order to estimate the correlation radius of refractive indices. Conclusions are drawn about a possible way to take into account the influence of the distribution of meteorological parameters on the curvature of the radio beam in the lower layers of the atmosphere.

Keywords: radar, radar observations, refraction, radio beam trajectory, errors in determining target coordinates, statistical data processing, numerical modeling, full-scale experiments.

Введение

Известно, что электромагнитная волна претерпевает трансформацию под влиянием среды, в которой она распространяется. В частности, одной из главных задач радиолокации является определение и учет влияния метеорологических параметров на трансформацию радиолуча в атмосфере. Так, при определении координат целей методом радиолокации, истинное месторасположение наблюдаемого объекта может определяться с погрешностью, вносимой различными типами рефракции. Одной из отраслей, в которых эта проблема стоит наиболее остро, является метеорология, поскольку именно изменчивостью рефракции обуславливаются погрешности,

возникающие при обнаружении зарождающихся грозных облаков. Данные погрешности могут привести к некачественному прогнозу, что впоследствии может нанести урон сельскохозяйственной отрасли, а также оказать деструктивное влияние на жизненный уровень населения.

До настоящего времени при производстве радиолокационных наблюдений и решении задач радиолокации пользуются стандартной радиоатмосферой, в которой градиент коэффициента преломления равен константе [1, 2, 3]. Однако, также известно [4 5], что значения коэффициента преломления являются функцией метеорологических параметров, высотные распределения которых могут существенно различаться в зависимости от времени суток, времени года и т.д. Пространственно-временная изменчивость метеорологических параметров может существенно влиять на дальность обнаружения объектов радиолокационным методом, на появление ложных целей и на появление погрешностей при зондировании окружающей среды методом радиолокации. Таким образом, для качественных и более точных радиолокационных наблюдений необходима точная информация о типе рефракции в каждом конкретном случае. Целью данной работы является определение и оценка влияния распределения метеопараметров на трансформацию радиолуча в тропосфере Земли.

Расчет корреляции коэффициентов преломления

Установлено, что наибольшее влияние на траекторию распространения радиолуча в атмосфере оказывает распределение характеристик влажности в атмосфере [1]. В работе [6] приводится оценка данных, полученных с двух доплеровских метеорологических локаторов – ДМРЛ Валдай и ДМРЛ Воейково, расстояние между которыми по прямой составляет 325 км, и зоны обзора которых перекрываются. Согласно данному исследованию, можно сделать вывод о том, что координаты одной и той же цели, полученные по данным двух локаторов, имеют расхождения. Данный факт подтверждает наличие погрешностей, которые могут быть вызваны влиянием изменчивости профилей коэффициента преломления по траектории распространения луча локатора в атмосфере. Поскольку в ряде случаев расхождения наблюдаются достаточно большие, можно сделать вывод о том, что профили распределения коэффициентов преломления в зоне обзора каждого из вышеперечисленных локаторов не имеют пространственной связи между собой. Поэтому можно с уверенностью говорить о том, что именно большая изменчивость метеорологических характеристик атмосферы порождает разные условия распространения луча локатора. Это в свою очередь влияет на траекторию луча. Следовательно, можно сделать вывод о том, что это влияние должно быть в дальнейшем учтено для получения качественной информации об интересующих нас объектах.

Для оценки степени пространственной связи между значениями индексов коэффициентов преломления на двух близлежащих станциях (Бологое и Санкт-Петербург) был проведен анализ корреляции этих коэффициентов. Расстояние между станциями составляет 313 км. Рядом с этими станциями находятся ДМРЛ, упомянутые ранее. Для анализа были использованы данные о распределении метеорологических параметров за летние месяцы 2022 года в 00:00 и 12:00 по Всемирному времени. С помощью специальной программы, разработанной авторами, высотные профили метеопараметров были преобразованы в высотные профили индекса коэффициента преломления с использованием известной методики, описанной в работе [6], по следующей формуле [1]:

$$N = (n - 1)10^6 = \frac{78}{T} \left(p + \frac{4800e}{T} - \frac{e}{7} \right) \quad (1)$$

где n – коэффициент преломления;

N – индекс коэффициента преломления ($N = (n - 1) * 10^6$);

p – атмосферное давление;

e – парциальное давление водяного пара;

T – температура.

