

Моделирование влияния рефракции на траекторию распространения радиоволн в атмосфере

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

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

Представлены результаты анализа влияния распределения метеорологических параметров в атмосфере на погрешности в определении координат целей по данным, полученным в зонах перекрытия двух метеорологических радиолокаторов. Приведен расчет пространственной связи между значениями коэффициентов преломления на близлежащих аэрологических станциях. Предложена аналитическая модель хода радиолуча в атмосфере, позволяющая выполнить оценку влияния типа рефракции на траекторию хода луча в различных слоях атмосферы. Предложен возможный способ учета влияния распределения метеорологических параметров на искривление радиолуча в нижних слоях атмосферы.

Ключевые слова: радиолокационные наблюдения, радиорефракция, коэффициент преломления, погрешности определения координат цели, траектория радиолуча.

Refraction influence modeling on the radio waves trajectory in the atmosphere

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

¹ *Russian State Hydrometeorological University Tomsk State University.*

² *A. F. Mozhaisky Military Aerospace Academy*

Analysis results of the meteorological parameters distribution in the atmosphere on the errors in determining targets coordinates from data obtained in the overlap zones of two meteorological radars are presented. The calculation of the spatial relationship between the values of the refractive indices at nearby aerological stations is given. An analytical model of the radiobeam path, which makes it possible to evaluate the influence of the type of refraction on the trajectory of the path of the beam in various layers of the atmosphere, is proposed. A possible method for taking into account the influence of the distribution of meteorological parameters on the curvature of the radio beam in the lower layers of the atmosphere is proposed.

Keywords: radar observations, radio refraction, refractive index, errors in determining target coordinates, radio beam trajectory.

Введение

В настоящее время при решении радиолокационных задач одной из главных проблем является искривление траектории электромагнитной волны средой, в которой данная волна распространяется. Так, при определении координат целей методом радиолокации, истинное месторасположение наблюдаемого объекта может определяться с погрешностью, вносимой различными типами рефракции. Особенно остро эта проблема находит свое отражение в метеорологии, поскольку именно изменчивость рефракции до сих пор является препятствием для своевременного и качественного обнаружения зарождающихся грозных облаков.

По сей день при производстве радиолокационных наблюдений и решении задач радиолокации пользуются стандартной радиоатмосферой [1, 2, 3], в которой градиент

коэффициента преломления равен константе. Однако, как известно [4, 5], атмосфера Земли не является статичным объектом, а характеризуется изменчивостью описывающих ее параметров. В разных областях атмосферы особенно велика изменчивость метеорологических параметров. Согласно исследованиям [1, 6], именно изменчивость метеорологических параметров обуславливает большие различия в значениях коэффициентов преломления, градиенты которых, в свою очередь, ответственны за различные типы рефракции в атмосфере. Разные типы рефракции по-разному влияют на траекторию распространения радиолуча в атмосфере, искривляя его. Вследствие этого при стыковке карт, полученных с двух или более радаров, зоны обзора которых перекрываются, наблюдаются расхождения в определении координат одних и тех же целей.

Таким образом, учет фактического распределения метеорологических параметров представляется важным для повышения точности конечного результата при производстве радиолокационных наблюдений.

Оценка данных, полученных с ДМРЛ

Для оценки погрешностей, вносимых свойствами среды распространения радиолуча в определение координат цели, был проведен анализ данных о метеоявлениях, полученных с двух доплеровских метеорологических локаторов – ДМРЛ Валдай и ДМРЛ Воейково, расстояние между которыми по прямой составляет 325 км по прямой, и зоны обзора которых перекрываются [7].

