

Гидрометеорология и экология. 2025. № 79. С. 292—306.  
Hydrometeorology and Ecology. 2025;(79):292—306.

## ***МЕТЕОРОЛОГИЯ***

---

Научная статья  
УДК 551.501.81:535.321.9:001.891.573  
doi: 10.33933/2713-3001-2025-79-292-306

### **Статистическая экстраполяция профиля индекса коэффициента преломления**

***Анатолий Дмитриевич Кузнецов, Светлана Викторовна Крюкова,  
Виктория Сергеевна Никитина, Ольга Станиславовна Сероухова,  
Татьяна Евгеньевна Симакина***

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,  
Россия, kuznetsov1946@inbox.ru

*Аннотация.* Для проведения статистической экстраполяции по данным аэрологического радио-зондирования в холодный и теплый периоды сформированы ковариационные матрицы профилей индекса коэффициента преломления. На основе проведения численных экспериментов показана возможность восстановления в холодный период вертикального профиля значений индекса по его значению на уровне расположения антенны радиолокатора, определяемому 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.

*Для цитирования:* Кузнецов А. Д., Крюкова С. В., Никитина В. С. и др. Статистическая экстраполяция профиля индекса коэффициента преломления / А. Д. Кузнецов, С. В. Крюкова, В. С. Никитина, О. С. Сероухова, Т. Е. Симакина // Гидрометеорология и экология. 2025. № 79. С. 292—306. doi: 10.33933/2713-3001-2025-79-292-306.

## ***METEOROLOGY***

---

Original article

### **The refractive index profile statistical extrapolation**

***Anatoly D. Kuznetsov, Svetlana V. Kryukova, Victoria S. Nikitina,  
Olga S. Seroukhova, Tatyana E. Simakina***

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

*Summary.* The accuracy of solving radar problems largely depends on taking into account the actual vertical profile of the refractive index, which in turn depends on the actual distribution of meteorological

---

© Кузнецов А. Д., Крюкова С. В., Никитина В. С., Сероухова О. С., Симакина Т. Е., 2025

parameters with altitude. It is the large variability of meteorological parameters that is responsible for the change in refraction types in the atmosphere. Covariance matrices of refractive index profiles were formed to perform statistical extrapolation based on aerological radiosonde data in cold and warm periods. Based on numerical experiments, the possibility of reconstructing the vertical profile of index values in the cold period based on its value at the radar antenna location level, determined based on direct measurements of pressure, temperature and humidity, was shown. It is noted that the currently accepted practice of using the value of the standard refractive index gradient does not reflect real changes in refraction types in the tropospheric layers along the radio beam propagation path. Based on the conducted study, it is shown that the proposed combined approach to assessing the vertical profile of the refractive index and its gradient using statistical information and actual atmospheric parameters measured at the location of the MRL antenna allows for increasing the accuracy of accounting for refraction compared to using the standard radio atmosphere. It was found that the proposed method, when used at the location selected for the study, gives positive results only in the cold period. In the warm period, due to a decrease in correlation links between ground parameters and their values at different altitudes, the accuracy of statistical extrapolation is significantly reduced. Information about the profile will allow for a more correct account of radio wave refraction compared to using the standard radio atmosphere when calculating the trajectory of the meteorological radar beam. The seasonal feature of the proposed method revealed based on the data of the Smolensk aerological station suggests further research. Including using aerological information obtained in other regions. This will allow us to evaluate the effectiveness of the statistical extrapolation method at the locations of each DMRL locator separately.

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

*For citation:* Kuznetsov A. D., Kryukova S. V., Nikitina V. S., Seroukhova O. S., Simakina T. E. The refractive index profile statistical extrapolation. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(79):(292—306). doi: 10.33933/2713-3001-2025-79-292-306. (In Russ.).

## Введение

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. Типы рефракции по-разному влияют на траекторию распространения радиолуча [1, 2].

Актуальность работ по разработке методов и средств для определения фактического вертикального профиля индекса коэффициента преломления обусловлена, прежде всего, важностью правильного учета искривления луча, что позволяет повысить точность определения координат метеорологических целей радиолокационными методами. 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]. Так, например, в работе [3] показано, что при наклонной дальности 200 км, высоте объекта в 4000 м и угле места антенны радиолокатора  $0,5^\circ$  погрешность замены фактической пониженной рефракции на стандартную приводит к погрешности в определении высоты в 270 м, а замены фактической отрицательной рефракции на стандартную — к погрешности в 1020 м.

