

Оценка возможностей статистической экстраполяции профиля индекса коэффициента преломления по данным АС Смоленска

А.Д. Кузнецов, С.В. Крюкова, В.С. Никитина, О.С. Сероухова, Т.Е. Симакина

ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет»,
г. Санкт-Петербург, Россия, ул. Воронежская, 76.
E-mail: kuznetsov1946@inbox.ru

Среди факторов, влияющих на эффективность радиолокационного зондирования атмосферы (технические характеристики радиолокационной станции, программное обеспечение для автоматизации управления, приема и обработки радиолокационной информации и другими), важным является учет влияния среды на распространение радиолокационного импульса. Здесь основной фактор - рефракция, тип которой зависит от фактического распределения метеорологических величин с высотой.

Определить тип рефракции можно по оперативным данным аэрологического зондирования атмосферы. Но возможность использования такой информации возможна только в том случае, когда аэрологическая станция (АС) и радиолокатор расположены в непосредственной близости друг от друга. Поскольку с развитием сети радиолокационного зондирования атмосферы соблюсти такую близость станций практически невозможно, то предлагается для уточнения данных о фактической рефракции использовать метод статистической экстраполяции индекса коэффициента преломления и его градиента.

В данной работе для оценки точности статистической экстраполяции использовались данные аэрологического радиозондирования на АС Смоленск для холодного периода. Были сформированы ансамбли вертикальных профилей температуры, давления и влажности. На их основе рассчитаны ковариационные матрицы профилей индекса коэффициента преломления. На основе проведения численных экспериментов показана возможность существенно повысить точность задания вертикального профиля индекса коэффициента преломления, используя статистическое восстановление вертикального профиля значений индекса по его значению на уровне расположения антенны радиолокатора. Это значение определяется на основе прямых измерений давления, температуры и влажности. Информация о профиле позволит более корректно учесть рефракцию радиоволн по сравнению с использованием стандартной радиоатмосферы при расчете траектории распространения луча метеорологического локатора.

Ключевые слова: атмосферная рефракция, индекс коэффициента преломления, распространение радиоволн, статистическая экстраполяция.

Assessment the possibilities statistical extrapolation of the refraction index profile based on the data from Smolensk aerological station

A.D. Kuznetsov, S.V. Kryukova, V.S. Nikitina, O.S. Seroukhova, N.T. Simakina

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia.
E-mail: kuznetsov1946@inbox.ru Abstract.

Among the factors influencing the efficiency of radar sounding of the atmosphere (technical characteristics of the radar station, software for automation of control, reception and processing of radar information, etc.), it is important to take into account the influence of the environment on the propagation of the radar pulse. Here the main factor is refraction, the type of which depends on the actual distribution of meteorological quantities with altitude.

The type of refraction can be determined using operational data from aerological atmospheric sounding. But the possibility of using such information is possible only if the aerological station (AS)

and the radar are located in close proximity to each other. Since with the development of the atmospheric radar sounding network it is practically impossible to maintain such proximity of stations, it is proposed to use the method of statistical extrapolation of the refractive index and its gradient to clarify the data on actual refraction.

In this paper, aerological radio sounding data from the Smolensk AS for cold periods were used to assess the accuracy of statistical extrapolation. Ensembles of vertical profiles of temperature, pressure and humidity were formed. Based on them, covariance matrices of the refractive index profiles were calculated. Based on numerical experiments, it is shown that it is possible to significantly increase the accuracy of specifying the vertical profile of the refractive index based on statistical reconstruction of the vertical profile of the index values based on its value at the level of the radar antenna location, determined based on direct measurements of pressure, temperature and humidity. Information about the profile will allow more correct consideration of radio wave refraction compared to using the standard radio atmosphere when calculating the trajectory of the meteorological radar beam propagation.

Keywords: atmospheric refraction, refractive index, radio wave propagation, statistical extrapolation.

Введение

Как известно, разные типы рефракции по-разному влияют на траекторию распространения радиолуча [1, 2]. Поэтому точность решения радиолокационных задач в немалой степени зависит от учета фактического вертикального профиля индекса коэффициента преломления, который, в свою очередь, зависит от фактического распределения метеорологических параметров с высотой. Именно большая изменчивость метеорологических параметров ответственна за смену типов рефракции в атмосфере. Особую роль такой учет играет при интерпретации данных, получаемых с помощью современных метеорологических радиолокационных станций (МРЛ), сеть которых в настоящее время создается в нашей стране [3—8].

