

Дистанционное зондирование сред

DOI 10.24412/2221-2574-2024-3-5-15

УДК 621.396.96

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИСКРИВЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ РАДИОВОЛН В ТРОПОСФЕРЕ ЗЕМЛИ*

Жуков Владимир Юрьевич

доктор физико-математических наук, старший преподаватель, ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия¹ имени А. Ф. Можайского» Министерства обороны РФ.

E-mail: vuzhukov2002@list.ru

Кузнецов Анатолий Дмитриевич

доктор физико-математических наук, профессор, Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ)².

E-mail: kuznetsov1946@inbox.ru

Никитина Виктория Сергеевна

аспирант, Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ)².

E-mail: vvictoriaflint01@gmail.com

¹Адрес: 197198, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13.

²Адрес: 192007, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д. 79.

Аннотация: В работе оценивается влияние метеорологических параметров на тип рефракции в нижних слоях атмосферы Земли. На основе данных о распределении метеорологических параметров в атмосфере рассчитываются профили коэффициента преломления и определяется тип рефракции. Определяются погрешности, вносимые рефракцией, при радиолокационном определении координат цели. Делается вывод о том, что наибольшее влияние на погрешности оказывают нижние слои атмосферы. Описывается натурный эксперимент по определению пространственной связи между коэффициентами преломления на двух метеорологических станциях. Полученные в результате его проведения коэффициенты корреляции позволяют предположить, что стохастическая связь коэффициента преломления существует на достаточно больших расстояниях, размер которых ещё предстоит оценить. Предполагается возможность прогнозирования рефракции по оценке метеорологических характеристик атмосферы в точке установки радиолокатора.

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

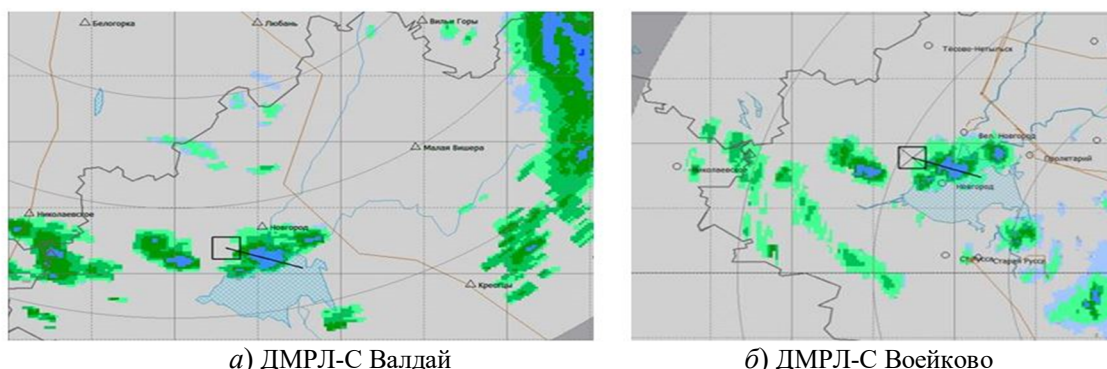
Введение

Рефракция электромагнитных волн в настоящее время является одним из самых изучаемых разделов физики и общей теории распространения электромагнитных волн. Искривление их траектории в пространстве приводит к проблемам в решении радиолокационных задач. Так, при радиолокационном определении местоположения наблюдаемых целей рефракция может привести к отклонению наблюдаемого положения от истинного.