Рефракция существенно влияет на значение оптической толщи атмосферы заданного участка трассы, расчет которой используется в свето- и радиодальномерных измерениях. Учет искривления электромагнитного луча вследствие рефракции и смещения его в менее плотные слои атмосферы уменьшает значение

эффективной оптической толщи [9]. Причем влияние рефракции больше сказывается на значении оптической толщи, чем на удлинении трассы. Изменчивость рефракции приводит и к ошибкам определения превышений в тригонометрическом нивелировании, которые на несколько порядков выше приборных погрешностей современных электронных тахеометров [10].

Рефракция радиоволн и увеличение времени их распространения влияет также на геометрию радиолокационного изображения. Эти факторы требуют коррекции задержки сигнала и уменьшения скорости радиоволн, проявляющихся в смещении изображения в сторону увеличения расстояния.

При измерении наклонных расстояний большой длины необходимо иметь значения температуры, давления и влажности в точках траектории распространения электромагнитного излучения для учета рефракции. Такая информация необходима для расчета вертикального профиля индекса коэффициента преломления и его градиента.

Определить индекс коэффициента преломления с достаточной точностью возможно по материалам самолетного зондирования либо данным аэрологического радиозондирования. Однако получение такой информации связано с большими затратами и сложностью в организационном отношении, с недостаточной плотностью аэрологической измерительной сети, поэтому в настоящее время при расчетах параметров распространения радиолокационного импульса используют стандартную радиоатмосферу. В этом случае давление и влажность уменьшаются с высотой экспоненциально, а температура — линейно. При таком распределении метеорологических величин с высотой в средних широтах до высоты нескольких километров вертикальный градиент коэффициента преломления принимают равным  $-4 \times 10^{-8}$  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]. Так, на большей части ЕТР преобладающим типом рефракции является пониженная [13]. Однако, по расчетам авторов данной работы, частота слоев с повышенной рефракцией в теплый период доходит до 17 %, при такой рефракции луч испытывает более резкое искривление по сравнению с расчетным в стандартной радиоатмосфере.

Большинство опасных явлений погоды происходит в теплый сезон, именно в этот период резко увеличивается количество слоев, в которых происходит смена типа рефракции: с пониженной на повышенную, а также на отрицательную. Отрицательная рефракция представляет собой довольно редкое явление, но именно при такой рефракции, когда индекс коэффициента преломления возрастает с высотой, траектория луча обращена выпуклостью вниз и радиоволна удаляется от поверхности Земли, что сокращает дальность ее распространения [13].

Поскольку получить характеристики атмосферной среды в текущих точках траектории электромагнитной волны в момент наблюдения с высокой точностью практически невозможно, возникает задача определения профиля индекса

коэффициента преломления по информации о состоянии атмосферы только в начальной точке траектории радиолуча. В данной работе для учета влияния рефракции на траекторию распространения 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 с помощью стандартных метеорологических приборов для измерения атмосферного давления, температуры и влажности на уровне  $z = z_a$ .

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].

Целью данной работы является представление и апробация методики, позволяющей повысить точность оценки вертикального профиля индекса коэффициента преломления на основе использования фактических данных о значении индекса коэффициента преломления на уровне антенны радиолокатора и статистической информации.

### Алгоритм статистической экстраполяции

Для восстановления вертикального профиля коэффициента преломления необходимо выполнить следующие этапы.

1. 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  $e(z)$ . При формировании ансамбля учитывается сезон и выбирается аэрологическая станция, максимально близко расположенная к пункту размещения МРЛ.

Обычно данные аэрологического зондирования не содержат вертикальных профилей парциального давления водяного пара, поэтому такие профили могут быть рассчитаны по следующей формуле [15]:

$$e(z) = \frac{p(z)q(z)}{0.378q(z) + 622}, \quad (1)$$

где  $e(z)$  — парциальное давление водяного пара на высоте  $z$  [гПа],  $p(z)$  — атмосферное давление [гПа],  $q(z)$  — удельное содержание водяного пара [г/кг].

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].

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

$$N(z) = \frac{78.5}{T(z)} \left( p(z) + \frac{4800e(z)}{T(z)} \right), \quad (2)$$

где  $N(z)$  — индекс коэффициента преломления [ $N$ —ед.] на высоте  $z$ ,  $T(z)$  — температура воздуха [ $^{\circ}K$ ] на высоте  $z$ .

На рис. 1 представлены значения индекса коэффициента преломления, рассчитанные по данным аэрологического зондирования после проведения сплайн-интерполяции.