Определить вертикальный профиль индекса коэффициента преломления с достаточной точностью возможно по данным аэрологического радиозондирования. Однако практическое использование такой информации с целью уточнения информации о вертикальном профиле индекса коэффициента преломления возможно только в том случае, когда МРЛ расположена непосредственно в районе размещения АС.

В остальных случаях при расчетах параметров распространения радиолокационного импульса обычно используют стандартную радиоатмосферу, когда в средних широтах до высоты нескольких километров вертикальный градиент коэффициента преломления принимают равным -4×10^{-8} 1/м [1, 11, 12].

В реальных метеорологических условиях, имеющих сложный характер, значение градиента на разных высотах может быть далеким от данной константы, поскольку будет обусловлено погодными ситуациями на локальной территории для рассматриваемого сезона [13].

В данной работе для учета рефракции радиоволн СВЧ диапазона предлагается методика статистического восстановления вертикального профиля индекса коэффициента преломления $N(z)$ по его значению на уровне расположения антенны радиолокатора $N(z = z_a)$. Значение $N(z = z_a)$ может быть рассчитано на основе прямых измерений атмосферного давления, температуры и влажности на уровне $z = z_a$ с помощью стандартных метеорологических приборов.

Предлагаемая методика основана на расчете ковариационных матриц для ансамбля вертикальных профилей индекса коэффициента преломления, рассчитанных на основе данных аэрологического зондирования в конкретном месте и в конкретный сезон. Для апробации были использованы данные аэрологического зондирования на аэрологической станции с индексом 26781 (Смоленск) [14].

Алгоритм статистической экстраполяции

Для восстановления вертикального профиля коэффициента преломления предлагаемым методом необходимо выполнить следующие этапы.

Сформировать ансамбль данных аэрологического зондирования для соответствующего временного периода (например, за месяц), содержащий вертикальные профили давления $p(z)$, температуры $t(z)$ и парциального давления водяного пара $e(z)$.

Размер шага по высоте для разных сроков зондирования не совпадает между собой. Поэтому для проведения расчетов необходимо сформировать единую вертикальную сетку по высоте и проинтерполировать значения давления, температуры и парциального давления водяного пара на эту единую сетку. Для этого можно воспользоваться методом сплайн-интерполяции [16].

Для каждого срока зондирования рассчитывается профиль индекса коэффициента преломления $N(z)$ (см. рис. 1) [17—19].

| z, м | 1_фев 0:00 | 1_фев 12:00 | 2_фев 0:00 |
|------|---------------|----------------|---------------|
| 0 | 312.01 | 310.66 | 312.24 |
| 25 | 311.05 | 309.68 | 311.16 |
| 50 | 310.09 | 308.7 | 310.09 |
| 75 | 309.13 | 307.72 | 309.02 |
| 100 | 308.17 | 306.74 | 307.96 |
| 125 | 307.21 | 305.78 | 306.92 |
| 150 | 306.25 | 304.84 | 305.91 |

Рис. 1 – Профили индекса коэффициента преломления (фрагмент).

Далее рассчитывается ковариационная матрица для ансамбля профилей индекса коэффициента преломления (использовался пакет «Анализ данных» табличного процессора *Excel*).

Методика статистической экстраполяции профилей описана в работе [20]. С использованием этой методики по известным значениям $N(z_a)$ и $N_{cp}(z_a)$ можно получить следующую оценку профиля $N(z)$ [20]

$$N_z(z) = N_{cp}(z) + K(z, z_a) \times K^{-1}(z_a, z_a) \times [N(z_a) - N_{cp}(z_a)] , \quad (1)$$

где $N_{cp}(z)$ — средний профиль индекса коэффициента преломления, рассчитанный для ансамбля профилей, K — ковариационная матрица ансамбля профилей.

Результаты апробации алгоритма

Для апробации приведенного выше алгоритма использовались ансамбли данных аэрологического зондирования за три холодных месяца 2019 г.: январь, февраль и март (индекс станции 26781, Смоленск). Каждый такой ансамбль содержал около 60 сроков зондирования с дискретностью 12 часов. Методом сплайн-интерполяции все профили приводились к единой вертикальной сетке, затем рассчитывались ансамбли вертикальных профилей $N(z)$, средние профили и ковариационные матрицы $K(z, z_0)$. При проведении расчетов предполагалось, что $z_a = z_0 = 0$ м.

