

УДК [551.508.85:004.9; 621.371] (075.8) DOI: 10.24412/2304-0297-2025-1-259-264

Разработка модели прогноза рефракции радиоволн для обеспечения работы сети штормооповещения

В.С. Никитина, А.Д. Кузнецов, В. Ю. Жуков

ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет»,
г. Санкт-Петербург, Россия, ул. Воронежская, 7б.
E-mail: victoriaflint01@gmail.com

В работе приводится оценка статистических связей между значениями коэффициентов преломления, полученными по данным аэрологического зондирования. Производится расчет автокорреляции высотных профилей индекса коэффициента преломления и определяется высота, на которой коэффициенты автокорреляции еще являются значимыми. Рассчитывается радиус корреляции коэффициента преломления. Делается вывод о возможности прогнозирования коэффициента преломления и рефракции в области, ограниченной значимостью коэффициентов корреляции.

Ключевые слова: рефракция, радиолокация, корреляция, статистическое моделирование, прогнозирование, тропосфера.

Radio wave refraction forecast model development to ensure the operation of a storm warning network

V. S. Nikitina, A. D. Kuznetsov, V. Yu. Zhukov

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia.
E-mail: victoriaflint01@gmail.com

The paper presents an assessment of statistical relationships between refractive index values obtained from aerological sounding data. The autocorrelation of altitude profiles of the refractive index is calculated and the altitude at which the autocorrelation coefficients are still significant is determined. The correlation radius of the refractive index is calculated. A conclusion is made about the possibility of predicting the refractive index and refraction in the region limited by the significance of the correlation coefficients.

Key words: refraction, radiolocation, correlation, statistical modeling, forecasting, tropo-sphere.

Введение

Прогноз рефракции может существенно повысить точность радиолокационных наблюдений, однако, для реализации такого прогноза необходима статистическая информация о распределении коэффициентов преломления в атмосфере. Отсутствие взаимосвязи между значениями коэффициентов преломления для двух радиолокаторов, зоны обзора которых пересекаются, а также наличие значительных ошибок в определении координат метеорологических объектов [2], подчеркивают необходимость получения данных о распределении метеорологических параметров в непосредственной близости от радиолокатора.

Решить такую задачу можно, проводя измерения необходимых метеорологических параметров рядом с антенной радиолокатора. Затем на основе этих измерений можно вычислять коэффициент преломления и экстраполировать его значения на окружающее пространство. Это позволит получить более точные данные о рефракции в различных условиях.

Для успешной экстраполяции необходимо установить радиус корреляции коэффициента преломления и автокорреляцию данного параметра по высоте. Это поможет оценить пределы, в пределах которых экстраполяция может быть осуществлена с достаточной точностью.

Расчет корреляции коэффициента преломления по высоте

Для оценки коэффициентов автокорреляции использовалась информация о распределении метеорологических величин, полученная с аэрологической станции, расположенной в поселке Воейково. Данные выбирались за летние месяцы 2024 года в сроки 0 и 12 часов, причем выбор летнего временного периода был так же, как и ранее продиктован преобладанием стабильной атмосферы в летние месяцы на широте Санкт-Петербурга. Затем значения давления, температуры и влажности пересчитывались в значения коэффициента преломления и приводились к регулярной сетке с шагом 100 м. Далее определялся коэффициент автокорреляции каждого из рядов по формуле [1]:

$$f(L) = \sum_{L=0}^n r_{t,t-L}, \quad (1)$$

где

n – число элементов временного ряда;

r – коэффициент корреляции;

t – текущее положение во временной последовательности;

L – лаг временного ряда (заданное число, на которое сдвигается копия временного ряда).

Оценка значений автокорреляции позволит оценить высоту, до которой еще присутствует статистическая связь между значениями коэффициента преломления и, следовательно, до которой возможна экстраполяция данных.