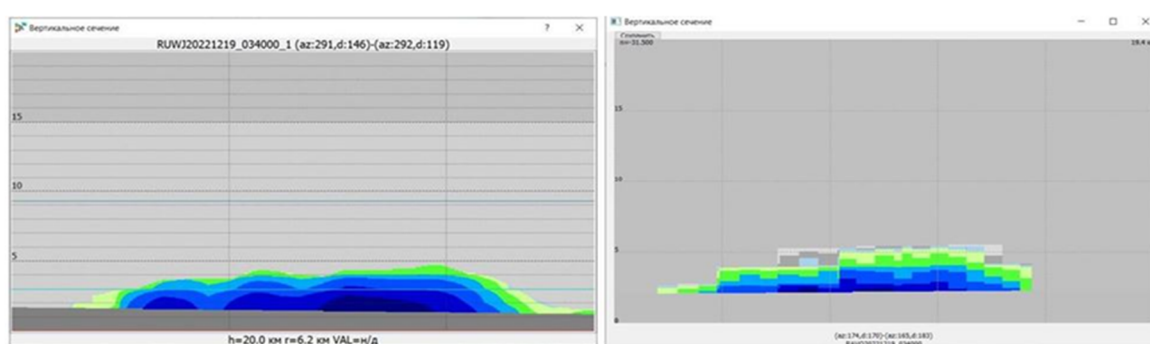
В качестве одной из самых главных задач теории рефракции традиционно выделяют учёт распределения и изменчивости метеорологических параметров. Данная задача очень важна для метеорологии, поскольку именно рефракция является помехой, например, для своевременного и качественного обнаружения грозовых облаков на стадии их зарождения и для качественного прогноза грозовой активности.

В настоящее время при радиолокационных наблюдениях пользуются стандартной радио-

* Статья подготовлена по материалам доклада на Всероссийской конференции «Армандовские чтения 2024»



а) ДМРЛ-С Валдай б) ДМРЛ-С Воейково
Рис. 1. Данные о метеоявлениях, полученные 19 декабря 2022 года в 3.40 по ВСВ с отмеченными зонами вертикального разреза



а) ДМРЛ-С Валдай б) ДМРЛ-С Воейково
Рис. 2. Вертикальные разрезы наблюдаемой цели, полученные по данным ДМРЛ-С

атмосферой, 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. Характерная изменчивость метеорологических параметров может существенно влиять на дальность обнаружения объектов радиолокационным методом и на появление ложных целей [6].

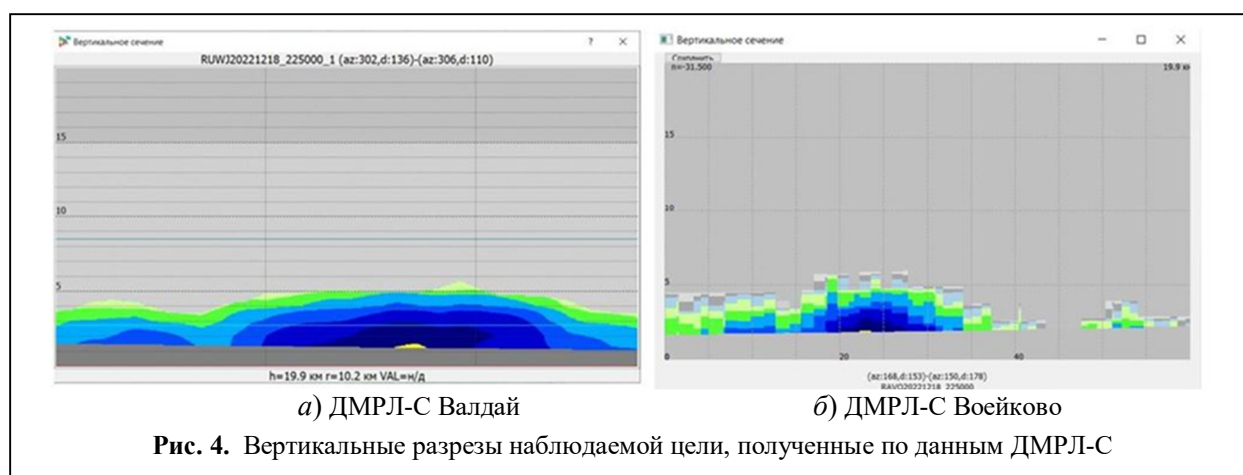
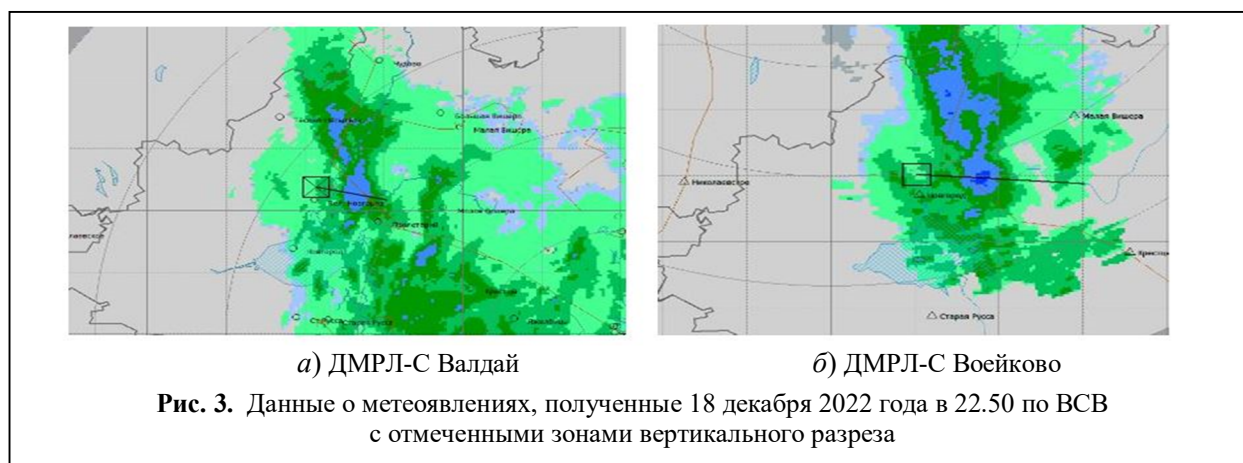
Таким образом, для качественных и более точных радиолокационных наблюдений необходимо учитывать тип рефракции в каждом конкретном случае. Целью данной работы является исследование влияния различных типов рефракции на траекторию распространения радиолуча и на погрешности при определении координат наблюдаемых объектов.