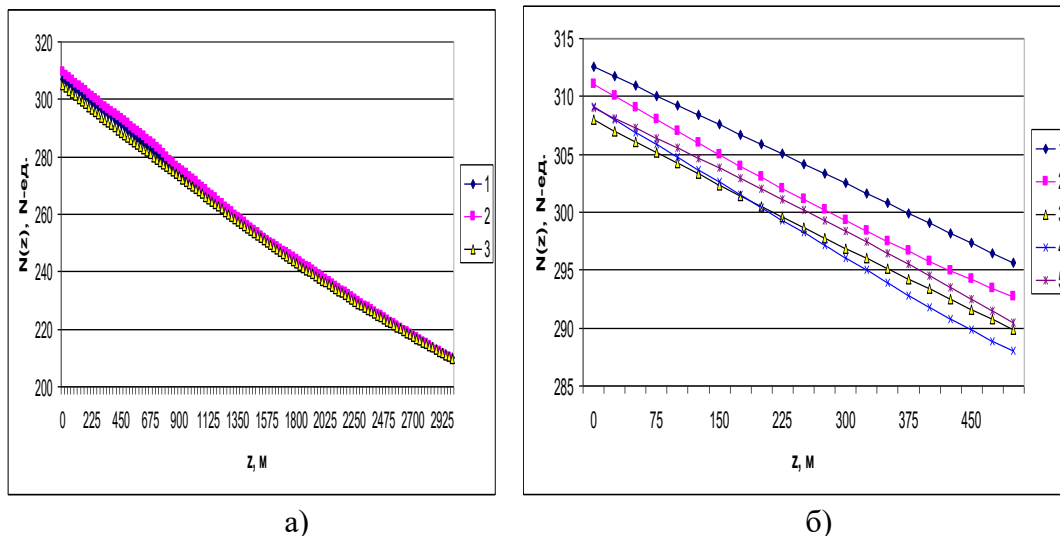


Рис. 2 – (а) - средние профили индекса коэффициента преломления в слое 0 – 3000 м, цифра в легенде соответствует номеру месяца в году;
(б) - фактические профили индекса коэффициента преломления в слое 0 – 500 м, цифра в легенде соответствует номеру профиля в ансамбле для января.

На рис. 2 представлены средние и фактические профили индекса коэффициента преломления. Анализ кривых, представленных на рис. 1а, демонстрирует весьма плавный характер изменения профилей индекса коэффициента преломления в слое 0 – 3000 м за все 3 рассмотренных месяца. Рис.1б иллюстрирует изменчивость профиля индекса коэффициента преломления в слое 0 – 500 м за 48 часов (6 сроков зондирования, дискретность аэрологических измерений – 12 часов).

Поскольку рефракция определяется не вертикальным профилем индекса коэффициента преломления, а его градиентом, то заслуживает своего внимания анализ именно профилей этого градиента. Такой анализ позволяет сделать рис. 3, где представлены средние профили градиента индекса коэффициента преломления в слое 0 – 3000 м и фактические профили градиента индекса коэффициента преломления в слое 0 – 500 м.