3. 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]. По аналогии для статистической экстраполяции профиля индекса преломления найдем отклонение  $N(z_0)$  от его среднего значения  $N_{cp}(z_0)$ :

$$N'(z_0) = N(z_0) - N_{cp}(z_0). \quad (3)$$

В предположении линейной корреляционной связи между отклонениями  $N'(z)$

$$N'(z) = N(z) - N_{cp}(z), \quad z = z_1, z_2 \dots z_m, \quad (4)$$

|    | A    | B      | C      | D      |
|----|------|--------|--------|--------|
| 1  |      | 1_фев  | 1_фев  | 2 фев  |
| 2  | z, м | 0:00   | 12:00  | 0:00   |
| 3  |      |        |        |        |
| 4  | 0    | 312.01 | 310.66 | 312.24 |
| 5  | 25   | 311.05 | 309.68 | 311.16 |
| 6  | 50   | 310.09 | 308.7  | 310.09 |
| 7  | 75   | 309.13 | 307.72 | 309.02 |
| 8  | 100  | 308.17 | 306.74 | 307.96 |
| 9  | 125  | 307.21 | 305.78 | 306.92 |
| 10 | 150  | 306.25 | 304.84 | 305.91 |
| 11 | 175  | 305.28 | 303.92 | 304.91 |
| 12 | 200  | 304.31 | 303.03 | 303.96 |
| 13 | 225  | 303.34 | 302.16 | 303.04 |
| 14 | 250  | 302.36 | 301.33 | 302.17 |
| 15 | 275  | 301.38 | 300.51 | 301.35 |
| 16 | 300  | 300.38 | 299.69 | 300.58 |
| 17 | 325  | 299.38 | 298.85 | 299.86 |
| 18 | 350  | 298.37 | 297.98 | 299.15 |

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

Fig. 1. Refractive index profiles (fragment).

можно по известному значению  $N'(z_0)$  получить следующую статистическую экстраполяцию профиля  $N(z)$  в отклонениях от среднего:  $N'_s(z)$  [20]:

$$N'_s(z) = N_s(z) - N_{cp}(z) = K(z, z_0) \times K^{-1}(z_0, z_0) \times N'(z_0), \quad (5)$$

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

В результате для оценки профиля индекса коэффициента преломления имеем:

$$N_s(z) = N'_s + N_{cp}(z). \quad (6)$$

### Результаты апробации алгоритма

Для апробации приведенного выше алгоритма использовались ансамбли данных аэрологического зондирования (индекс станции 26781, Смоленск) за три месяца 2019 г.: январь, февраль и март [14]. Каждый такой ансамбль содержал около 60 сроков зондирований. Методом сплайн-интерполяции все профили приводились к единой вертикальной сетке, рассчитывались ансамбли вертикальных профилей  $N(z)$  (см. формулы (1) и (2)), средние профили и ковариационные матрицы  $K(z, z_0)$ . При проведении расчетов предполагалось, что  $z_0 = 0$  м.

Учитывая статистический подход к восстановлению вертикального профиля индекса коэффициента преломления, были проанализированы коэффициенты корреляции  $r(z)$  значений  $N(z_0)$  со значениями индекса на других уровнях для двух сезонов. Выполнена оценка значимости коэффициентов корреляции с использованием критерия Стьюдента [21, 22]. Значимыми с доверительной вероятностью  $p = 99\%$  оказались коэффициенты корреляции, превышающие уровень  $r_{кр} > 0,35$ .

Для холодного периода 2019 г. в Смоленске максимальная высота  $z_{max}$ , до которой коэффициент корреляции оказывается значимым при  $p = 99\%$ , колеблется от 1500 до 2000 м. Коэффициент корреляции между  $N(z_0)$  и  $N(z)$  с высотой уменьшается и на высоте 600 м равен 0,7. Это косвенно указывает на то, что до этой высоты индекс коэффициента преломления можно восстановить по предлагаемой методике с приемлемой точностью.

Точность применения методики статэкстраполяции демонстрирует рис. 2. Здесь представлено распределение погрешностей экстраполяции ансамбля профилей  $N(z)$  для всех зондирований февраля на разных высотах (25, 100 и 300 м). Значения  $dN(z)$  представляет собой разность между  $N_s(z)$  и фактическими профилями  $N(z)$ :

$$dN(z) = N_s(z) - N(z). \quad (7)$$

Анализ кривых на этом графике 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. Построив профили индекса коэффициента преломления по фактическим данным для срока с номером 10 и двух соседних сроков зондирования, имеющих



Рис. 2. Распределение погрешностей экстраполяции в ансамбле профилей  $N(z)$  для февраля на высотах 25, 100 и 300 м.

Fig. 2. Extrapolation errors distribution in the ensemble of  $N(z)$  profiles for February at altitudes of 25, 100 and 300 m.

условные номера 9 и 11 (рис. 3 а), убеждаемся в «нетипичности» профиля №10 для используемого ансамбля.

