

УДК: 537.86

DOI: 10.26907/rwp29.2025.396-399

## ПОСТРОЕНИЕ ИЗОЛИНИЙ РЕФРАКЦИИ ПО ДАННЫМ МЕТЕОСТАНЦИЙ В ДИАПАЗОНЕ УКВ ПО БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ

А.С. Базарова, Б.З. Гармаев, А.В. Базаров, Ю.Б. Башкуев, Е.Б. Атутов

Институт физического материаловедения СО РАН, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

E-mail: arunabas@mail.ru

**Аннотация.** Распространение ультракоротких радиоволн (УКВ) в значительной степени зависит от метеорологических факторов, которые варьируются в зависимости от климатических особенностей региона. Ключевым параметром, характеризующим эти условия, является индекс рефракции  $N$  атмосферы. По данным метеорологических станций территории Республики Бурятия и Иркутской области рассчитаны значения индекса рефракции  $N$  в стандартные метеорологические сроки (UTC+8), согласно методу, «типичные сутки». Данный метод предполагает группировку данных за каждые сутки месяца по конкретным метеорологическим срокам, что позволяет сформировать массивы данных для «типичных» суток месяца. На их основе рассчитаны статистические показатели и построены карты изолиний средних и стандартных отклонений индекса рефракции УКВ.

**Ключевые слова:** рефракция; распространение радиоволн; атмосферно-почвенный измерительный комплекс; нижний слой приземной атмосферы; ультракороткие радиоволны

## MAPPING REFRACTION CONTOURS BASED ON WEATHER STATION DATA IN THE VHF RANGE FOR THE LAKE BAIKAL REGION

A. S. Bazarova, B. Z. Garmaev, A. V. Bazarov, Yu. B. Bashkuev, E. B. Atutov

**Abstract.** The propagation of ultrashort radio waves (VHF) largely depends on meteorological factors, which vary depending on the climatic characteristics of the region. The key parameter characterizing these conditions is the refractive index  $N$  of the atmosphere. Based on data from meteorological stations in the Republic of Buryatia and the Irkutsk Region, the values of the refractive index  $N$  were calculated for standard meteorological periods (UTC+8) using the "typical day" method. This method involves grouping data for each day of the month by specific meteorological periods, which allows for the formation of data arrays for "typical" days of the month. Based on these, statistical indicators are calculated and maps of isolines of average and standard deviations of the VHF refractive index are constructed.

**Keywords:** refraction; propagation of radio waves; atmospheric-soil measuring complex; lower layer of the surface atmosphere; ultrashort radio waves

### Введение

Исследование влияния атмосферной рефракции на распространение ультракоротких волн имеет важное практическое значение, поскольку этот фактор непосредственно воздействует на работу радиосвязи, радиолокации, спутниковой навигации и других систем, использующих электромагнитные волны. Искривление траектории волн из-за рефракции приводит к многолучевому распространению, что вызывает замирания сигнала (фединг) и межсимвольные помехи. В системах цифровой связи это может приводить к ошибкам передачи данных и снижению пропускной способности каналов. Рефракция искажает дальность и углы в радиолокационных измерениях, что критично для авиации, морской навигации и военных систем. В спутниковых системах (GPS, ГЛОНАСС) атмосферные эффекты вызывают ошибки позиционирования, требующие коррекции.

Показатель преломления атмосферы зависит от температуры, влажности и давления, которые сильно варьируются в пространстве и времени. В условиях климатических изменений актуальность моделирования рефракции возрастает, так как меняются статистические характеристики распространения волн. Понимание закономерностей рефракции позволяет: улучшать планирование частотных ресурсов; повышать точность прогнозирования зон покрытия; разрабатывать алгоритмы компенсации искажений.

На сегодняшний день влияние атмосферной рефракции изучено для стандартных атмосферных условий, однако: региональные особенности (например, в горных районах, прибрежных зонах) требуют дополнительных исследований из-за неоднородности атмосферы.