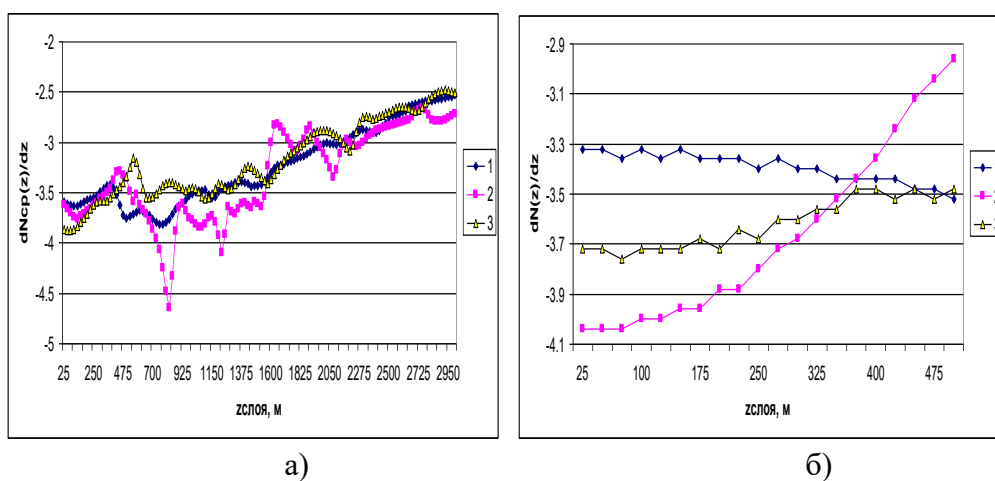


Рис. 3 – (а) - средние профили градиента индекса коэффициента преломления в слое 0 – 3000 м, цифра в легенде соответствует номеру месяца в году;
(б) - фактические профили градиента индекса коэффициента преломления в слое 0 – 500 м, цифра в легенде соответствует номеру профиля в ансамбле для января.

Анализ кривых на рис. 3 показывает, что здесь наблюдается более резкая вертикальная изменчивость профилей. Это, естественно, может приводить к вариациям типов рефракции в тропосфере.

Приведенные выше графики иллюстрируют возможность использования метода статистической экстраполяции для определения вертикальных профилей индекса коэффициента преломления и его градиента. Теперь рассмотрим оценки точности такого восстановления. Оценку точности восстановления произведем на основе сравнения рассчитанных по данным аэрологического зондирования профилей и соответствующих им восстановленных профилей.

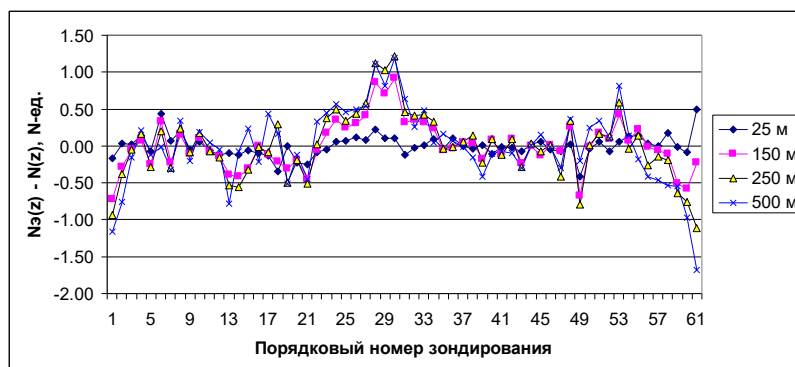


Рис. 4 – Вариации абсолютной погрешности статистического восстановления индекса коэффициента преломления (цифры в легенде соответствуют высоте, для которой рассчитывалась погрешность восстановления, январь)

На рис. 4 представлено изменение абсолютных ошибок восстановления индекса коэффициента преломления на 4 высотах по данным 62 аэрологических зондирований в январе.

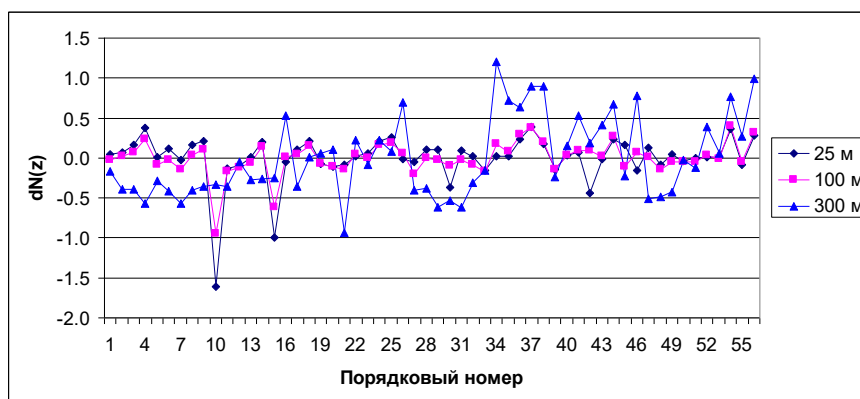


Рис. 5. Распределение погрешностей экстраполяции в ансамбле профилей $N(z)$ для февраля на высотах 25, 100 и 300 м.

Анализ кривых на рис. 5 показывает, что ошибка восстановления индекса коэффициента преломления на нижних уровнях не превышает значения 0,5 N -ед за исключением двух сроков. Заметно увеличение погрешности для профилей с номерами 10 ($dN = 1,6 N$ -ед.) и 15 ($dN = 1,0 N$ -ед.) на высотах 25 и 100 м, и отсутствие такого поведения погрешности для этих же сроков на уровне 300 м.