Далее был выполнен расчет коэффициента корреляции между значениями индекса коэффициента преломления на двух разных высотах: 500 м и 2000 м. Нижняя граница высоты была выбрана с учетом доверия к данным о распределении метеорологических величин, полученных с радиозонда. Верхняя граница, равная 2000 м, была выбрана из-за интереса к изменчивости влажности, так как 80% водяного пара в атмосфере находится в пределах этой высоты. Известно [1], что коэффициент преломления наиболее чувствителен к изменчивости влажности. Результаты исследования представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значения коэффициентов корреляции для индексов коэффициентов преломления на аэрологических станциях Санкт-Петербург и Бологое

R, Бологое-Санкт-Петербург		
H, м	00Z	12Z
500	0,01	-0,06
2000	0,14	-0,04

Результаты анализа, представленные в таблице 1, указывают на отсутствие пространственной связи между индексами коэффициента преломления на двух станциях. Это подтверждает предположение, которое было выдвинуто в работе [6] о неизбежном влиянии изменчивости метеопараметров на траекторию луча в атмосфере при проведении радиолокационных наблюдений. Для предотвращения потери качества данных и возникновения больших погрешностей в определении координат целей, рекомендуется рассматривать траектории луча для каждого локатора отдельно и учитывать распределение параметров погоды в атмосфере.

Следует отметить, что, согласно работе [6] максимальное значение погрешностей при определении координат целей методом радиолокации, вносимых различными типами рефракции, наблюдается в нижнем слое атмосферы. Именно тропосфера, являющаяся «фабрикой погоды» и отличающаяся большими градиентами метеорологических величин, оказывает наибольшее влияние на трансформацию радиолуча. Соответственно, рефракция и метеопараметры, на нее главным образом влияющие, должны быть учтены особенно в нижних слоях атмосферы при производстве радиолокационных наблюдений.

Оценка пространственной зависимости между значениями индекса коэффициента преломления в тропосфере

С целью объективной оценки возможности учета погрешностей, возникающих при различных типах рефракции в тропосфере, а также прогноза типа рефракции по прогностическим данным о распределении метеовеличин был проведен натурный эксперимент, который заключался в определении корреляции между значениями индекса коэффициента преломления на двух близлежащих метеорологических станциях, расположенных на одинаковой высоте, равной 30 м. Такая высота была выбрана, исходя из того, что в слое атмосферы высотой до 10 м, согласно данным, представленным в работе [7], практически всегда наблюдается свэрхрефракция, и до дальности 10 км радиолуч находится в зоне слабых градиентов. Следовательно, для решения задачи о прогнозировании типа рефракции по известным распределениям метеорологических параметров и определения погрешностей, которые рефракция вносит в

радиолокационные измерения, необходима информация о значениях метеорологических величин в слое 20 – 80 м.

Расчет проводился по данным о суточном распределении метеорологических параметров за некоторые месяцы 2023 года с шагом 5 минут, полученным с автоматических метеорологических станций, находящихся в одинаковых физико-географических условиях, расстояние между которыми составляет 7,79 км по прямой.

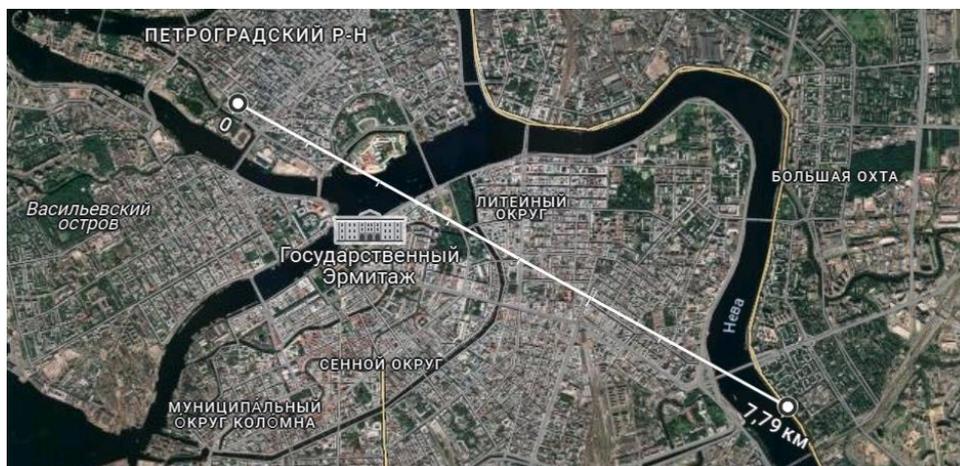


Рис. 1. Географическое расположение автоматических метеорологических станций, с которых были получены данные о суточном распределении метеовеличин

По известным профилям распределения метеорологических величин были рассчитаны значения индекса коэффициента преломления для каждой из двух станций и построены суточные профили.