Оценка данных, полученных с ДМРЛ

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

Для областей, отмеченных на рис. 1, были получены вертикальные сечения наблюдаемого метеобъекта, позволяющие сделать оценку определения высоты данного объекта каждым из исследуемых локаторов (рис. 2).

Анализ полученных разрезов показал, что в данных о высоте наблюдаемого метеоявления наблюдаются расхождения. По данным ДМРЛ-С Валдай, данное явление имеет высоту менее 5000 метров, тогда как по данным ДМРЛ-С



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 найдены случаи (рис. 3), при которых наблюдается обратное соотношение погрешностей.

На рис. 4 также наблюдается разница в определении значений верхней границы высоты объекта двумя локаторами. Однако, при сравнении данной ситуации с рис. 2, можно сделать вывод о том, что для одного и того же ДМРЛ-С 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, это влияние должно быть в дальнейшем учтено для получения качественной информации об интересующих объектах.

Расчёт корреляции коэффициентов преломления

В связи с выводами, изложенными выше, актуальной становится проблема прогнозирования степени искривления луча радиолокатора, что возможно только при наличии априорной ин-

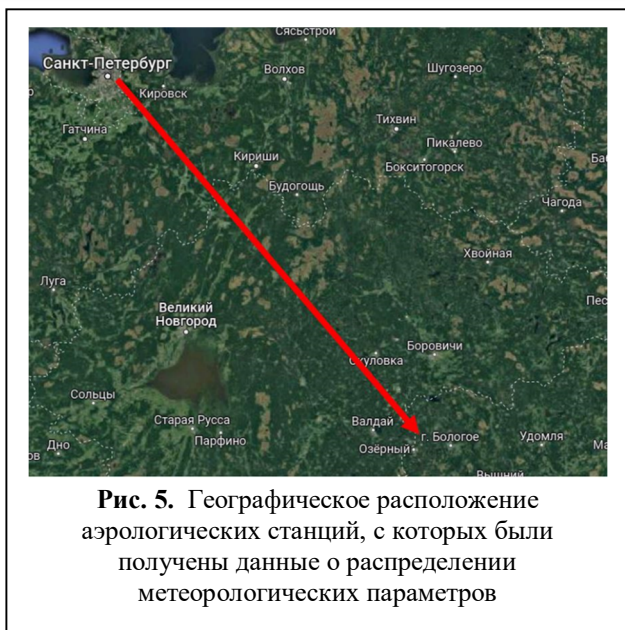


Рис. 5. Географическое расположение аэрологических станций, с которых были получены данные о распределении метеорологических параметров

формации о закономерностях пространственного распределения рассматриваемого коэффициента.