Проанализируем причины такого увеличения погрешности восстановления на примере 10 срока зондирования. Для этого рассмотрим профили индекса коэффициента преломления, полученные по фактическим данным для срока зондирования с номером

10 и двух соседних сроков зондирования, имеющих условные номера 9 и 11 (рис. 5а). Убеждаемся в «нетипичности» профиля №10 для используемого ансамбля.

Проанализируем, какие метеорологические величины оказали наибольшее влияние на вертикальное распределение индекса коэффициента преломления. На рис. 5(б—г) представлены профили температуры, атмосферного давления и парциального давления водяного пара для рассматриваемых трех сроков.

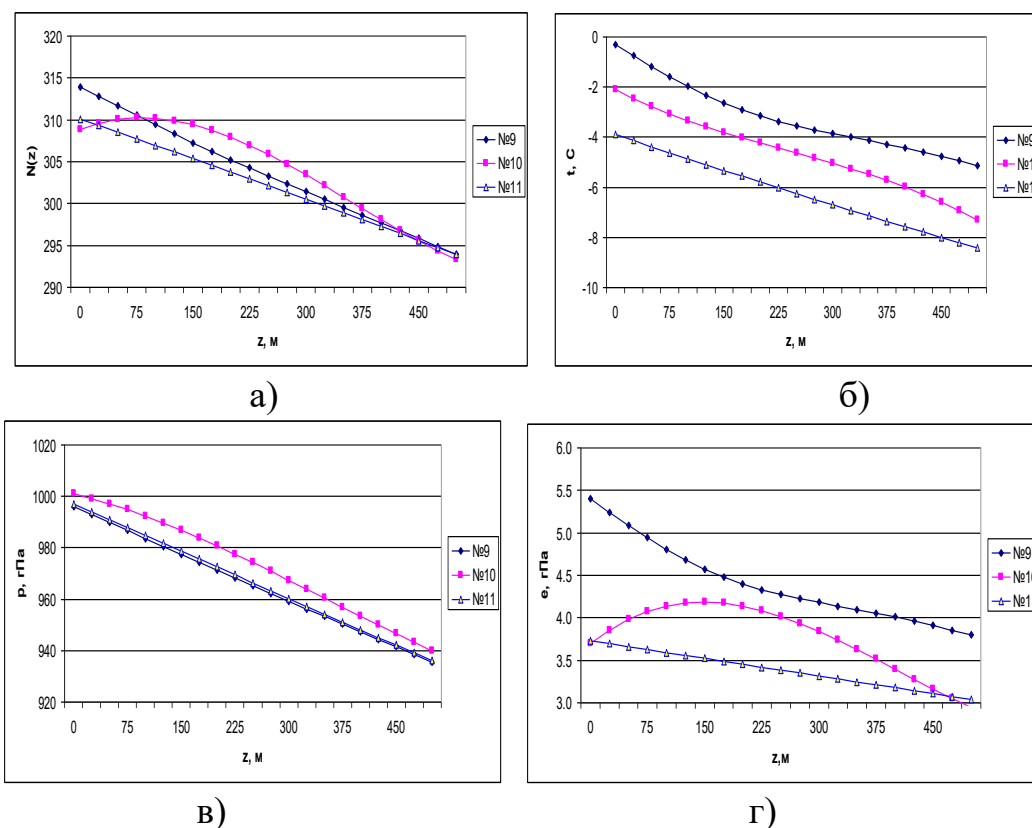


Рис. 6. Сопоставление вертикальных профилей для трех сроков зондирования с условными номерами 9, 10 и 11 (Смоленск, февраль, временной интервал — 12 часов): а) — профиль $N(z)$, б) — профиль $t(z)$, в) профиль $p(z)$, г) — профиль $e(z)$.

Температура и давление монотонно уменьшаются с высотой (см. рис. 6б и 6в) и, следовательно, не являются причиной резкого увеличения погрешности восстановления профиля $N(z)$ №10. А вот анализ кривых на рис. 6г позволяет понять резкий рост ошибки восстановления — в нижнем 180-метровом слое наблюдается аномальный характер высотного профиля, а именно — рост парциального давления водяного пара. Для статистической оценки ансамбля такое «поведение» $e(z)$ является нетипичным и, следовательно, статистическая оценка профиля $N(z)$ для этого слоя приводит к повышению погрешности [23].