Расчет проводился следующим образом. Прежде всего известные значения температуры пересчитывались в значения давления насыщения водяного пара по формуле Магнуса [4, 5]:

$$E = E_0 * 10^{\frac{7,63(T-273,15)}{T}}, \quad (2)$$

где E – давление насыщения водяного пара;

E_0 – давление насыщения водяного пара при температуре 0°C ;

T – температура воздуха в Кельвинах.

Затем рассчитывались значения парциального давления с использованием выражения [4, 5]:

$$e = \frac{f * E}{100}, \quad (3)$$

где f – относительная влажность воздуха.

Затем, с использованием формулы (1) производился расчет суточных профилей индекса коэффициента преломления для двух станций и далее определялась пространственная корреляция данных значений. Полученные в результате значения коэффициентов корреляции представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2. Значения коэффициентов корреляции для некоторых месяцев 2023 года

Месяц	04	05	06	07	08	09	10	11	12
R	0,36	0,85	0,80	0,63	0,25	0,83	0,18	0,7	0,96

Таблица 3. Значения коэффициентов корреляции для некоторых месяцев 2024 года

Месяц	01	02
R	0,99	0,19

Анализируя полученные результаты, нетрудно сделать вывод о том, что наблюдаются как месяцы с высоким коэффициентом корреляции, так и с очень малым. Такой результат можно объяснить зависимостью значения коэффициентов корреляции от степени стабильности атмосферы. Например, в период, характеризующийся большим количеством дней с относительно стабильной атмосферой, (например, находящейся во власти устойчивого антициклона) коэффициенты корреляции достигают высоких значений. Это связано с тем, что такая метеорологическая ситуация благоприятствует высокой пространственной связи между значениями метеопараметров и, следовательно, коэффициентов преломления, поскольку исключает большие градиенты и турбулентные перемешивания. И напротив, в случае, когда наблюдаются большое количество дней, в течение которых атмосфера находилась в нестабильном состоянии, (например, при прохождении фронта, фронтальных или внутримассовых гроз, осадков и т.д.) наблюдаются очень малые значения коэффициентов корреляции. Это объясняется тем, что при штормовой ситуации в атмосфере наблюдаются большие градиенты метеовеличин и турбулентные потоки, которые препятствуют образованию пространственных связей между метеовеличинами, а, следовательно, и между коэффициентами преломления.

Наглядным подтверждением вышеизложенных фактов является график зависимости значений коэффициентов корреляции от количества дней, в течение которых атмосфера находилась в стабильном состоянии.

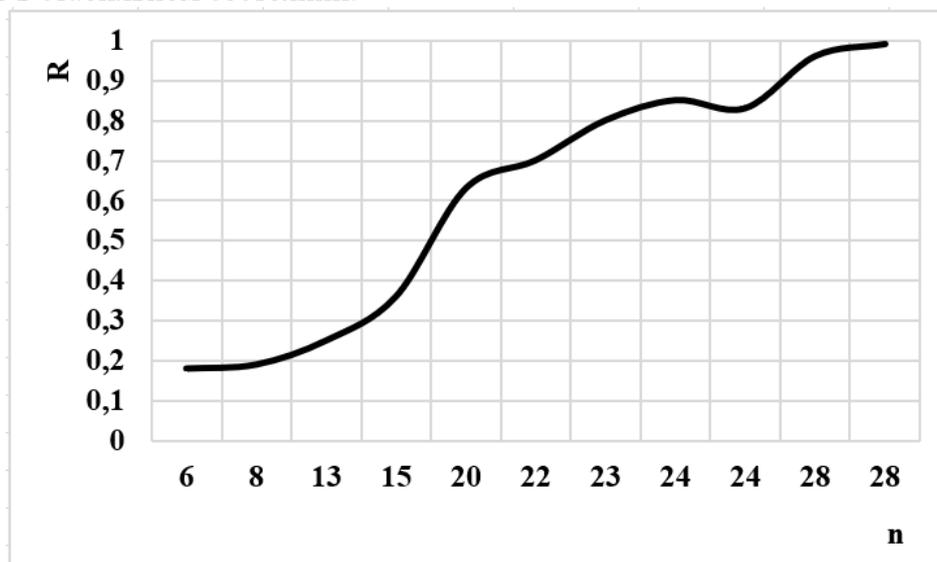


Рис. 2. График зависимости значения коэффициента корреляции от количества дней со стабильной атмосферой