В результате было установлено, что коэффициент автокорреляции рассматриваемого параметра линейно уменьшается с высотой и достигает критического уровня 0,5 на высоте 700 м над точкой проведения измерений. Следовательно, экстраполяция значений коэффициента преломления возможна только до этой высоты. Графики изменения коэффициента автокорреляции в зависимости от высоты представлены на рисунках 1-3.

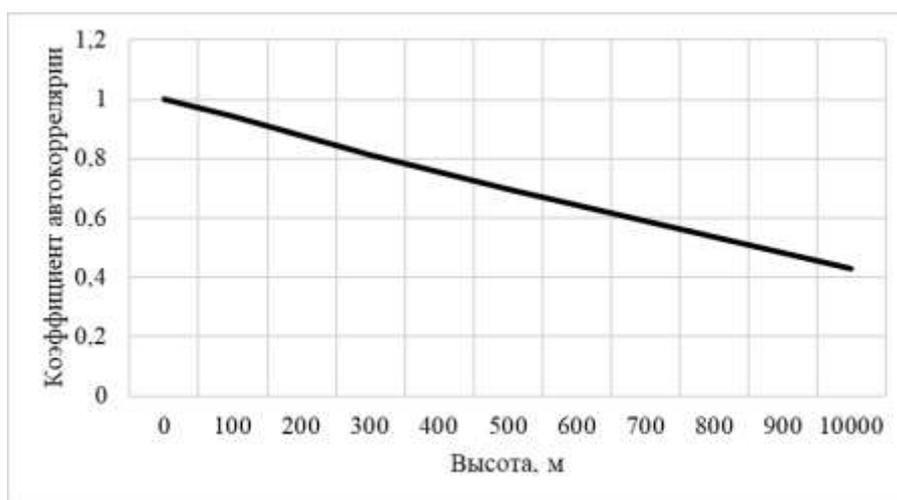


Рис. 1 - Зависимость коэффициента автокорреляции значений коэффициента преломления от высоты для июня 2024 года.

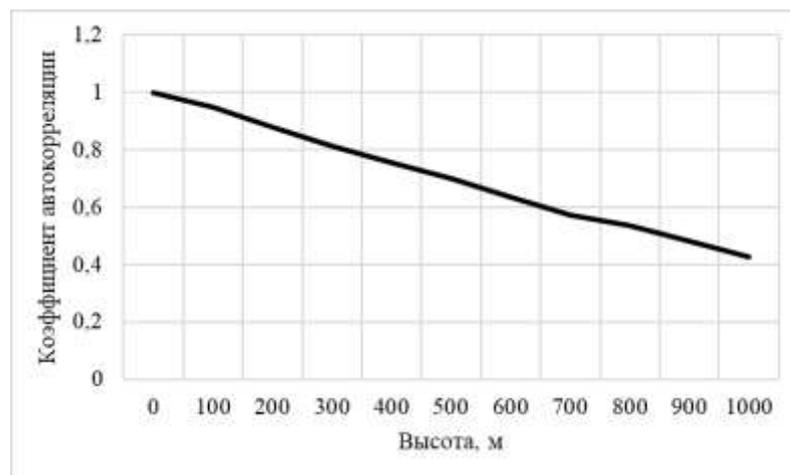


Рис. 2 - Зависимость коэффициента автокорреляции значений коэффициента преломления от высоты для июля 2024 года.