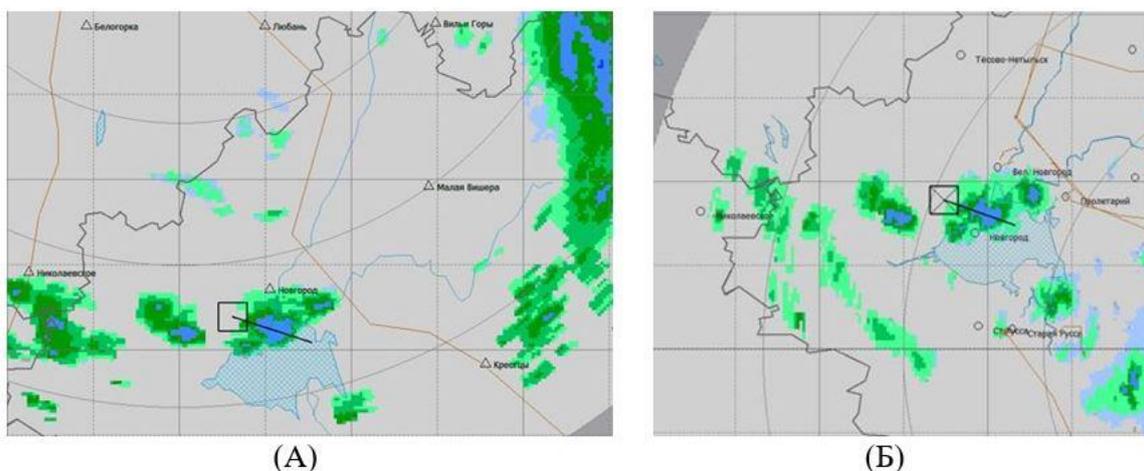
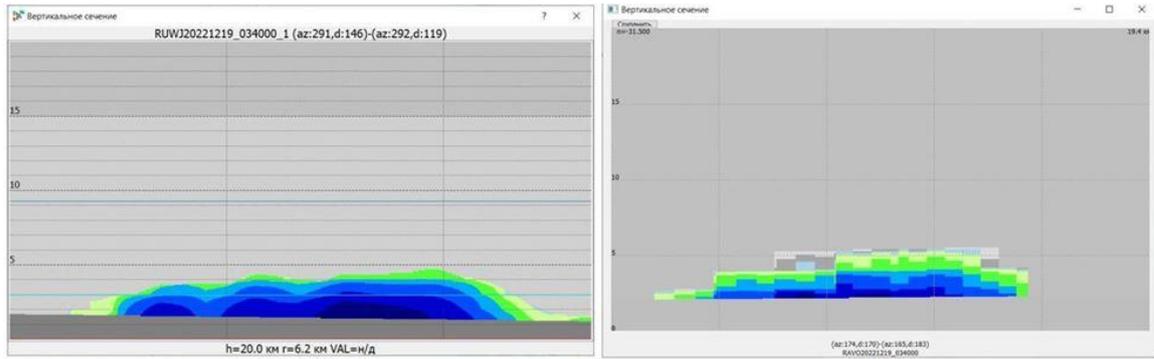


Рис. 1. Данные о метеоявлениях 19 декабря 2022 03.40 UTC. ДМЛ Валдай (А) И ДМРЛ Воейково (Б).

Для областей, отмеченных на рисунке 1, были получены вертикальные сечения наблюдаемого метеообъекта, позволяющие сделать оценку определения высоты данного объекта каждым из исследуемых локаторов.



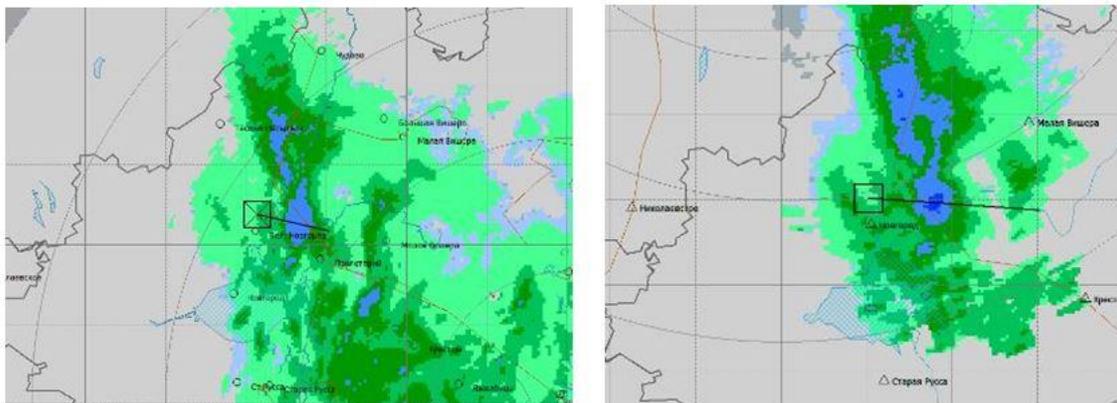
(A)

(B)

Рис. 2. Вертикальные разрезы наблюдаемой цели, полученные по данным ДМРЛ Валдай (А) и ДМРЛ Воейково (Б).