Принимая во внимание практически линейную зависимость, показанную на рис. 2, можно с уверенностью сказать, что именно состоянием атмосферы, определяется пространственная связь между значениями индекса коэффициента преломления на двух станциях. Значит, при наличии информации о распределении метеорологических величин в конкретных точках, можно говорить о наличии или отсутствии пространственной связи между коэффициентами преломления в этих же точках. Следовательно, можно делать выводы о типе рефракции в интересующих нас областях, а также о возможном прогнозе различных типов рефракции в радиусе, где коэффициент

корреляции остается значимым. В качестве рекомендации можно предложить расположить метеостанцию в непосредственной близости от радиолокационной станции с целью получения точного профиля данных о распределении метеопараметров в атмосфере и их изменчивости, а также внедрить в блок обработки данных алгоритм учета погрешностей, вносимых различными типами рефракции.

Оценка погрешностей определения значений индекса коэффициента преломления, вносимых приборами для измерения метеопараметров

С целью оценить вклад погрешностей в рассчитанные значения индекса коэффициента преломления, были рассчитаны дисперсии данных величин для каждого месяца. Было установлено, что в случаях, когда атмосфера находилась в штормовом состоянии, значения дисперсий меньше, чем в случае стабильной атмосферы. В связи с этим было выдвинуто предположение о том, что именно погрешности при определении метеопараметров в атмосфере влияют на значение величины дисперсии.

Согласно теории погрешностей [8], если числа a и b являются приближениями к точным аргументам A и B с абсолютными погрешностями Δa и Δb и $Z = f(A, B)$, $z = f(a, b)$ и если функция f дифференцируема в точке (a, b) , то абсолютная погрешность функции при учете погрешностей аргументов равна:

$$\Delta_z = |f'_x(a, b)|\Delta_a + |f'_y(a, b)|\Delta_b \quad (4)$$

Применяя это к формуле для расчета коэффициента преломления (формула 1), получим, что частные производные по каждой из величин, от которых зависит значение N , будут определяться по формулам:

$$\frac{\partial N}{\partial T} = -\frac{78p}{T^2} - \frac{748800e}{T^3} + \frac{78e}{7T^2}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial N}{\partial e} = \frac{374400}{T^2} - \frac{78}{7T}; \quad (6)$$

$$\frac{\partial N}{\partial p} = \frac{78}{T}. \quad (7)$$

Тогда, согласно формуле (1), погрешность значений индекса коэффициента преломления будет определяться выражением:

$$N = \left(\frac{78p}{T^2} + \frac{748800e}{T^3} + \frac{78e}{7T^2}\right)\Delta T + \left(\frac{374400}{T^2} + \frac{78}{7T}\right)\Delta e + \left(\frac{78}{T}\right)\Delta p, \quad (8)$$

где ΔT и Δp – абсолютные погрешности измерения температуры и давления, указанные в паспорте станции;

Δe – абсолютная погрешность парциального давления водяного пара.

Учитывая, что $e = k(t, f, E)$, определим погрешность парциального давления как:

$$\Delta e = e'(f)\Delta f + e'(E)\Delta E, \quad (9)$$

где ΔE – абсолютная погрешность давления насыщения водяного пара;

f – относительная влажность в процентах.

Абсолютную погрешность давления насыщения можно определить, с учетом формулы (2), следующим образом:

$$\Delta E = E'(T) * \Delta T, \quad (10)$$

где T и ΔT – значения температуры и абсолютной погрешности температуры соответственно.