Проанализируем, какие метеорологические величины оказали наибольшее влияние на вертикальное распределение индекса коэффициента преломления. На рис. 3 (б—г) представлены профили температуры, атмосферного давления и парциального давления водяного пара для этих же трех сроков.

Температура и давление монотонно уменьшаются с высотой (см. рис. 6 б и 6 в) и, следовательно, не являются причиной резкого увеличения погрешности восстановления профиля  $N(z)$  №10. Анализ кривых на рис. 6 г 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.

Рассмотренные результаты апробации алгоритма выполнены на зависимой выборке, когда ковариационная матрица рассчитывается для того же месяца, что и восстанавливаемые профили индекса коэффициента преломления. Например, ковариационная матрица вычислялась по ансамблю февральских профилей  $N(z)$  и те же профили использовались для оценки точности статистической экстраполяции.

На следующем этапе использовалась независимая выборка: ковариационная матрица рассчитывалась по февральскому ансамблю, а для восстановления

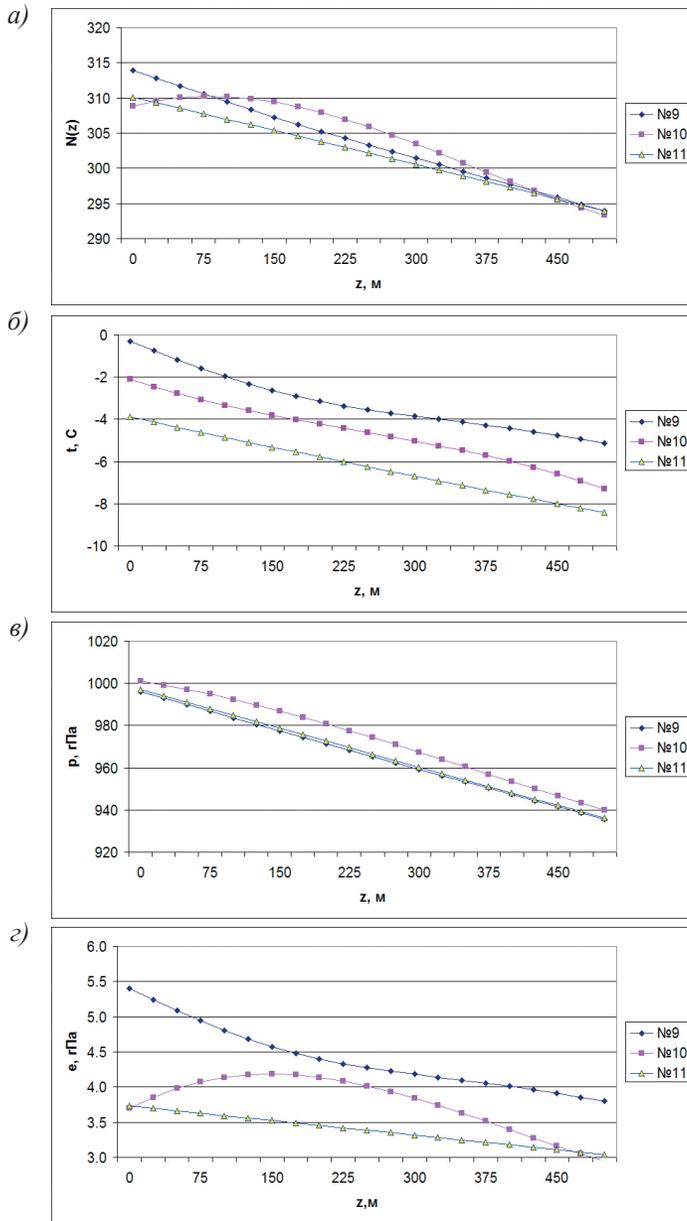


Рис. 3. Сопоставление вертикальных профилей для трех сроков зондирования с условными номерами 9, 10 и 11 (Смоленск, февраль, временной интервал — 12 часов): а) профиль  $N(z)$ , б) профиль  $t(z)$ , в) профиль  $p(z)$ , г) профиль  $e(z)$ .

Fig. 3. Vertical profiles comparison for three sounding periods with conditional numbers 9, 10 and 11 (Smolensk, February, time interval — 12 hours): а) profile  $N(z)$ , б) profile  $t(z)$ , в) profile  $p(z)$ , г) profile  $e(z)$ .

профилей индекса коэффициента преломления использовались профили из январского или мартовского ансамблей.

Для анализа устойчивости ковариационных связей к сезонной изменчивости была проведена серия расчетов  $N_j(z)$ , когда для ансамбля профилей  $N_j(z)$  конкретного месяца (например, января) использовались ковариационные матрицы как для этого же месяца (в нашем примере январь — это случай использования зависимого ансамбля профилей  $N(z)$ ), так и других месяцев (февраль или март; независимый ансамбль). Типичным примером такого исследования являются результаты, представленные в табл. 1. Здесь приведено сравнение погрешностей восстановления индексов коэффициента преломления  $N(z)$  на высотах  $z = 25$  м,  $z = 100$  м и  $z = 300$  м, рассчитанных по зависимой и независимой выборкам, состоящим из 57 профилей.