Анализ полученных разрезов показал, что в данных о высоте наблюдаемого метеоявления наблюдаются расхождения. По данным ДМРЛ Валдай, данное явление имеет высоту менее 5000 метров, тогда как по данным ДМРЛ Воейково высота верхней границы явления находится выше отметки в 5000 метров. Следует также отметить тот факт, что области одинаковой отражаемости также имеют различные высоты. Данный факт подтверждает наличие погрешностей, которые могут быть вызваны влиянием изменчивости профилей коэффициента преломления по траектории распространения радиолуча локатора.

Чтобы исключить влияние технических характеристик локаторов на возникновение погрешностей измерения координат целей, были рассмотрены случаи, при которых наблюдается обратное соотношение погрешностей.



(A)

(B)

Рис. 3. Данные о метеоявлениях 18 декабря 22.50 ВСВ. ДМЛ Валдай (А) И ДМРЛ Воейково (Б).

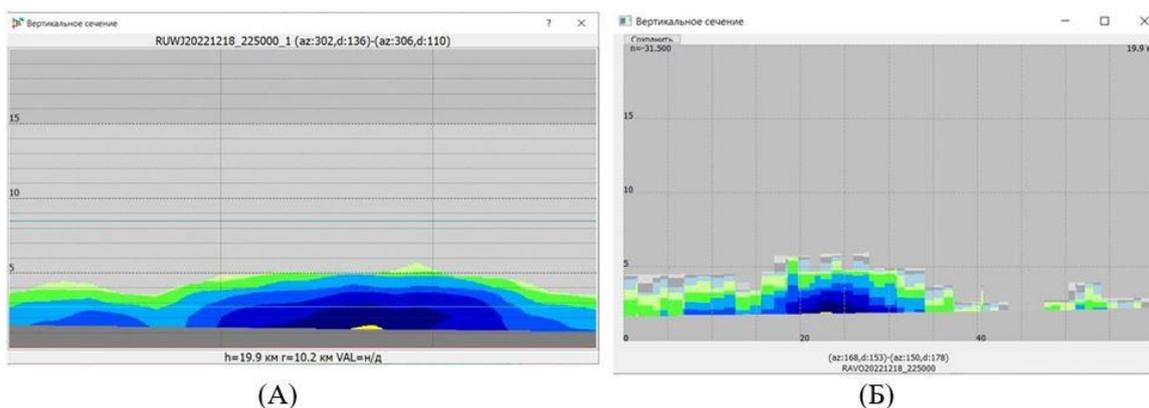


Рис. 4. Вертикальные разрезы наблюдаемой цели, полученные по данным ДМРЛ Валдай (А) и ДМРЛ Воейково (Б).

Разница в определении значений верхней границы высоты объекта двумя локаторами на рисунке 4 также наблюдается. Однако, при сравнении данной ситуации с рисунком 2, можно сделать вывод о том, что для одного и того же ДМРЛ погрешности в определении высот могут принимать как положительные, так и отрицательные значения, что позволяет исключить влияние ошибок горизонтирования антенн и других технических составляющих.

Рассмотренные случаи позволяют 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 объектах.

Оценка пространственной связи коэффициентов преломления

Для объективной оценки наличия или отсутствия пространственной связи между значениями коэффициентов преломления на двух близлежащих станциях был проведен расчет корреляции для коэффициентов преломления на аэрологических станциях Бологое и Санкт-Петербург, расстояние между которыми составляет 313 км по прямой. Рядом с данными аэрологическими станциями расположены ДМРЛ, упомянутые выше.

Расчет производился на основе данных о распределении метеорологических параметров за летние месяцы 2022 года в 00 часов и в 12 часов по ВСВ. С помощью написанной авторами программы высотные профили метеопараметров пересчитывались в высотный профиль коэффициента преломления по известной методике, изложенной в работе [1], по формуле:

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

Далее производился расчет коэффициента корреляции между значениями коэффициента преломления на двух высотах – 500 и 2000 м. Нижняя граница высоты выбиралась из условия доверия к данным о распределении метеорологических величин, полученных с радиозонда. Верхняя граница в 2000 м представляет интерес, поскольку 80% водяного пара в атмосфере находится в пределах этой высоты, а как известно [], именно к изменчивости влажности наиболее чувствителен коэффициент преломления. Результаты исследования приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значения коэффициентов корреляции, полученные для коэффициентов преломления на станциях Санкт-Петербург и Бологое

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

Анализ таблицы 1 показал, что пространственная связь между коэффициентами преломления на двух станциях отсутствует. Это подтверждает выдвинутое ранее предположение о том, что при производстве радиолокационных наблюдений, во-первых, следует учитывать бесспорное влияние изменчивости метеопараметров на траекторию хода луча в атмосфере, а во-вторых, рассматривать траектории хода луча для каждого из локаторов по отдельности, чтобы избежать потерю качества и появление больших погрешностей.