Изменение климата может привести к сдвигам в статистике рефракционных эффектов, что требует актуализации моделей. Развитие технологий (5G, IoT, квазиоптические линии связи) повышает требования к точности прогнозирования распространения УКВ. Таким образом, исследования в этой области остаются востребованными как для фундаментальной науки, так и для прикладных задач радиосвязи, навигации и метеорологии.

### Содержание доклада

Рефракционные характеристики атмосферы определяются пространственно-временными вариациями диэлектрической проницаемости воздуха  $\varepsilon$  и связанного с ней коэффициента преломления  $n = \sqrt{\varepsilon}$  [1]. Значение индекса рефракции можно рассчитать на основе метеорологических параметров: атмосферного давления, температуры и влажности по формуле [2]:

$$N = (n - 1) * 10^6 = \frac{77,6}{T} \left( P + \frac{4810}{T} * e \right), \quad (1)$$

где  $P$  – атмосферное давление, [мбар];  $e$  – упругость водяного пара, [мбар];  $T$  – абсолютная температура воздуха, [K].

Расчет значений индекса рефракции и построение карт изолиний выполнялись на основе данных метеостанций с использованием автоматизированной информационной системы контроля радиометеорологических параметров тропосферы «Метео N» [3]. Данная система разработана для анализа пространственно-временных изменений приземной рефракции. В исследовании использовались данные метеорологических станций, расположенных на территории Республики Бурятия и Иркутской области (рисунок 1). Измерения на станциях проводятся на высоте 2 метра над поверхностью.

