

Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - «Муром 2021»

### **Оценка изменчивости вертикального профиля индекса коэффициента преломления СВЧ-излучения в тропосфере**

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

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет»,  
tatiana.simakina@gmail.com*

*Показаны особенности распространения радиоволн в связи с изменчивостью коэффициента преломления в тропосфере. Отмечено, что наличие в атмосфере аномалий высотного профиля влажности – зон с повышенным и пониженным содержанием водяного пара, определяет тип рефракции радиоволн.  
Ключевые слова: рефракция, микроволновое излучение, индекс коэффициента преломления, вертикальный профиль коэффициента преломления.*

### **Evaluation of the variability of the vertical profile of the refractive index of microwave radiation in the troposphere**

A. D. Kuznetsov, O.S. Seroukhova, T. E. Simakina, S. V. Kryukova  
*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian State Hydrometeorological University", tatiana.simakina@gmail.com*

*The features of the propagation of radio waves in connection with the variability of the refractive index in the troposphere are shown. It is noted that the presence of anomalies in the altitude profile of humidity in the atmosphere - zones with increased and decreased water vapor content - determines the type of radio wave refraction.*

*Keywords: refraction, microwave radiation, refractive index index, vertical refractive index profile.*

### **Введение**

Неоднородная и изменчивая структура атмосферы ограничивает возможности и точность радиотехнических систем. Для оценки эффективности работы радиолокационных станций (РЛС) СВЧ-диапазона и, в том числе, доплеровских метеорологических радиолокаторов (ДМРЛ), а также для повышения точности идентификации облачных образований при использовании ДМРЛ, необходимо иметь сведения о специфических радиометеорологических характеристиках атмосферы.

Процессы в атмосфере, закономерности в распределении метеорологических величин влияют на пространственную и временную изменчивость вертикального профиля показателя преломления и его градиента и, тем самым, на эффективность работы РЛС, а также на надежность обнаружения метеорологических образований с помощью ДМРЛ [1, 2]. При оценке эффективности работы конкретного локатора нужно исходить из особенностей рефракции в тропосфере над местом установки данного локатора. В свою очередь тип рефракции зависит от метеорологических условий, которые определяются в том числе и локальными условиями территории.

Работа посвящена исследованию вертикальной структуры коэффициента преломления

на основе использования данных вертикального зондирования атмосферы на 8 аэрологических станциях.

### Методика исследования

Коэффициент преломления  $n$  (КП) радиоволн для СВЧ-диапазона в тропосфере обычно определяется с помощью полуэмпирической формулы [3]:

$$n = 1 + \left[ \frac{78.5}{T} \left( p + \frac{4800 e}{T} \right) \right] * 10^{-6} = 1 + N * 10^{-6} \quad (1)$$

Величину  $N = (n - 1)10^6$  называют индексом коэффициента преломления (ИКП).

Локальные изменения давления, а также температурные инверсии приводят к колебаниям коэффициента преломления вблизи земной поверхности  $n = 1,00026 - 1,00046$ . Выше 10 км полагают  $n = \text{const} = 1,00011$ .

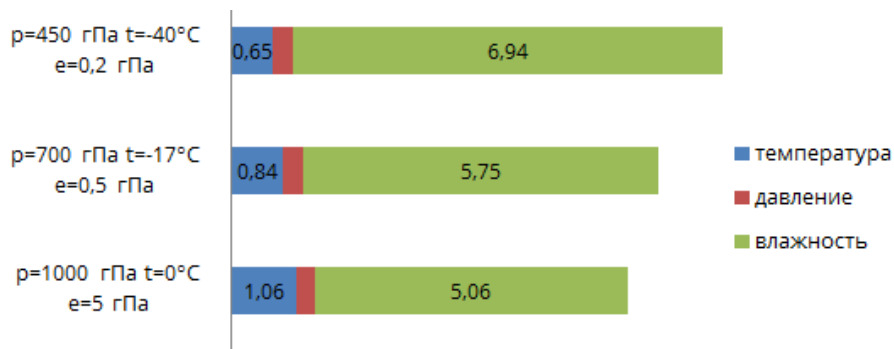
### Анализ влияния метеорологических параметров атмосферы на скорость изменения индекса коэффициента преломления с высотой