В качестве первого шага в решении поставленной задачи был оценён коэффициент корреляции между индексами преломления в точках расположения аэрологических станций Болгое и Санкт-Петербург. Расстояние между ними составляет 313 км. Рядом с этими станциями находятся упомянутые ранее ДМРЛ-С. 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 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 ($N = (n - 1) \cdot 10^6$); p — атмосферное давление; e — парциальное давление водяного пара; T — температура.

Далее был рассчитан коэффициент корреляции между значениями индекса коэффициента

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

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

ента преломления на двух разных высотах: 500 м и 2000 м. Нижняя граница высоты была выбрана с учётом доверия к данным о распределении метеорологических величин, полученных с радиозонда. Верхняя граница, равная 2000 м, была выбрана из-за того, что это верхняя граница слоя, в пределах которого находится 80% водяного пара, который в наибольшей степени влияет на значение коэффициента преломления [4]. Результаты исследования, представленные в таблице 1, указывают на отсутствие пространственной связи между индексами коэффициента преломления на двух станциях.

Следовательно, 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 атмосферы.

Следует отметить, что максимальное значение погрешностей при определении радиолокационных координат цели, вносимых различными типами рефракции, наблюдается в нижнем слое атмосферы [7]. Именно тропосфера, являющаяся «фабрикой погоды» и отличающаяся большими градиентами метеорологических величин, оказывает наибольшее влияние на трансформацию радиолуча. Соответственно, рефракция и метеопараметры, на неё 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 учёта погрешностей, возникающих при различных типах рефракции в тропосфере, а также прогноза типа рефракции по прогностическим данным о распределении метеовеличин, был проведён натурный эксперимент. Он 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 практически всегда наблюдается свэрхрефракция [8]. 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.

Расчёт 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. 6).

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

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



Рис. 6. Географическое расположение автоматических метеорологических станций, с которых были получены данные о суточном распределении метеовеличин

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

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]:

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

где f — относительная влажность воздуха.

Затем, с использованием формулы (1) производился расчёт 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.

Оценка зависимости значений коэффициентов корреляции от стабильности атмосферы

Анализируя результаты, представленные в таблицах 2 и 3, 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

Таблица 2. Значения коэффициентов корреляции для некоторых месяцев 2023 года

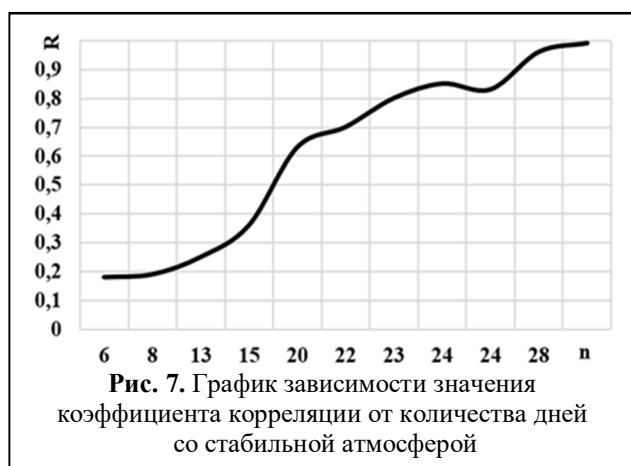
Месяц	04	05	06	07	08	09	10	11	12
R	0,36	0,85	0,80	0,63	0,25	0,83	0,18	0,7	0,96

Таблица 3. Значения коэффициентов корреляции для некоторых месяцев 2024 года

Месяц	01	02
R	0,99	0,19

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 метеопараметрами, а, следовательно, и между коэффициентами преломления.

Наглядным подтверждением вышеизложенных фактов служит график зависимости значе-



ний коэффициентов корреляции от количества в месяце дней со стабильным состоянием атмосферы (рис. 7).

Принимая во внимание практически линейную зависимость, можно с уверенностью сказать, что именно состоянием атмосферы определяется пространственная связь между значениями индекса коэффициента преломления на двух станциях. Также в пользу этого говорит анализ синоптической ситуации, произведённый для периода, представленного в таблицах 2 и 3.