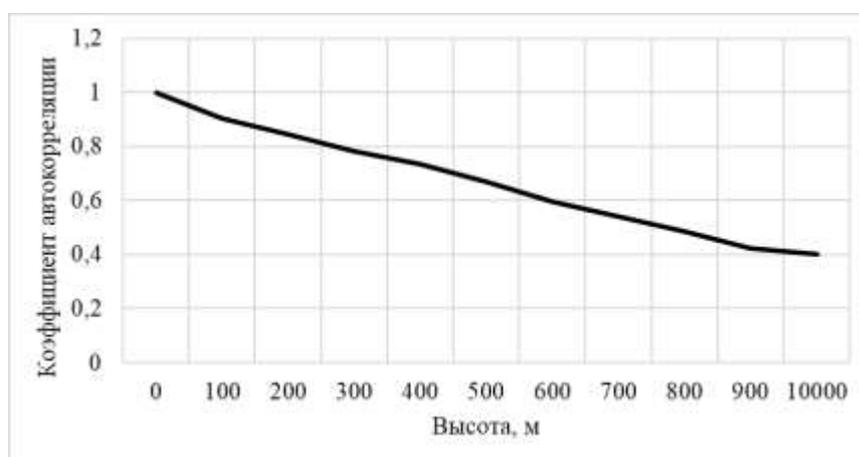


Рис. 3 - Зависимость коэффициента автокорреляции значений коэффициента преломления от высоты для августа 2024 года.

Затем по методике, упомянутой в работе [2] были рассчитаны погрешности, вызываемые разными типами рефракции в слое атмосферы толщиной 700 м. Результаты такого расчета представлены в таблице 1. Из них видно, что влияние нижнего слоя остается решающим и определяемые им погрешности почти в два раза превышают те, что обуславливаются влиянием следующего слоя. Особый интерес представляет свехрефракция – погрешности в этом случае оценить не представляется возможным, поскольку из-за своей кривизны луч достигает земли раньше, чем цели. Из таблицы 4 следует, что влияние на погрешности, хотя и меньшее, но все равно существенное, оказывает следующий за рассматриваемым слой атмосферы до высоты 1400 м. Учет влияния этого слоя еще более может повысить точность прогноза рефракции радиоволн, а значит и точность радиолокационных наблюдений. Однако, этого требуется оценивать коэффициент преломления на высоте 700 м, но в настоящее время это невозможно ввиду отсутствия технических средств для подобных оперативных измерений.

Таблица 1
Значения погрешностей высоты обнаружения цели для угла места антенны 0,5° (эталонная высота обнаружения цели Н = 4029 м)

Тип рефракции в изменяемом слое	$\frac{dn}{dz}$ в изменяемом слое, м ⁻¹	Слой, м	Высота, м	Погрешность по высоте ΔН, м
Пониженная	$-2 * 10^{-6}$	0-700	4516	+487
		700-1400	4303	+274
Сверхрефракция	$-20 * 10^{-6}$	0-700	-	-
		700-1400	-	-
Отрицательная	$4 * 10^{-6}$	0-700	5898	+1869
		700-1400	5050	+1021

Анализ радиуса корреляции коэффициентов преломления

Для нахождения пространственной корреляции коэффициентов преломления был проведен натурный эксперимент, заключающийся в определении коэффициентов корреляции между значениями коэффициента преломления, рассчитанными по данным двух удаленных друг от друга метеорологических станций.

На первом этапе были использованы станции, расположенные на крышах Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ) и Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского (ВКА им. А. Ф. Можайского). Расстояние между станциями составляло 8 км, и обе они находились в одинаковых физико-географических условиях – в городской застройке вблизи реки Невы, на высоте 30 м. Такая высота была выбрана исходя из того, что до высот 5 – 10 м имеют место большой градиент коэффициента преломления, что приводит к сверхрефракции, затем значение градиента уменьшается и на высотах 30-70 м приближается к нулевому значению [3]. После высоты 70 м начинается интересующий нас участок существенной зависимости коэффициента преломления с высотой. Следовательно, для того, чтобы прогнозировать рефракцию, надо знать корреляционные связи значений коэффициента преломления в точках, расположенных на высоте 30 - 70 м.

По синхронно получаемым значениям метеопараметров были рассчитаны суточные профили коэффициентов преломления для каждой станции для летних и зимних месяцев 2023 года и для зимних месяцев 2024 года с шагом 5 минут. Затем по формуле корреляции Пирсона определялись коэффициенты корреляции между полученными значениями. Результаты расчетов представлены в таблицах 2-3.