Моделирование траектории радиолуча в атмосфере

С целью оценить влияние вклада различных слоев атмосферы на погрешности, проявляющиеся при определении координат цели, была разработана аналитическая модель хода радиолуча в атмосфере. За основу такой модели было взято выражение (1), представляющее собой закон преломления луча для сферически слоистой атмосферы [1, 2].

$$n * r * \sin z = const, \quad (2)$$

где:

n – коэффициент преломления;

r – радиус-вектор, проведенный из центра Земли в точку преломления луча;

z_0 – между нормалью к поверхности Земли и направлением луча.

У поверхности Земли выражение (1) принимает вид:

$$n * r * \sin z = n_0 * a * \sin z_0, \quad (3)$$

Также в разработке модели была использована геометрия траектории распространения луча, представленная на рисунке 5.

Построение данной модели включало в себя предположение о том, что атмосфера по вертикали состоит из последовательных слоев с шагом 100 м. В каждом из таких слоев коэффициент преломления предполагался равным константе. Моделируемый луч выходил из гипотетического источника (антенны), находящегося под определенным углом места, который впоследствии изменялся. Затем с помощью геометрических преобразований определялись углы падения и преломления радиолуча при переходе через границу двух соседних слоев с различными значениями коэффициентов преломления.

Структура данной модели позволяет оценить изменения в углах падения и преломления, вызванные изменчивостью коэффициентов преломления и их градиентов, а следовательно, определить величину погрешности, вносимой рефракцией, и слой, в котором влияние рефракции максимально.

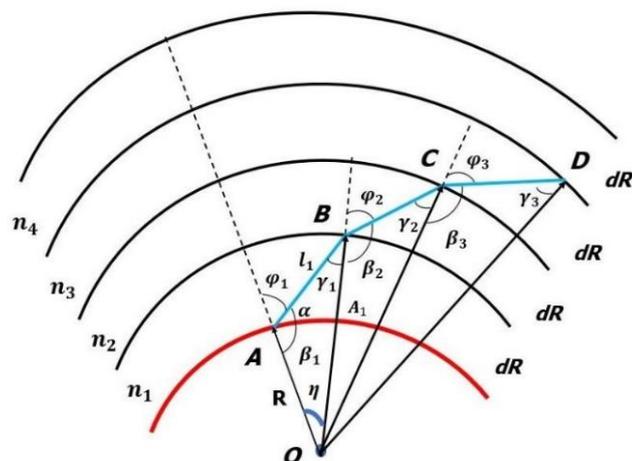


Рис. 1. Геометрическая модель распространения радиолуча в сферически слоистой атмосфере. Здесь: α – угол места антенны; φ – угол преломления радиолуча; γ – угол падения радиолуча; l – длина луча в каждом слое атмосферы; dR – добавка к радиусу Земли R (в данном случае составляет 100 м); n – значение коэффициента преломления в каждом слое; β – угол между радиус-вектором и направлением луча в каждом слое; B, C, D – точки перехода радиолуча между границами двух слоев атмосферы.

Далее решалась геометрическая задача, и было установлено, что угол преломления луча в каждом k -м слое атмосферы будет определяться в соответствии со следующим выражением:

$$\sin\varphi_k = \frac{n_{k-1}}{n_k} * \frac{(R + (k - 2)dR) * \sin\varphi_{k-1}}{R + (k - 1)dR} \quad (4)$$

Для расчета погрешностей, которые различные типы рефракции вносят в определение координат цели, определялась наклонная дальность, которая складывалась из суммы длин луча в каждом слое атмосферы. Длина луча в каждом k -ом слое может быть найдена по формуле:

$$l_k = \frac{(R + (k - 1)dR) * \sin(\beta_k + \gamma_k)}{\sin\gamma_k} \quad (5)$$

Тогда наклонная дальность соответственно:

$$l_1 + l_2 + l_3 + \dots + l_n = L = \sum_{i=1}^k l_i \quad (6)$$

Высота точек перехода луча через границу двух последовательных слоев атмосферы может быть определена следующим образом:

$$H = k * dR, \quad (7)$$

где k – порядковый номер каждого слоя атмосферы.