Рис. 8 представляет собой пример анализа синоптической ситуации в августе 2023 года. Исходя из данных о расположении синоптических фронтов [9], можно сделать вывод о том, что непосредственно в зоне проведения эксперимента в августе 2023 года наблюдалась нестабильная атмосфера. Имела место циклоническая активность, включающая в себя прохождения холодных фронтов, приносящих с собой осадки, грозы и плотную облачность, а также фронтов окклюзии, приносящих обложные дожди.

Значит, при наличии информации о распределении метеорологических величин в конкретных точках, можно делать вывод о наличии или отсутствии пространственной связи между коэффициентами преломления в этих точках. Это даёт возможность прогнозировать, будет или нет иметь место отклонение от стандартной рефракции на рассматриваемой трассе.

Оценка погрешностей, вносимых различными типами рефракции в определение координат исследуемой цели методом радиолокации

Для оценки погрешностей, которые различные типы рефракции вносят в определение координат исследуемой цели, с помощью ранее

разработанной авторами модели [7] 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 учётом 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 неё рассчитывались погрешности при изменении типа рефракции в различных слоях атмосферы.

В процессе расчёта 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, путём 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 приведённых ниже таблицах 4 и 5.

Полученные результаты показывают, что наибольшие значения погрешностей наблюдаются во всех случаях при изменении рефракции в нижних слоях атмосферы, причём при случае сверхрефракции они достигают максимальных значений. Этот вывод может служить

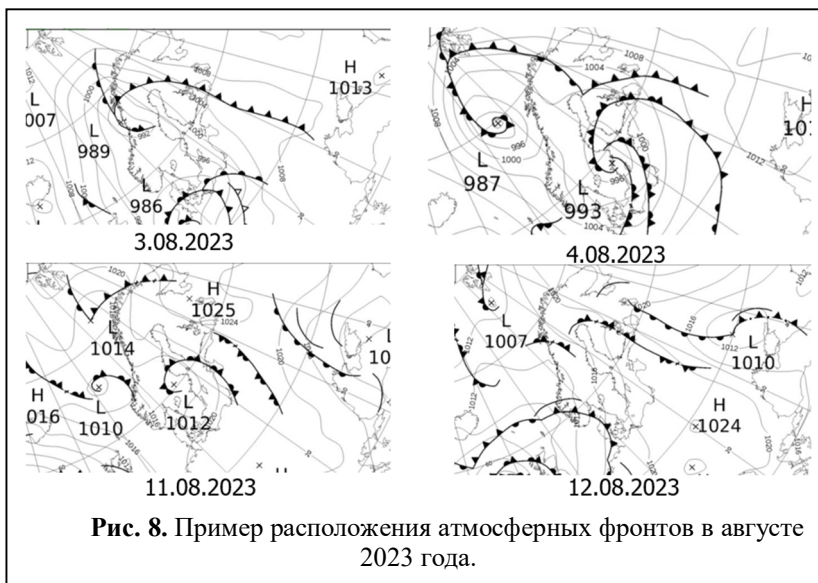


Рис. 8. Пример расположения атмосферных фронтов в августе 2023 года.

Таблица 4. 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, M^{-1}	Слой, м	Высота, м	Погрешность по высоте ΔH , м
Пониженная	$-2 \cdot 10^{-6}$	0–1500	4303	+274
		1600–3500	4117	+88
		3800–5500	4031	+2
Сверхрефракция	$-20 \cdot 10^{-6}$	0–1500	-	-
		1600–3500	3283	-716
		3800–5500	4018	-11
Отрицательная	$4 \cdot 10^{-6}$	0–1500	5050	+1021
		1600–3500	4374	+345
		3800–5500	4033	+4

Таблица 5. Значения погрешностей высоты обнаружения цели для угла места антенны 2° (H = 9258 м)

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

подтверждением предположения о том, что рефракция и, соответственно, метеопараметры, на неё главным образом влияющие, должны быть учтены особенно в нижних слоях атмосферы.

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 можно предположить, что проблему учёта и прогноза типа рефракции при радиолокационных наблюдениях можно решить с помощью использования данных о распределении метеорологических величин, взятых с наземной метеорологической сети наблюдений.