Таблица 1

Статистические характеристики погрешности восстановления  $N(z)$  при различных схемах задания ковариационной матрицы (январь, 62 срока зондирования)

Statistical characteristics of the error in retrieval of  $N(z)$  for different schemes of specifying the covariance matrix (January, 62 sounding period)

| Вариант расчета  | СКО $dN(z)$ , $N$ -ед. |      |
|--|------------------------|------|
| $N$ и $N_j$ январь, ковариационная матрица — январь, зависимый ансамбль    | $z = 25$ м             | 0,15 |
|  | $z = 100$ м            | 0,23 |
|  | $z = 300$ м            | 0,47 |
| $N$ и $N_j$ январь, ковариационная матрица — февраль, независимый ансамбль | $z = 25$ м             | 0,15 |
|  | $z = 100$ м            | 0,13 |
|  | $z = 300$ м            | 0,33 |
| $N$ и $N_j$ январь, ковариационная матрица — март, независимый ансамбль    | $z = 25$ м             | 0,16 |
|  | $z = 100$ м            | 0,13 |
|  | $z = 300$ м            | 0,33 |

Средние значения погрешности в обоих вариантах близки к нулю, средние квадратические отклонения (СКО) не превышают 0,33  $N$ -ед.

Результаты расчетов показали устойчивость статистической оценки, поскольку замена ковариационной матрицы с январской на февральскую, т.е. использование как зависимого, так и независимого ансамбля практически не сказывается на точности восстановления. Из этого следует, что статистическая связь высотных профилей  $N(z)$  для холодного периода оказалась устойчивой.

Рассчитанные по уравнению (2) значения индекса рефракции по фактическим данным аэрологического зондирования и значения, определенные по модели статистической экстраполяции (6) для января по зависимой выборке и для февраля по независимой выборке приведены на рис. 5. Высокий коэффициент детерминации свидетельствует о высокой степени совпадения  $N(z)$  и  $N_j(z)$  при использовании как зависимой статистической информации (для профилей января и ковариационной матрицы января  $R^2 = 0,9971$ ), так и независимой статистической информации (для профилей января ковариационная матрица была заменена

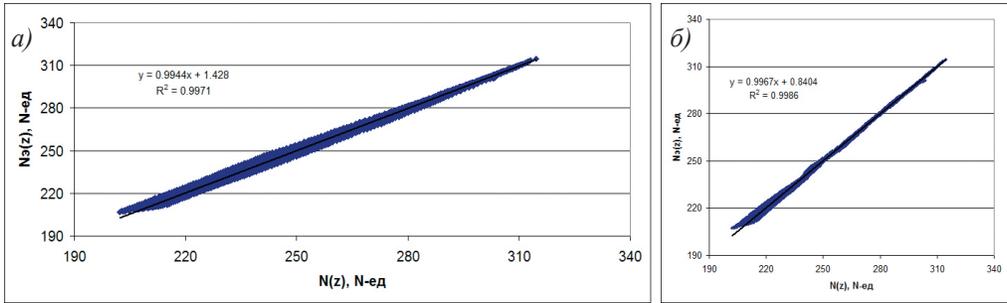


Рис. 4. Диаграмма «рассеяния» между значениями индекса рефракции на высотах 0—5000 м, рассчитанными по формуле (2), и восстановленными по модели статистической экстраполяции (6) для января: (а) по зависимой выборке и (б) по независимой выборке: профили — январь, ковариационная матрица — февраль.

Fig. 4. Scatter plot between the refractive index values at altitudes of 0—5000 m, calculated using formula (2) and reconstructed using the statistical extrapolation model (6) for January: (a) for the dependent sample and (b) for the independent sample: profiles — January, covariance matrix — February.