Отсутствие «выбросов» погрешности восстановления на высоте 300 м для номера зондирования 10 связано с тем, что после 250 м профиль парциального давления водяного пара приближается к среднему для рассмотренного ансамбля профилей.

Таблица 1. Средние (СКО, N-ед.) и максимальные (Max, N-ед.) абсолютные ошибки восстановления индекса коэффициента преломления $N(z)$ на четырех высотах

| Z, м | 25 | 150 | 250 | 500 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|
| Среднее $N(z)$ | 307.2 | 301.8 | 298.2 | 289.3 |
| СКО $dN(z)$ | 0.15 | 0.15 | 0.30 | 0.36 |
| Max $dN(z)$ | 0.50 | 0,92 | 1.19 | 1.68 |

Если кривые на рис. 3 позволяют качественно оценить точность статистической экстраполяции профилей $N(z)$ на 4 высотах, то данные таблицы 1 позволяют это сделать количественно. Даже если ориентироваться на максимальные значения СКО, то относительная ошибка восстановления не превосходит 0.6 %.

Для оценки практической ценности рассматриваемого подхода к уточнению вертикального профиля индекса коэффициента преломления необходимо сравнить получаемые оценки $N_{\Sigma}(z)$ не только с профилями $N(z)$, но и с тем случаем, когда для задания вертикального профиля $N(z)$ в нашем распоряжении будет два параметра: среднее значение $N_{\text{ср}}(z=0)$ и градиент индекса коэффициента для стандартной радиоатмосферы. Среднее значение может быть рассчитано по ансамблю прямых измерений температуры, давления и влажности у поверхности земли для каждого месяца. На основе такого среднего значения профиль индекса коэффициента преломления вычисляется с использованием постоянного градиента для стандартной радиоатмосферы -4×10^{-8} 1/м.

Такое сравнение иллюстрирует рис. 7, на котором приведены средние профили СКО в диапазоне высот 0 – 500 м для января месяца. Представленные на этом рисунке кривые говорят сами за себя – использование метода статистической экстраполяции более чем в 5 раз уменьшает погрешность задания вертикального профиля $N(z)$ в слое 0 – 500 м.

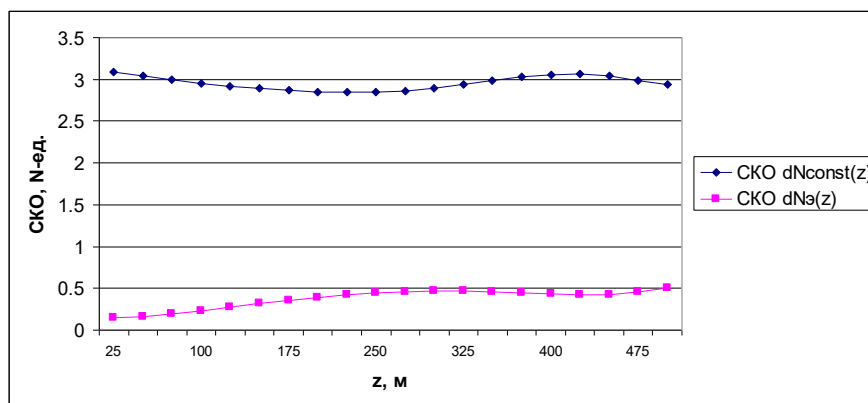


Рис. 7 – Средняя погрешность при двух схемах задания вертикального профиля $N(z)$ в слое 0 – 500 м (январь)

Выводы

На основе проведенного исследования показано, что предложенный комбинированный подход к оценке вертикального профиля индекса коэффициента преломления с использованием статистической информации и фактических параметров атмосферы, измеренных в месте расположения антенны МРЛ, позволяют существенно повысить точность задания вертикального профиля индекса коэффициента преломления по сравнению с использованием стандартной радиоатмосферы.

Установлено, что предложенная методика при ее использовании в выбранном для исследования месте дает положительные результаты в холодный период.

Выявленная по данным аэрологической станции г. Смоленска эффективность предложенной методики предполагает проведение дальнейших исследований. В том числе и с использованием аэрологической информации, полученной в других регионах. Это позволит выполнить оценку эффективности метода статистической экстраполяции в местах расположения каждого лоатора ДМРЛ отдельно. Практика распространения полученных для г. Смоленска результатов на другие пункты, скорее всего, не даст положительных результатов, поскольку ранее авторами в работе [3] было показано отсутствие пространственной связи между коэффициентами преломления на типичных для установки ДМРЛ расстояниях.