В реальной атмосфере вследствие изменений температуры, давления и влажности происходят сложные пространственно – временные изменения коэффициента преломления. Рассмотрим частные производные уравнения (1), отражающие чувствительность ИКП к изменению температуры, влажности и давления:

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dT} &= - \left[ \frac{78.5p}{T^2} + \frac{2 \cdot 4800e}{T^3} \right] \\ \frac{dN}{de} &= \frac{78.5 \cdot 4800}{T^2} \\ \frac{dN}{dp} &= \frac{78.5}{T} \end{aligned} \quad (2)$$

Анализ данных, полученных при использовании уравнений (2) показал, что изменение ИКП вследствие изменения давления определяется только температурой: чем выше к тропопаузе, тем больше «скорость» уменьшения значения ИКП. Еще больше от температуры зависит изменение ИКП вследствие изменения влажности: «скорость» падения ИКП обратно пропорциональна квадрату температуры. Зависимость изменения ИКП вследствие изменения температуры сложнее всего: она обусловлена всеми тремя метеоэлементами.

Количественные значения скорости изменения ИКП при подстановке характерных реальных значений температуры, влажности и давления представлены в виде диаграммы на рис. 1. Здесь приведены данные по «скорости» изменения ИКП на трех высотах в атмосфере: 0 км, 3 км и 6 км. Цветными прямоугольниками показаны факторы влияния.



**Рис. 1** Диаграмма распределения характерных значений  $dN/dT$ ,  $dN/de$  и  $dN/dp$  для трех высот: 0 км, 3 км и 6 км

Зеленый прямоугольник отражает скорость изменения ИКП при изменении только влажности, тогда как температура и давление имеют значения, типичные для данной высоты. Цифры в прямоугольниках показывают на сколько  $N$ -ед. изменится ИКП при изменении парциального давления на 1 гПа.

Из анализа рис. 1 следует, что наибольшее влияние на изменения величины ИКП оказывают вариации парциального давления водяного пара, причем это влияние несущественно увеличивается с высотой.

Красный и синий прямоугольники отражают влияние давления и температуры на «скорость» изменения коэффициента преломления. Понижение температуры с высотой вызывает небольшое уменьшение индекса преломления от 1  $N$ -ед. на уровне моря до 0,7  $N$ -ед. Изменение индекса преломления за счет падения давления наименьшее, и с высотой оно практически не меняется, составляя значение около 0,3  $N$ -ед.

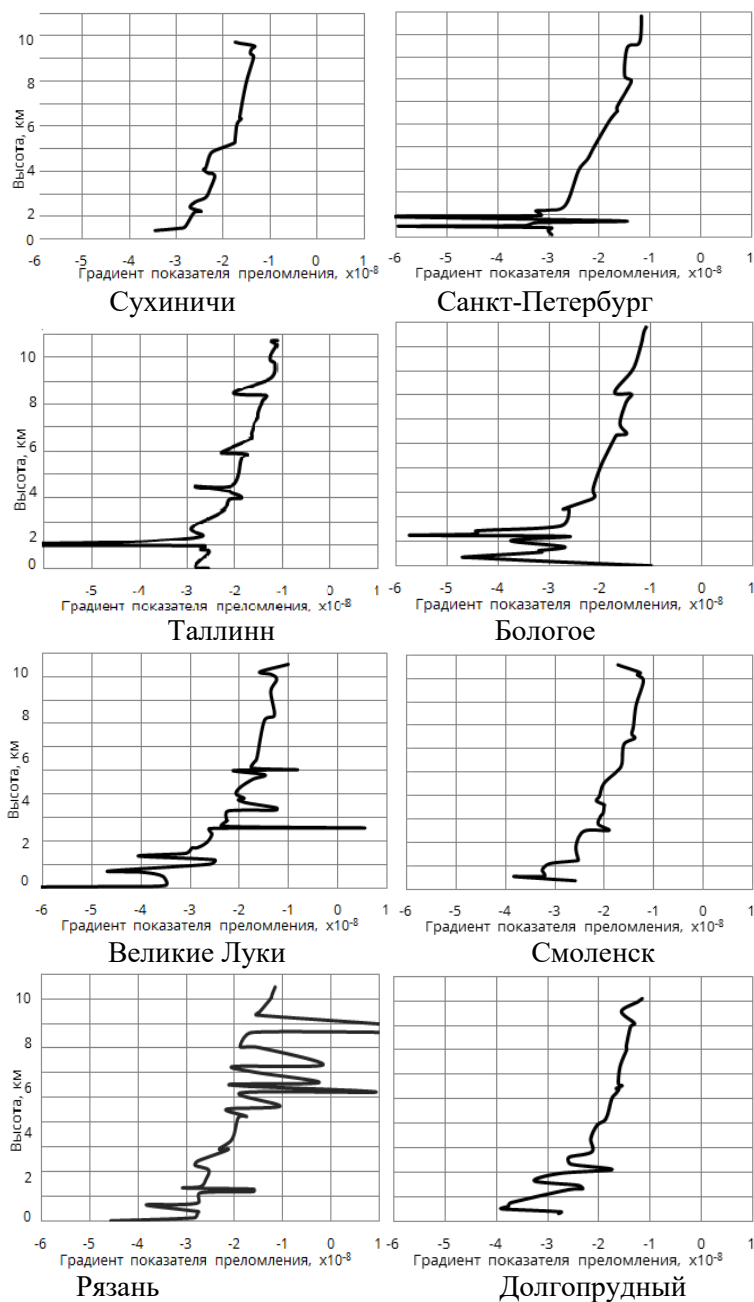
### **Особенности профиля индекса коэффициента преломления и его градиента**