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.

Согласно теории погрешностей [10], если числа *a* и *b* являются приближениями к точным аргументам *A* и *B* с абсолютными погрешностями Δ_{*a*} и Δ_{*b*} и если функция *f*(*a*, *b*) дифференцируема в точке (*a*, *b*), то абсолютная погрешность функции при учёте погрешностей аргументов равна:

$$\Delta_z = |f'_x(a,b)|\Delta_a + |f'_y(a,b)|\Delta_b. \tag{4}$$

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

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

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

$$\frac{\partial N}{\partial p} = \frac{78}{T}. \tag{7}$$

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

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

где Δ*T* и Δ*p* — абсолютные погрешности измерения температуры и давления, указанные в паспорте станции; Δ*e* — 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 учётом формулы (2) следующим образом:

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

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

Принимая во внимание формулу (3) и принимая во внимание выражение (11):

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

где E_0 — давление насыщенного пара при температуре 0 градусов Цельсия; $E_0 = 6,1078$ гПа.

Определим выражение для нахождения абсолютной погрешности парциального давления водяного пара:

$$\begin{aligned} \Delta e &= \frac{E}{100} \cdot \Delta f + 14,05 \cdot 10^{\frac{7,63T-2084,1345}{T}} \times \\ &\times \frac{2084,1345}{T^2} \Delta E. \quad (12) \end{aligned}$$

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

При этом абсолютная погрешность определения температуры равна

$$\begin{aligned} &\left(\frac{78p}{T^2} + \frac{748800e}{T^3} + \frac{78e}{7T^2} \right) \Delta T = \\ &= \left(\frac{78 \cdot 1013}{85936,9225} + \frac{10513152}{25192408,83} + \frac{1095,12}{601558,4575} \right) \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \times 0,2 &= (0,92 + 0,42 + 0,00182) \cdot 0,2 = \\ &= 1,34 \cdot 0,2 = 0,268. \quad (13) \end{aligned}$$

Абсолютная погрешность определения влажности и давления соответственно:

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

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

Расчёты 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 учёта при производстве расчётов профилей индекса коэффициента преломления и дальнейшей обработке результатов наблюдений.

Выводы

На расстоянии 325 км значения индекса преломления независимы. Это подтверждают расхождения, наблюдаемые при определении верхней границы одного и того же явления методом радиолокации. Следовательно, деформация луча антенны радиолокаторов, установленных на этом или большем расстоянии, происходит также независимо. При этом основное влияние на форму луча оказывает нижний слой атмосферы толщиной примерно 500 м. Прогнозирование уровня рефракции возможно только при наличии априорной информации о пространственном распределении рассматриваемого параметра на высоте более 10 м.

Пространственное распределение коэффициента корреляции индекса преломления атмосферы (на высоте 30 м) существенным образом зависит от погодных условий. Полученная линейная зависимость между значением коэффициента корреляции, рассчитанного на некотором временном интервале, и числом дней спокойного состояния атмосферы в течение этого времени, позволяет сделать вывод о его высоком значении на расстоянии 8 км в ста-

бильной атмосфере и практическом отсутствии пространственной зависимости в штормовой ситуации.

Значения погрешностей метеорологических параметров, по которым рассчитывается индекс преломления, для условий стандартной атмосферы сопоставимы между собой и должны быть учтены 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.: Советское радио, 1957. 303 с.
3. Колосов М.А., Шабельников А. В. Рефракция электромагнитных волн в атмосферах Земли, Венеры и Марса. М.: 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.

Поступила 2 июля 2024 г.

6. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Шукин Г.Г. Оптимизация условий наблюдения целей в современном метеорологическом радиолокаторе // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2019. № 1 (33). С. 27–35.

7. Жуков В.Ю., Кузнецов А.Д., Никитина В.С. Моделирование влияния рефракции на определение координат цели при производстве радиолокационных наблюдений // Труды Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, 2023. Вып. 688. С. 55–61.

8. Акулиничев Ю. П., Новиков А. В. Модель пространственно-временного поля индекса преломления приземного слоя атмосферы // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2010. №1(21). Ч. 2. С. 36–44.