Литература

1. Восканян К.Л., Жуков В.Ю., Крюкова С.В. и др. Атмосферная рефракция радиоволн СВЧ-диапазона // СПб.: Изд-во Ниц Арт. 2024. 94 с.
2. Zen Y, Blahak U., Neuper M., Jerger D. Radar Beam Tracing Methods Based on Atmospheric Refractive Index // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2014. Vol. 31. Issue 12. P. 2650—2670.
3. 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, выпуск 688, 2023. С. 55 — 61.
4. Кузнецов А. Д., Симакина Т. Е., Крюкова С. В., Саенко А. Г. Влияние погрешностей радиолокационной пеленгации аэрологических радиозондов на точность ветрового зондирования // Гидрометеорология и экология. 2023. №72. С. 407—419. doi: 10.33933/2713-3001- 2023-72-407-419.
5. Базлова Т.А., Бочарников Н.В., Брылёв Г.Б. Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети // СПб.: Гидрометеиздат. 2002. — 331 с.
6. Базлова Т.А. Бочарников Н.В., Брылёв Г.Б. Радиолокационные метеорологические наблюдения // СПб.: Наука, 2010. — 516 с.
7. Dettwiller L. Study of the lateral shift due to atmospheric refraction: alternative analytical methods // Journal of the Optical Society of Americ. 2024. Vol. 41. Issue 7. P. 1310—1318/ <https://doi.org/10.1364/JOSAA.522962>.
8. Lewis O., Brunt C., Kitchen M. A new method of retrieving atmospheric refractivity structure // Internation Journal of Remote Sensing. 2023. Vol. 44. P. 749—785.
9. Раковский, Ю. Н. Учет рефракции в расчете коэффициента пропускания атмосферы. // Оптический журнал. 2012. Т. 79, № 10. С. 3—6.
10. Дементьев, Д. В. Анализ классических методов учёта и определения рефракции в приземном слое атмосферы // Геодезия и картография. 2019. Т. 80, № 5. С. 2-11. – DOI 10.22389/0016-7126—2019—947—5—2—11. — EDN HEYNTZ.
11. Оводенко В. Б., Патронова Е. С., Соколов К. С., Трекин В. В. Анализ влияния кратковременных вариаций метеопараметров на ошибки измерения координат в РЛС // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2013. №6. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun13/2/text.pdf>
12. Fortunati S., Gini F., Greco M.S., Farina A. , Graziano A., Giompapa S., Castella, F.R. Correction of Refracted Propagation Effects for Airborne Radar Tracking // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2013. v. 49. № 1. P. 20 — 41.
13. Kuznetsov A., Seroukhova O., Simakina T. and Kryukova S. (2021) The vertical profile of the refraction coefficient for microwave radiation in the troposphere and its

variability. — Journal of Physics: Conference Series. 1991 (2021). 012008, IOP Publishing, doi:10.1088/1742—6596/1991/1/012008

14. University of Wyoming. College of Engineering. Department of Atmospheric Science. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://weather.uwyo.edu/> (дата обращения: 05.09.2023)].

15. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы // Л., Гидрометеиздат, 1984. 752 с.

16. Гурский Д.А., Турбина Е.С. Вычисления в Mathcad 12. // СПб.: Питер, 2006. 544 с.

17. Родос Л.Я. Электродинамика и распространение радиоволн. // СПб.: Изд-во СЗТУ, 2007. 90 с.

18. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии (Радиометеорология) // Л.: Гидрометиздат. 1966. 350 с.

19. Заболотный Н.С., Голдина В.Н. Использование математических моделей для определения показателя преломления атмосферы // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1987. № 2. С. 30—33.

20. Кузнецов А.Д. Оптимальное восстановление профилей температуры и влажности в атмосфере по наземным данным и статистической информации // Проблемы физики атмосферы.- Изд. ЛГУ. 1974. Вып. II. С. 52—56.

21. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2008. 407 с.

22. Малинин В.Н. Анализ временных рядов и случайных полей. – Издание 2, испр. и доп. – СПб.: РГГМУ, 2020. 196 с.

23. Островский Е.В., Фридзон М.Б. Тонкая структура вертикального профиля влажности, влияющая на распространение радиоволн в тропосфере // Научный вестник МГТУ ГА, серия Радиофизика и радиотехника. 2008. № 133. С. 30—39.