Распределение водяного пара в тропосфере отличается большой изменчивостью и слоистостью, следовательно, профиль градиента индекса коэффициента преломления (ГИКП) также будет испытывать резкие колебания. Это хорошо заметно из анализа, представленного на рис. 2 высотного хода профилей ИГКП, построенных по данным аэрологического зондирования на станциях Санкт-Петербург, Таллинн, Сухиничи, Бологое, Великие Луки, Смоленск, Рязань и Долгопрудный.

Траектория распространения радиолокационного импульса в тонких слоях с резкими перепадами влажности, на типичность которых в атмосфере указывают авторы работы [4], могут довольно резко менять свое направление. Увеличение флуктуаций индекса преломления вдоль земной поверхности заметно на вертикальных профилях Санкт-Петербурга и Таллинна. Здесь, видимо, сказывается близость морских акваторий и, вследствие этого, наличие сильных горизонтальных градиентов индекса коэффициента преломления. Возможность наличия сильных горизонтальных градиентов индекса преломления: до 2  $N$ -ед./100 м, отмечается в работе [5]. В этом случае флуктуации горизонтального градиента индекса преломления над неоднородной земной поверхностью оказывают дополнительное влияние на флуктуации наклонной дальности, измеряемые РЛС.

Существование инверсионных слоев температуры, а также слоев с резким падением температуры сопровождается повышенным значением турбулентной энергии, что также влияет на ГИКП. Наибольшее изменение рефракции связано в основном с «деформацией»

высотного распределения метеорологических элементов в облаках [6]. Степень влияния облачности на рефракцию зависит от высоты расположения облака и его мощности. Чем ниже основание облака и чем больше его мощность, тем значительнее это влияние при прочих равных условиях.



**Рис. 2** Примеры вертикальных профилей ГИКП для 8 станций аэрологического зондирования атмосферы

### Вертикальное распределение типов рефракции в тропосфере

Стандартная радиоатмосфера, относительно которой обычно вводятся поправки на искривление луча, определяет среднее значение ГИКП в тропосфере как  $-4 \cdot 10^{-8}$  1/м. Рефракция с таким градиентом называется нормальной.

Однако среднее значение ГИКП во всей тропосфере не отражает всего многообразия вертикального распределения видов ГИКП в этой области атмосферы. Это прекрасно иллюстрируют кривые на рис. 2.

Для анализа повторяемости вертикального распределения видов рефракции в данной работе использовались результаты аэрологического зондирования на станции Воейково в Санкт-Петербурге за период 2019 г. (более чем 700 зондирований). Для каждого зондирования просматривался весь профиль ГИКП и определялось число случаев наличия того или иного вида рефракции вне зависимости от высоты, на которой такой тип рефракции был обнаружен. Таким образом, во время одного зондирования может наблюдаться большое количество разных видов рефракции. По результатам проведенного анализа количество наличия случаев нормальной рефракции на разных высотах составило менее 0,02%. Распределение остальных случаев показано в табл. 1.