В настоящее время при производстве радиолокационных наблюдений повсеместно используют стандартную радиоатмосферу, которая характеризуется постоянным коэффициентом преломления с градиентом $-4 * 10^{-6} \text{ м}^{-1}$ [1, 2, 3]. В таком случае рефракция считается нормальной. Однако, в реальной атмосфере насчитывается 6 типов рефракции [1], причем при производстве наблюдений заранее предсказать возможный тип нельзя, так как рефракция в большей степени зависит от фактического распределения метеорологических параметров, как уже было упомянуто выше.

Для оценки погрешностей, которые различные типы рефракции вносят в определение координат исследуемой цели, с помощью разработанной модели была построена модель траектории распространения луча при стандартной рефракции. Для этого у поверхности Земли задавалось значение коэффициента преломления, равное 1,009 и далее изменялось с учетом значения градиента при нормальной рефракции. В результате строился высотный профиль распределения коэффициента преломления от 0 до 10 км, при котором наблюдалось искривление траектории луча, соответствующее нормальной рефракции. В дальнейшем эта модель считалась эталонной и относительно нее рассчитывались погрешности при изменении типа рефракции в различных слоях атмосферы.

В процессе расчета искусственно изменялись значения углов места источника луча, а также было сделано предположение о том, что истинная наклонная дальность L для исследуемой цели составляет 200 км.

Прежде всего путем линейной интерполяции было определено, что при стандартной рефракции и наклонной дальности 200 км при угле места 2° высота обнаружения цели H составила 9224 м. Затем стандартная рефракция заменялась на другие типы в некоторых слоях атмосферы по следующему принципу:

- в нижнем слое от 0 до 1500 м, далее – стандартная;
- средний слой от 1600 до 3500 м, выше и ниже – стандартная;
- верхний слой от 3800 до 5500, выше и ниже – стандартная.

Далее определялась высота обнаружения цели при фиксированной наклонной дальности 200 км, и погрешность вычислялась как разница между эталонным значением, соответствующим стандартной рефракции, и текущим значением. Результаты этого исследования отражены в приведенных ниже таблицах.

Таблица 2. Значения погрешностей высоты обнаружения цели для угла места антенны $0,5^\circ$ ($H = 4029$ м)

Тип рефракции в изменяемом слое	$\frac{dN}{dz}$ в изменяемом слое, м^{-1}	Слой, м	Высота, м	Погрешность по высоте ΔH , м
Пониженная	$-2 * 10^{-6}$	0-1500	4303	+274
		1600-3500	4117	+88

		3800-5500	4031	+2
Сверхрефракция	$- 20 * 10^{-6}$	0-1500	-	-
		1600-3500	3283	-716
		3800-5500	4018	-11
Отрицательная	$4 * 10^{-6}$	0-1500	5050	+1021
		1600-3500	4374	+345
		3800-5500	4033	+4

Таблица 3. Значения погрешностей высоты обнаружения цели для угла места антенны 2° (H = 9258 м)

Тип рефракции в изменяемом слое	$\frac{dN}{dz}$ в изменяемом слое, m^{-1}	Слой, м	Высота, м	Погрешность по высоте ΔH , м
Пониженная	$-2 * 10^{-6}$	0-1500	9364	+140
		1600-3500	9353	+129
		3800-5500	9248	+24
Сверхрефракция	$- 20 * 10^{-6}$	0-1500	7995	-1269
		1600-3500	8130	-1094
		3800-5500	8668	-556
Отрицательная	$4 * 10^{-6}$	0-1500	9781	+557
		1600-3500	9718	+494
		3800-5500	9482	+258

Полученные результаты показывают, что наибольшие значения погрешностей наблюдаются во всех случаях при изменении рефракции в нижних слоях атмосферы, причем при случае сверхрефракции они достигают максимальных значений. Этот вывод может служить подтверждением предположения о том, что рефракция и, соответственно, метеопараметры, на нее главным образом влияющие, должны быть учтены особенно в нижних слоях атмосферы при производстве радиолокационных наблюдений.

Также максимальные значения погрешностей прослеживаются в нижних слоях атмосферы и при малых значениях угла места антенны – в случаях пониженной и отрицательной рефракции погрешности увеличиваются при увеличении угла места источника излучения, тогда как при случае сверхрефракции наблюдается обратная зависимость.