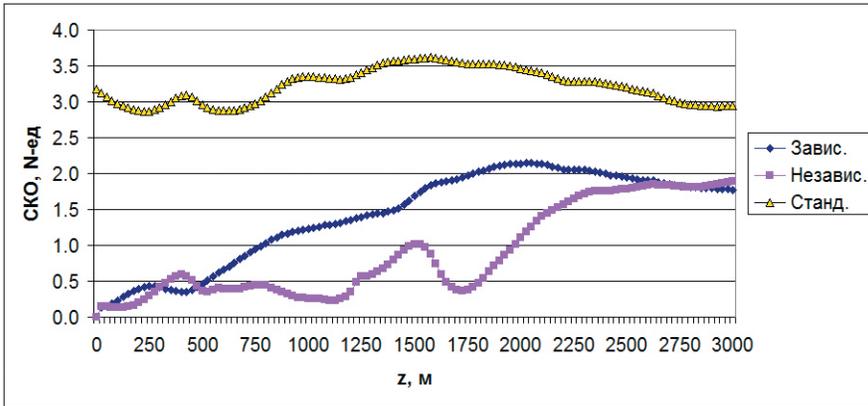


Рис. 5. Вертикальный профиль СКО  $N_3(z)$  от  $N(z)$  для февральского ансамбля.

Fig. 5. Standard deviation vertical profile of  $N_3(z)$  from  $N(z)$  for the February ensemble.

на ковариационную матрицу февраля  $R^2 = 0,9986$ , это выше, чем для зависимого ансамбля).

На рис. 5 представлены средние профили среднего квадратического отклонения  $N_3(z)$  от среднего фактического профиля  $N(z)$  для января по зависимой выборке и для февраля по независимой выборке. Несмотря на значительную изменчивость коэффициента преломления в нижнем километровом слое атмосферы, обусловленную наиболее резкими здесь изменениями температуры и влажности воздуха, погрешность восстановления не превышает 1 N-ед до высоты 700 м по зависимой

выборке и до 2 км по независимой выборке. Высокая точность измерения индекса в приземном слое особенно важна, поскольку значения погрешностей решения радиолокационных задач максимальны при малых углах места антенны [3].

Значение СКО растет с высотой вследствие уменьшения корреляционных связей значений  $N(z)$  с  $N(z_0)$  и достигает 2,2  $N$ -ед на высоте 2 км, что в среднем составляет всего около 1 %.

Третья кривая на рис. 6 представляет СКО между значениями  $N(z)$  и профиля индекса коэффициента преломления, вычисленного для стандартной радиатмосферы (при градиенте  $-4 \times 10^{-8}$  1/м). В этом случае погрешность значительно больше и в среднем составляет значение около 3  $N$ -ед, а в трех случаях из шестидесяти превышает 6  $N$ -ед.

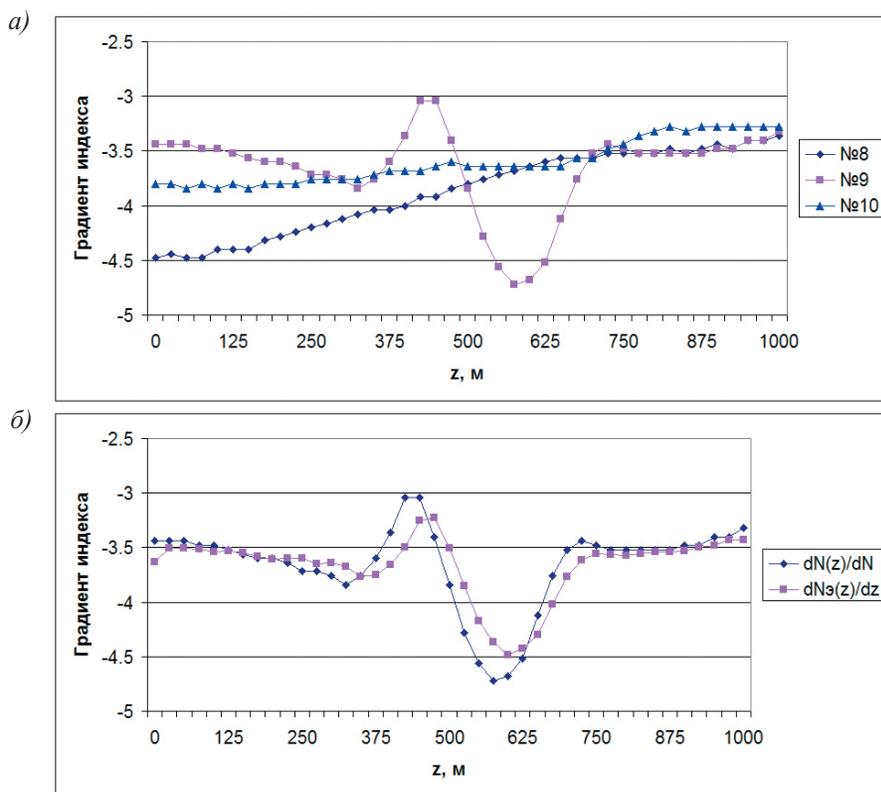


Рис. 6. Вертикальные профили градиента индекса коэффициента преломления  $[dN(z)/dz \times 10^2$  1/м] (январь):

а) за три последовательных срока зондирования №8, №9 и №10;

б) сопоставление фактического и восстановленного профилей в срок №9.