**Таблица 1. Распределение ГИКП на высотах до 6 км по видам рефракции в Санкт-Петербурге**

Вид рефракции	ГИКП	Количество случаев	Частота случаев, %
Отрицательная	$>0$	909	2,4
Положительная пониженная	$<0$ и $> -4 \cdot 10^{-8}$	37019	95,8
Нормальная	$-4 \cdot 10^{-8}$	7	0,02
Положительная повышенная	$< -4 \cdot 10^{-8}$ и $> -15,7 \cdot 10^{-8}$	510	1,3
Критическая	$-15,7 \cdot 10^{-8}$	0	0
Сверхрефракция	$< -15,7 \cdot 10^{-8}$	140	0,4

Подавляющее большинство измерений – около 95.8 % - соответствует положительной пониженной рефракции. В этих слоях траектория радиолокационного импульса от РЛС будет меньше изгибаться по сравнению с нормальной рефракцией. В этом случае уменьшается радиус обнаружения цели (например, облачности).

Около 1,3 % значений ГИКП соответствуют наличию в вертикальных профилях слоев с положительной повышенной рефракцией (с большей выпуклостью луча), и только в 0,4 % случаев наблюдается наличие слоев со сверхрефракцией.

В 2,4 % случаев было выявлено наличие слоев в атмосфере с отрицательной рефракцией.

Таким образом, в реальной атмосфере траектория узкого луча зачастую будет иметь другую, по сравнению с нормальной рефракцией, форму. В этом случае использование параметров нормальной, а не реальной рефракции, будет приводить к погрешности вычисления высоты и наклонной дальности до радиолокационной цели (для ДМРЛ - облаков) [3]. Конечно, нужно учесть изменение вертикального сечения зондирующего

импульса по мере его удаления от РЛС (для ДМРЛ уже на расстоянии 50 км такое сечение составляет около 1 км), что приводит к «естественному» сглаживанию вертикального профиля ГИКП. Такое сглаживание с переменным размером по вертикали уменьшит флуктуации профиля ГИПК и снизит их влияние на траекторию луча.

#### **Заключение**

Показано наличие резких колебаний значений ИКП и ГИКП в вертикальных профилях их значений в нижней тропосфере и роль изменчивости в таких колебаниях температуры, влажности и давления.

На основе использования более 700 данных аэрологического зондирования атмосферы в Санкт-Петербурге (2019 год) проанализировано распределение повторяемости слоев атмосферы с разными видами рефракции. Показано, что нормальная рефракция наблюдалась только в 0,02% случаев. Неучет реальной рефракции будет приводить к погрешностям в измерении наклонной дальности и высоты объекта.

#### **Литература**

1. Колбин В. А., Кузнецов А. Д., Сероухова О. С., Симакина Т. Е., Солонин А. С. Валидация данных об опасных явлениях погоды, полученных доплеровским радиолокатором // Материалы V всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». Часть II. — СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского. 2018. С.64—67.
2. Мещеряков А.А., Госенченко С.Г., Кижнер Л.И. Влияние изменчивости индекса преломления тропосферы на дальность прямой видимости и погрешности измерения координат радиолокационных целей // Известия Томского политехнического университета. Математика и механика. Физика. 2011. Т. 318, № 2. С. 59–63.
3. Киселев В.Н., Кузнецов А.Д. Методы зондирования окружающей среды (атмосферы). СПб.: изд. РГГМУ. - 2004. - 429 с.
4. Кижнер Л. И., Мальцева Н.А. Параметры вертикального профиля индекса преломления тропосферы над северной частью Атлантического океана // Вестник Томского государственного университета. Выпуск № 365.- 2012. С. 175-180.
5. Матюгов С.С., Яковлев О.И., Павельев А.А, Павельев А.Г. Суточные, сезонные и долговременные вариации угла рефракции на трассах спутник-спутник как индикатор состояния атмосферы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 223–231.
6. Островский Е.В., Фридзон М.Б. Тонкая структура вертикального профиля влажности, влияющая на распространение радиоволн в тропосфере // Научный вестник МГТУ ГА, серия Радиоп физика и радиотехника. 2008, № 133. С.30-39.