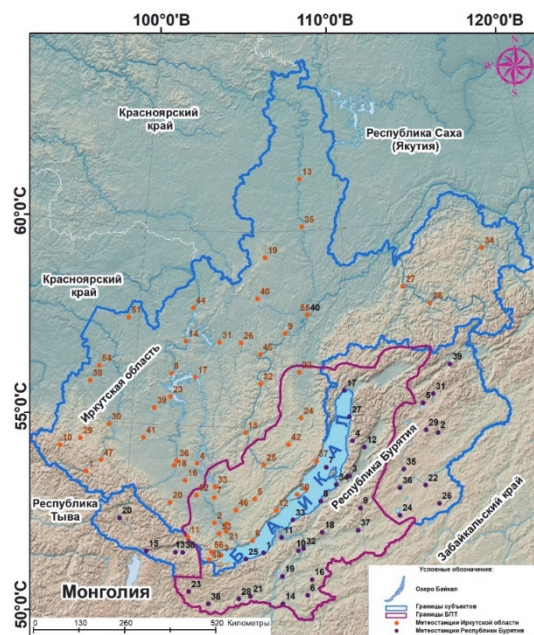
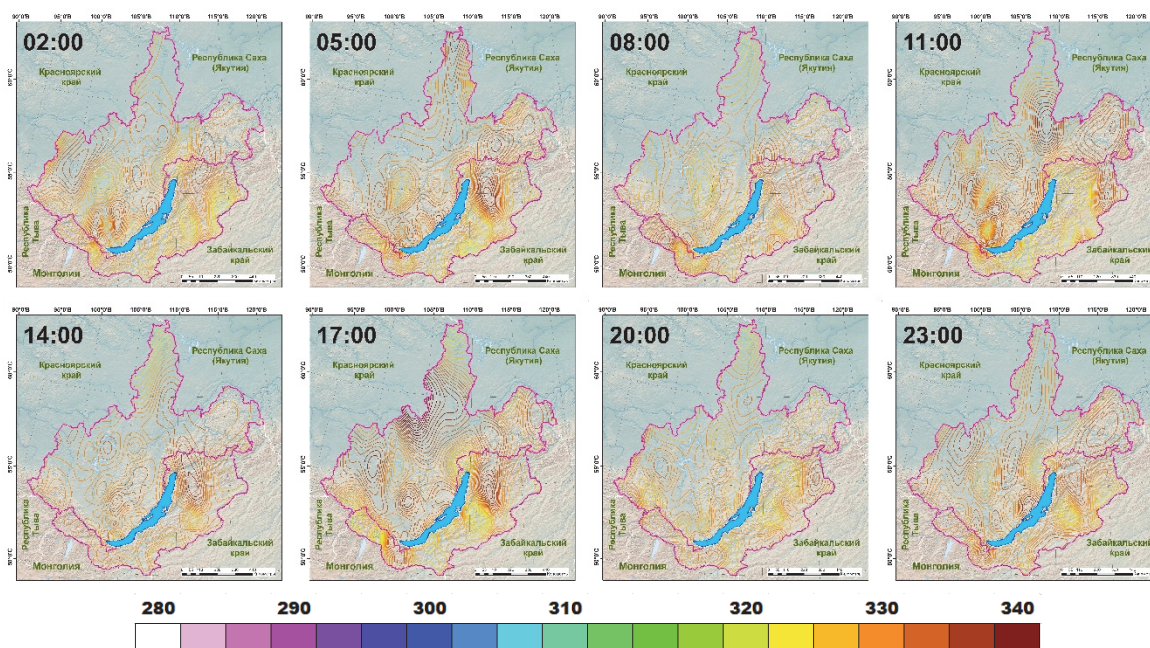
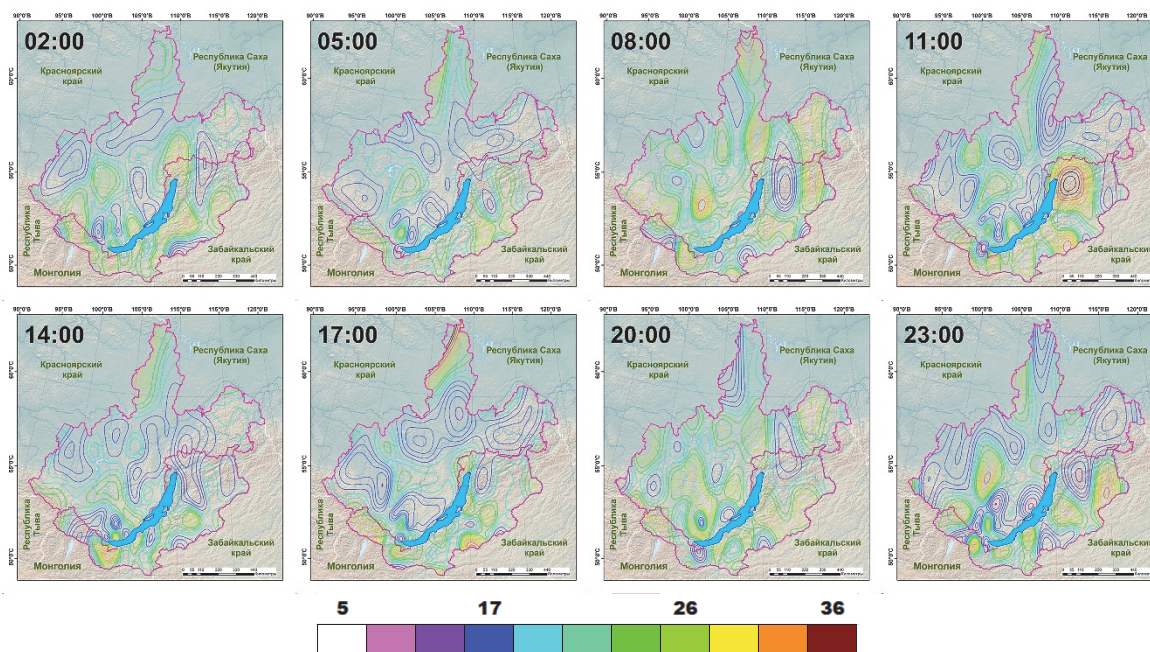


Рис. 1. Местоположение метеорологических станций на совокупной площади Республики Бурятия и Иркутской области

Для контроля поведения индекса рефракции предложен метод «типичные сутки», при котором массив данных фильтруется по месяцу и по каждому стандартному метеорологическому сроку [4], таким образом получаются 8 подмассивов данных для каждого месяца. Полученные совокупности составляют суточный ход изучаемого параметра. Каждый подмассив можно статистически охарактеризовать средним арифметическим (математическим ожиданием) и стандартным отклонением. На рисунке 2 представлены карты изолиний средних значений индекса рефракции за каждый стандартный метеорологический срок в июле 2020 года.