Поскольку максимумы погрешностей были установлены в нижних слоях атмосферы, то проблему учета и прогноза типа рефракции при радиолокационных наблюдениях можно решить с помощью использования данных о распределении метеорологических величин, взятых с наземной метеорологической сети наблюдений.

Расчет профиля коэффициента преломления с учетом стандартного распределения влажности в атмосфере

Как уже было отмечено ранее, влажность оказывает наибольшее влияние на изменчивость коэффициента преломления и, как следствие, на типы рефракции в атмосфере, однако, при производстве наблюдений до сих пор продолжают пользоваться стандартной радиоатмосферой. В связи с этим был произведен расчет высотного профиля коэффициента преломления с учетом распределения характеристик влажности в атмосфере. Такой расчет позволяет оценить значения коэффициента преломления с учетом изменчивости влажности и оценить отличие градиента коэффициента преломления от стандартного.

Прежде всего для этой цели был задан высотный профиль температуры, соответствующей сухой адиабате [4, 5] (при безоблачной атмосфере и температуре у поверхности Земли равной 298,15 К и относительной влажности 40%):

$$T = T_0 - \gamma z, \quad (8)$$

где

γ – градиент температуры, равный 0,6 К/100 м.

Затем с учетом соответствующего высотного распределения значений температуры строился высотный профиль парциального давления по эмпирической формуле, удовлетворительно описывающей стандартное распределение влажности в атмосфере на широте города Санкт-Петербурга [5]:

$$e = e_0 * 10^{-\frac{z}{8} - \frac{z^2}{48}}, \quad (9)$$

Где

e – парциальное давление водяного пара в гПа;

e_0 – парциальное давление водяного пара у земли в гПа;

z – высота в км.

Далее по формуле (1) рассчитывался высотный профиль коэффициента преломления с учетом распределения влажности. Ожидалось, что при этом градиент коэффициента преломления будет постоянным и близким к значению,

соответствующему стандартной рефракции. Однако, было установлено, что значения градиента не являются постоянными и уменьшаются по модулю с увеличением высоты. Это представляется логичным, если учесть, что с увеличением высоты уменьшается парциальное давление водяного пара по экспоненциальному закону [4, 5]. Отсюда можно сделать вывод, что значение стандартного градиента коэффициента, принятое до сих пор для учета рефракции, не отображает удовлетворительно реальные процессы в атмосфере.

Выводы

В данных, полученных с двух ДМРЛ, разнесенных друг от друга на расстояние 325 км, наблюдаются расхождения в определении верхней границы высоты одного и того же явления. Поскольку для одного и того же локатора такие погрешности могут иметь как положительный, так и отрицательный знак, можно сделать вывод, что они вызваны не технической составляющей радиолокационной станции, а влиянием среды, в которой распространяется радиолуч;

Пространственная связь между коэффициентами преломления на двух аэрологических станциях, разнесенных друг от друга на расстояние 313 км, отсутствует, о чем говорят малые значения коэффициентов корреляции. Учитывая этот факт, можно говорить о необходимости учета распределения метеорологических параметров для каждого из локаторов отдельно;

При различных типах рефракции в разных слоях атмосферы наблюдаются погрешности в определении координат цели. Значения погрешностей максимальны при малых углах места антенны и в нижних слоях атмосферы. В соответствии с этим можно сделать вывод о возможности учета и прогноза рефракции с использованием данных о фактическом распределении параметров атмосферы, взятых с наземной сети метеорологических наблюдений;

Расчет профиля градиента коэффициента преломления с учетом стандартного распределения влажности в атмосфере показал, что значение стандартного градиента, принятое в настоящее время, не отображает реальные изменения влажности в атмосфере и, следовательно, вносит погрешности при решении радиолокационных задач.

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.: - Гидрометеоиздат, 1984. – 751 с.
5. Тверской П. Н. Курс метеорологии (физика атмосферы). – Л.: - Гидрометеоиздат, 1962. – 700 с.

6. Распознавание опасных явлений погоды в современной метеорологической радиолокации / Жуков В. Ю., Шукин Г. Г. // Материалы VI Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды», Санкт-Петербург, 2020 г.

7. Данные ДМРЛ. Композитная карта. URL: <http://www.nowcast.ru/RAD/demo.html> (Дата обращения: 28.02.2023).