Fig. 6. Vertical profiles of the refractive index gradient  $[dN(z)/dz \times 10^2$  1/m] (January):

a) for three consecutive sounding periods No. 8, No. 9 and No. 10;

b) comparison of the actual and reconstructed profiles at period No. 9.

Тип рефракции в атмосфере определяется скоростью изменения индекса преломления с высотой. Правильное определение высоты слоя, в котором меняется тип рефракции, а следовательно, происходит наиболее резкое изменение кривизны радиолуча, повышает точность решения радиолокационных задач.

Рис. 6 а демонстрирует профиль градиента индекса коэффициента преломления  $dN(z)/dz$  за три последовательных срока, разделенных временным промежутком в 12 часов. В срок зондирования с номером 9 (см. соответствующую кривую на рис. 9 а) в слое 550—650 м наблюдается смена типа рефракции с пониженной на повышенную, поскольку градиент индекса дважды переходит через константу  $-4 \times 10^{-8}$  1/м.

На рис. 6 б приведен тот же профиль градиента в срок № 9, а также профиль градиента, рассчитанный по восстановленному по данной методике профилю  $N(z)$ . Заметно хорошее совпадение уровней перехода через константу  $-4 \times 10^{-8}$  1/м обеих кривых, таким образом методика статэкстраполяции позволяет определять высоты, на которых происходит смена типа рефракции. Понятно, что если профиль градиента рассчитан по параметрам стандартной радиоатмосферы и, следовательно, является константой, то указать на высоту изменения кривизны радиолуча он не в состоянии.

### Заключение

Принятая в настоящее время практика использования стандартного градиента индекса коэффициента преломления не отражает реальные изменения типов рефракции в слоях тропосферы на пути распространения радиолуча.

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

Установлено, что предложенная методика при ее использовании в выбранном для исследования месте дает положительные результаты только в холодный период. В теплый период из-за снижения корреляционных связей между наземными параметрами и их значениями на различных высотах точность статистической экстраполяции вертикальных профилей  $N(z)$  и  $dN(z)/dz$  значительно снижается.

Выявленная по данным аэрологической станции г. Смоленска сезонная особенность 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 локатора 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, поэтому для них нужны дополнительные расчеты.

**Список литературы**

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*. 2023. Вып. 688. 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 America*. 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 // *International 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. Vol. 49. No. 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.: Гидрометеиздат, 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. Изд.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 Радиотехника и радиотехника*. 2008. № 133. С. 30—39.