Принимая во внимание формулу (3) и учитывая, что:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial T} &= E_0 * 10^{\frac{7,63T-2084,1345}{T}} * \ln 10 * \frac{7,63T-(7,63T-2084,1345)}{T^2} \\ &= 14,05 * 10^{\frac{7,63T-2084,1345}{T}} * \frac{2084,1345}{T^2}, \end{aligned} \quad (11)$$

где E_0 – давление насыщенного пара при температуре 0 градусов Цельсия;

$$E_0 = 6,1078 \text{ гПа.}$$

Определим выражение для нахождения абсолютной погрешности парциального давления водяного пара:

$$\Delta e = \frac{E}{100} * \Delta f + \left(14,05 * 10^{\frac{7,63T-2084,1345}{T^2}} * \frac{2084,1345}{T^2} \right) \Delta E \quad (12)$$

Далее была произведена оценка вклада каждого из слагаемых уравнения (1) в суммарную погрешность определения индекса коэффициента преломления. Для прежде всего расчет был произведен для стандартных условий при $T = 293,15 \text{ К}$, $p = 1013 \text{ гПа}$, $\Delta T = 0,2$, $\Delta p = 0,5 \text{ гПа}$, $f = 60\%$, $\Delta f = 3\%$, $E = 23,4 \text{ гПа}$, $e = 14,04 \text{ гПа}$.

Тогда абсолютная погрешность определения температуры равна:

$$\begin{aligned} \left(\frac{78p}{T^2} + \frac{748800e}{T^3} + \frac{78e}{7T^2} \right) \Delta T &= \left(\frac{78 * 1013}{85936,9225} + \frac{10513152}{25192408,83} + \frac{1095,12}{601558,4575} \right) * 0,2 \\ &= (0,92 + 0,42 + 0,00182) * 0,2 = 1,34 * 0,2 = 0,268; \end{aligned} \quad (13)$$

Абсолютная погрешность определения влажности и давления соответственно:

$$\left(\frac{374400}{T^2} + \frac{78}{7T} \right) \Delta e = \left(\frac{374400}{85936,9225} + \frac{78}{2045,05} \right) * 0,7802 = 3,43; \quad (14)$$

$$\left(\frac{78}{T} \right) \Delta p = \left(\frac{78}{293,15} \right) * 0,5 = 0,133. \quad (15)$$

Расчеты показали, что значения абсолютных погрешностей величин, функцией которых является индекс коэффициента преломления, имеют разные порядки, но тем не менее сопоставимы. Из этого можно сделать вывод, что данные погрешности требуют учета при производстве расчетов профилей индекса коэффициента преломления и дальнейшей обработке результатов наблюдений.

Заключение

При оценке пространственной связи между профилями значений индекса коэффициента преломления по данным о распределении метеовеличин, полученных с метеостанций, расположенных на расстоянии около 8 км друг от друга, было установлено, что значения коэффициентов корреляции зависят от метеорологических условий в исследуемой области.

Установлена линейная зависимость между значениями коэффициентов корреляции и количеством дней, когда атмосфера находилась в спокойном состоянии. Это может послужить подтверждением того, что значения коэффициента преломления, а значит и тип рефракции, зависят от фактического распределения метеовеличин в атмосфере.

Даны рекомендации по возможному учету типа рефракции посредством установки метеостанции в непосредственной близости возле локатора, что позволит учитывать

изменчивость метеопараметров в интересующей области, а также в пределах радиуса корреляции значений коэффициента преломления.

Были сделаны выводы о необходимости учета абсолютных погрешностей, возникающий при измерении метеорологических параметров в атмосфере. Рассчитаны значения погрешностей при стандартных условиях и сделаны выводы о том, что полученные величины сопоставимы между собой и требуют учета при работе с профилями распределения метеорологических параметров.

Литература

1. Степаненко В. Д. Радиолокация в метеорологии (Радиометеорология) – Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1966. – 350 с.
2. Аренберг А. Г. Распространение дециметровых и сантиметровых волн – М.: Издательство «Советское радио», 1957 – 303 с.
3. Колосов М. А., Шабельников А. В. Рефракция электромагнитных волн в атмосферах Земли, Венеры и Марса – М.: Издательство «Советское радио», 1976 – 218 с.
4. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы – Л.: - Гидрометеиздат, 1984. – 751 с.
5. Тверской П. Н. Курс метеорологии (физика атмосферы). – Л.: - Гидрометеиздат, 1962. – 700 с.
6. Моделирование влияния рефракции на определение координат цели при производстве радиолокационных наблюдений / Жуков В. Ю., Кузнецов А. Д., Никитина В. С. // Труды Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, выпуск 688, 2023 г. – С. 55-61.
7. Модель пространственно-временного поля индекса преломления приземного слоя атмосферы / Акулиничев Ю. П., Новиков А. В. // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2010. – С. 36-44.
8. Ларионов А.Н., Ларионова Н.Н., Чернышев В.В. Погрешности измерения физических величин. – М.: - Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2009. – 50 с.