9. Данные о расположении синоптических фронтов [Электронный ресурс]. URL: www.wetterzentrale.de (дата обращения: 19.04.2024).

10. Ларионов А.Н., Ларионова Н.Н., Чернышев В.В. Погрешности измерения физических величин. М.: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2009. 50 с.

English

PREDICTABILITY RESEARCH OF RADIO WAVES BENDING IN THE EARTH'S TROPOSPHERE

Vladimir Yurievich Zhukov – Grand Dr. in Physics and Mathematics, lecturer, Mozhaisky Military Space Academy¹.

E-mail: vuzhukov2002@list.ru

Anatoliy Dmitrievich Kuznetsov — Grand Dr. in Physics and Mathematics, Professor, Russian State Hydrometeorological University².

E-mail: kuznetsov1946@inbox.ru

Victoria Sergeevna Nikitina — Postgraduate Student, Russian State Hydrometeorological University².

E-mail: victoriaflint01@gmail.com

¹Address: 197198, Russian Federation, Saint-Petersburg, Zdanovskaya str., 13.

²Address: 192007, Russian Federation, Saint-Petersburg, Voronezhskaya str., 79

Abstract: So far, there occur errors in determining target position by the radar method which results in varying positioning data for the same target when maps are mated, which may cause ambiguous interpretation of the observations. Inaccurate meteorological target detection destructively affects population living standard. High variability of weather parameters in the deep atmosphere is found the reason for the distortion of the radar antenna beam and that in turn causes various types of refraction. Standard refraction is used during observations, which ignores atmospheric weather properties' variation and thus actual radio beam path. The literature has no inventory and prediction methods for the refraction type in different weather situations. The article gives an assessment of the peculiarities of the radio emission transformation in the atmosphere to improve the accuracy of the radar observations' results and predictability of radio waves' transformation. The key feature is that the antenna beam's path bending for each of the radars takes place independently due to high variability of meteorological parameters of the atmosphere. Another important conclusion is that the

lower atmosphere layers exert the greatest impact on the beam distortion. Consequently, the article's authors are developing methods to consider errors introduced by various types of refraction when defining target position. The article also suggests a way to a possible prediction of radio waves' refraction, which can be implemented using information about distribution of weather properties of the atmosphere at the radar installation site.

Keywords: radar detection, radar observations, refraction, radio beam path, target positioning errors, statistical data processing, numerical simulation, full-scale experiments.

References

1. *Stepanenko V.D.* Radar in meteorology (Radiometeorology). Leningrad: Gidrometeorologicheskoe izdatel'stvo, 1966. 350 p.
2. *Arenberg A.G.* Propagation of decimeter and centimeter waves. Moscow: Sovetskoe Radio, 1957. 303 p.
3. *Kolosov M.A., Shabelnikov A.V.* Refraction of electromagnetic waves in the atmospheres of the Earth, Venus and Mars. Moscow: Sovetskoe Radio, 1976. 218 p.
4. *Matveev L.T.* General meteorology course. Physics of the atmosphere. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984. 751 p.
5. *Tverskoy P.N.* Course of meteorology (atmospheric physics). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1962. 700 p.
6. *Denisenkov D.A., Zhukov V.Yu., Shchukin G.G.* Optimization of Target Observation Conditions in Modern Meteorological Radar. Radio and Telecommunication Systems. 2019. No. 1(33). Pp. 27–35.
7. *Zhukov V.Yu., Kuznetsov A.D., Nikitina V.S.* Modeling the influence of refraction on the determination of target coordinates during radar observations. Proceedings of the A.F. Mozhaisky Military Space Academy. 2023. Iss. 688. Pp. 55–61.
8. *Akulinichev Yu.P., Novikov A.V.* Model of the spatio-temporal field of the refractive index of the atmospheric surface layer. Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. 2010. No. 1(21). Pt. 2. Pp. 36–44.
9. Data on the location of synoptic fronts [Electronic source]. URL: www.wetterzentrale.de (access date: 19.04.2024).
10. *Larionov A.N., Larionova N.N., Chernyshev V.V.* Errors in measuring physical quantities. Moscow: Voronezh State University, 2009. 50 p.