## References

1. Voskanyan K. L., Zhukov V. Yu., Kryukova S. V. et al. *Atmosfernaya refrakciya radiovoln SVCh-diapazona = Atmospheric refraction of microwave radio waves*. SPb.: Izd-vo Nic Art. 2024: 94 p. (In Russ.).
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; 31(12): (2650—2670).
3. Zhukov V. Y., Kuznetsov A. D., Nikitina V. S. Modeling the influence of refraction on the determination of target coordinates during radar observations. *Trudy VKA A. F. Mozhajskogo. = Proceedings of the A. F. Mozhaisky Military Space Academy*. 2023; (688): (55—61). (In Russ.).
4. Kuznetsov A. D., Simakina T. E., Kryukova S. V. et al. Influence of Errors in Radar Direction Finding of Aerological Radiosondes on the Accuracy of Wind Sounding. *Gidrometeorologiya i e'kologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2023; (72): (407—419). (In Russ.). doi: 10.33933/2713—3001—2023—2—407—419.
5. Bazlova T. A. Bocharnikov N. V., Brilev G. B. *Meteorologicheskie avtomatizirovannye radiolokacionnye seti = Meteorological automated radar networks*. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2002: 331 p. (In Russ.).
6. Bazlova T. A., Bocharnikov N. V., Brilev G. B. *Radiolokacionnye meteorologicheskie nablyudeniya = Radar meteorological observations*. SPb.: Nauka, 2010: 516 p. (In Russ.).
7. Dettwiller L. Study of the lateral shift due to atmospheric refraction: alternative analytical methods, and new results. *Journal of the Optical Society of America*. 2024; 41(7): (1310—1318). doi: 10.1364/JOSAA.522962.
8. Lewis O., Brunt C., Kitchen M. A new method of retrieving atmospheric refractivity structure. *International Journal of Remote Sensing*. 2023; (44): (749—785).
9. Rakovskij Yu. N. Taking into account refraction in calculating the atmospheric transmittance coefficient. *Opticheskij zhurnal = Optical Journal*. 2012; 79(10): (3—6).
10. Dementev D. V. Analysis of classical methods of accounting and determining refraction in the surface layer of the atmosphere. *Geodeziya i kartografiya = Geodesy and cartography*. 2019; 80(5): (2—11). (In Russ.). DOI 10.22389/0016—7126—2019—947—5—2—11.
11. Ovodenko V. B., Patronova E. S., Sokolov K. S., Trekin V. V. Analysis of the influence of short-term variations in meteorological parameters on coordinate measurement errors in radar. *Zhurnal radioelektroniki: elektronnyj zhurnal = Journal of Radio Electronics*. 2013; (6). Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/jun13/2/text.pdf> (accessed on: 15.11.2024). (In Russ.).
12. Fortunati S., Gini F., Greco M. S. et al. Correction of Refracted Propagation Effects for Airborne Radar Tracking. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2013; 49(1): (20—41).
13. Kuznetsov A., Seroukhova O., Simakina T. et al. The vertical profile of the refraction coefficient for microwave radiation in the troposphere and its variability. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; (74—83). doi:10.1088/1742-6596/1991/1/012008.
14. University of Wyoming. College of Engineering. Department of Atmospheric Science. Available at: <http://weather.uwyo.edu/> (accessed on: 05.09.2023).
15. Matveev L. T. *Kurs obshej meteorologii. Fizika atmosfery = General meteorology course. Atmospheric physics*. L., Gidrometeoizdat, 1984: 752 p. (In Russ.).
16. Gurskij D. A., Turbina E. S. *Vychisleniya v Mathcad 12 = Calculations in Mathcad 12*. SPb.: Piter, 2006: 544 p. (In Russ.).
17. Rodos L. Ya. *Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln = Electrodynamics and radio wave propagation*. SPb.: Izd-vo SZTU, 2007: 90 p. (In Russ.).
18. Stepanenko V. D. *Radiolokaciya v meteorologii (Radiometeorologiya) = Radar in meteorology (Radio meteorology)*. / L.: Gidrometizdat, 1966: 350 p. (In Russ.).
19. Zabolotnyj N. S., Goldina V. N. Using Mathematical Models to Determine the Atmospheric Refractive Index. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotosemka = News of universities. Geodesy and aerial photography*. 1987; (2): (30—33). (In Russ.).
20. Kuznecov A. D. Optimal reconstruction of temperature and humidity profiles in the atmosphere from ground-based data and statistical information. *Problemy fiziki atmosfery = Problems of Atmospheric Physics*. Izd. LGU., 1974; (II): (52—56). (In Russ.).

21. Malinin V. N. *Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoy informacii = Statistical methods of analysis of hydrometeorological information*. SPb.: RGGMU, 2008: 407 p. (In Russ.).
22. Malinin V. N. *Analiz vremennyh ryadov i sluchajnyh polej = Time Series and Random Field Analysis*. Izdanie 2, ispr. i dop. SPb.: RGGMU, 2020: 196 p. (In Russ.).
23. Ostrovskij E. V., Fridzon M. B. Fine structure of the vertical humidity profile affecting radio wave propagation in the troposphere. *Nauchnyj vestnik MGTU GA, seriya Radiofizika i radiotekhnika = Scientific Bulletin of MSTU GA, series Radiophysics and Radio Engineering*. 2008; (133): (30—39). (In Russ.).

### **Информация об авторах**

*Кузнецов Анатолий Дмитриевич*, доктор физико-математических наук, профессор, Российский государственный гидрометеорологический университет, kuznetsov1946@inbox.ru.

*Крюкова Светлана Викторовна*, кандидат физико-математических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет», krukos@gambler.ru.

*Никитина Виктория Сергеевна*, аспирант, Российский государственный гидрометеорологический университет, victoriaflint01@gmail.com.

*Сероухова Ольга Станиславовна*, кандидат физико-математических наук, доцент, Российский государственный гидрометеорологический университет, serouhova@inbox.ru.

*Симакина Татьяна Евгеньевна*, кандидат физико-математических наук, доцент, Российский государственный гидрометеорологический университет, tatiana.simakina@gmail.com.

### **Information about authors**

*Kuznetsov Anatoly Dmitrievich*, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Russian State Hydrometeorological University.

*Kryukova Svetlana Viktorovna*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Russian State Hydrometeorological University.

*Nikitina Victoria Sergeevna*, Postgraduate Student, Russian State Hydrometeorological University.

*Seroukhova Olga Stanislavovna*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Russian State Hydrometeorological University.

*Simakina Tatyana Evgenyevna*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Russian State Hydrometeorological University.

**Конфликт интересов:** конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 01.03.2025*

*Принята в печать 05.05.2025*

*The article was received on 01.03.2025*

*The article was accepted on 05.05.2025*