Рис. 2 Изолинии  $N$  в «типичные сутки» июля 2020 г.

На рисунке 3 представлены карты изолиний стандартных отклонений индекса рефракции за каждый стандартный метеорологический срок в июле 2020 года.

Рис. 3 Изолинии  $N_{STD}$  в «типичные сутки» июля 2020 г.

Выявленные неоднородности геопространственного распределения рефракции связаны с природными процессами, требующими дополнительного изучения, включая анализ осадков и суточной динамики температуры в высокогорных, прибрежных и других регионах. В данной работе предлагается исследовать горизонтальную составляющую рефракции УКВ. Для этого в областях с концентрическими полями смоделированы радиотрассы для расчета горизонтального градиента рефракции (рисунок 4).

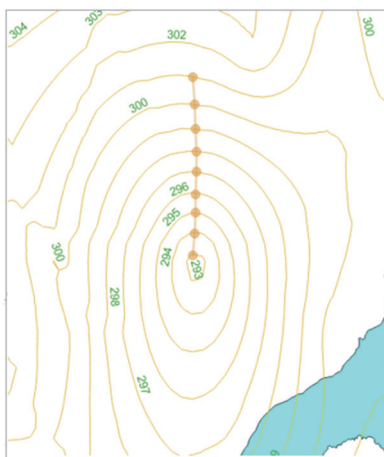


Рис. 4 Распределение рефракции в горизонтальной плоскости

Горизонтальный градиент рефракции вычисляется по формуле, аналогично [5]:

$$gN_{\text{горизон}} = \frac{N_2 - N_1}{L},$$

где  $L$  – расстояние между точками 1 и 2. Результаты расчетов горизонтального градиента рефракции по одной из трасс приведены в таблице.

Таблица. Результаты расчетов горизонтального градиента рефракции

	$N_1$	$N_2$	$L$ , м	$gN_{\text{горизон}}$
1	293	294	11017,04	0,0000907685
2	294	295	7790,24	0,0001283657
3	295	296	9413,847	0,0001062265
4	296	297	9387,321	0,0001065267
5	297	298	9387,463	0,0001065251

Горизонтальный градиент рефракции  $gN_{\text{горизон}}$  во всех случаях приближается к нулю, что что свидетельствует об отсутствии рефракции. Очевидно, такая ситуация связана с небольшим значением разности между  $N_1$  и  $N_2$  и значительным расстоянием между ними. Таким образом, можно сделать вывод, что горизонтальное распределение рефракции не является причиной искривления траектории радиолучей.

### Заключение

Рассчитаны значения индекса рефракции  $N$ , согласно методу, «типичные сутки» по данным метеорологических станций территории Республики Бурятия и Иркутской области. Построены карты изолиний средних значений и стандартных отклонений индекса рефракции за каждый стандартный метеорологический срок в июле 2020 года. Предложено исследование горизонтального распределения рефракции УКВ. Выявлено, что значения горизонтального градиента рефракции  $gN_{\text{горизон}}$  незначительно отклоняются от нуля, что свидетельствует об отсутствии рефракции в исследуемом регионе.

### Список литературы

1. Гомбоев Н.Ц., Цыдыпов Ч.Ц. Рефракционные свойства атмосферы континентальных районов. – Новосибирск: Наука, 1985. – 125 с.
2. Рекомендация МСЭ-R P.453-12. Индекс рефракции радиоволн: его формула и данные о рефракции. – Женева: ITU, 2017. – 25 с.
3. Базарова А.С., Базаров А.В., Гармаев Б.З., Атуттов Е.Б., Башкуев Ю.Б. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2022610841. Метео N. Улан-Удэ, 2022.
4. Ходжаева Г.К. Метеорологические методы и приборы наблюдений. Нижневартовск: Издательство Нижневартовского государственного университета, 2013. – 189 с.
5. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. – М.: Связь, 1972. – 336 с.