Таблица 2
Значения коэффициентов корреляции, полученные для некоторых месяцев 2023 года

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

Таблица 3
Значения коэффициентов корреляции, полученные для некоторых месяцев
2024 года

Месяц	01	02
Коэффициент корреляции R	0,99	0,19

Анализируя полученные результаты, 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 синоптической ситуации в атмосфере. Например, в период, характеризующийся большим количеством дней с устойчивой погодой, (например, при условии размытого барического поля, антициклональной активности или в малоградиентном теплом секторе циклона) 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 было зафиксировано прохождение фронтов, наличие осадков, гроз и т.д. имеют место 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 метеовеличинами, а, следовательно, и между коэффициентами преломления.

Наглядным подтверждением вышеизложенных фактов является практически линейная зависимость значений коэффициентов корреляции от количества дней, в течение которых атмосфера находилась в стабильном состоянии, представленная на рисунке 4.



Рис. 4 - График зависимости значений среднего за месяц коэффициента корреляции показаний датчиков влажности от числа дней со стабильной атмосферой в этом месяце. Данные взяты за февраль – декабрь 2023 года. Цифрами на графике указаны номера месяцев, для которых производился расчет.

Далее для определения радиуса корреляции значений коэффициента преломления расстояние, на котором рассчитывалась горизонтальная корреляция, было увеличено посредством установки еще одной метеорологической станции на крыше здания Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова в поселке Воейково

Ленинградской области. Затем расчет коэффициентов корреляции повторялся между значениями коэффициентов преломления на упомянутой станции и станции, установленной на крыше РГГМУ. Расчет проводился по данным для второй половины 2024 года, результаты расчета представлены в таблице 4.

Таблица 4.
Значения коэффициентов корреляции, полученные для некоторых месяцев 2024 года

Месяц	06	07	08	09	10	11	12
Коэффициент корреляции R	0,6	0,7	0,84	0,75	0,41	0,44	0,87

Анализ полученных результатов, показывает, что с увеличением расстояния между станциями зависимость коэффициентов корреляции от синоптической ситуации в атмосфере также сохраняется. При этом в месяцы, которые отличались благоприятными для исследования синоптическими ситуациями, перечисленными выше, коэффициенты корреляции принимают большие значения. Однако, можно заключит, что средние значения коэффициентов корреляции для месяцев со спокойной атмосферой убывают примерно на 0,1 каждые 10 км и, следовательно, достигают критического значения 0,5 на расстоянии 50 км, которое и является радиусом корреляции.

Выводы

1. В условиях благоприятных синоптических ситуаций (устойчивого антициклона, малоградиентного теплого сектора антициклона или размытого барического поля) существует пространственная корреляция коэффициента преломления в пределах области размером 700 м по высоте и диаметром 100 км.
2. В слое атмосферы до высоты 700 м наблюдается наибольшее влияние рефракции на искривление траектории электромагнитной волны радиолокатора.
3. Модель прогноза рефракции может включать в себя экстраполяцию значений коэффициента преломления в области, где значения коэффициентов преломления статистически связаны. Такая модель может быть использована с целью введения поправок в определение координат целей при производстве наблюдений.
4. Полученные в процессе данного эксперимента количественные оценки размера области корреляции должны быть адаптированы, как и многие параметры радиолокатора, к местным условиям, поскольку действительны только в районе проведения эксперимента (Санкт-Петербург и Ленинградская область).

Литература

1. В. В. Полякова, Н. В. Шаброва. Основы теории статистики: [учеб. пособие]; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – 2-е изд., испр. и доп. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 148 с.
2. В. Ю. Жуков, А. Д. Кузнецов, В. С. Никитина. 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.
3. Ю П. Акулиничев, А. В. Новиков. Модель пространственно-временного поля индекса преломления приземного слоя атмосферы. Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь №1(21), часть 2, 2010. С. 36 – 44.