

Научная статья

УДК 537.86

DOI 10.25205/2541-9447-2021-16-2-5-13

Сезонное распределение индекса рефракции радиоволн над территорией Бурятии

Арюна Сергеевна Базарова¹, Роман Сергеевич Сычев²
Александр Владимирович Базаров³, Евгений Борисович Атутов⁴
Юрий Буддич Башкуев⁵

¹⁻⁵ Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук
Улан-Удэ, Россия

¹ arunabas@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6968-3749>

² roman1594@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4499-2596>

³ alebazaro@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5759-8336>

⁴ evgeniy_atutov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7186-6763>

⁵ buddich@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7102-3977>

Аннотация

Рассчитаны значения индекса рефракции атмосферы N для ультракоротких радиоволн для территории Бурятии по данным метеорологических станций. Построены карты изолиний среднемесячных значений N для центральных месяцев сезонов (времен) 2020 г. Показано, что на количественные показания N существенное влияние оказывают влажность от озера Байкал и рельеф. В среднем значения индекса рефракции около озера больше на 20–30 N -единиц. Выявлено, что среднемесячные значения N имеют максимумы зимой и летом с минимумами весной и осенью, причем главный максимум приходится на июль.

Ключевые слова

радиометеорология, индекс рефракции атмосферы, сезоны года, рельеф

Источник финансирования

Работа выполнена в рамках бюджетного проекта № 0270-2021-0004 «Развитие фундаментальных основ распространения СНЧ-СДВ-ДВ-СВ и УКВ радиоволн в неоднородных импедансных каналах»

Для цитирования

Базарова А. С., Сычев Р. С., Базаров А. В., Атутов Е. Б., Башкуев Ю. Б. Сезонное распределение индекса рефракции радиоволн над территорией Бурятии // Сибирский физический журнал. 2021. Т. 16, № 2. С. 5–13. DOI 10.25205/2541-9447-2021-16-2-5-13

Seasonal Distribution of the Radio Wave Refraction Index over the Territory of Buryatia

Aryuna S. Bazarova¹, Roman S. Sychev², Aleksandr V. Bazarov³
Evgeniy B. Atutov⁴, Yuriy B. Bashkuev⁵

¹⁻⁵ Institute of Physical Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Ulan-Ude, Russian Federation

¹ arunabas@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6968-3749>

² roman1594@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4499-2596>

³ alebazaro@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5759-8336>

⁴ evgeniy_atutov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7186-6763>

⁵ buddich@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7102-3977>

Abstract

The values of the atmospheric refraction index N for ultra-short radio waves for the territory of Buryatia according to the data of meteorological stations were calculated. The monthly average values N contours maps for the central months of the seasons of 2020 were constructed. It is shown the humidity of Lake Baikal and the relief significantly influence N . On average, the values of the refractive index near the lake are 20–30 N -units higher. It is revealed the monthly average N values have maxima in winter and summer with minimums in spring and autumn, with the main maximum occurring in July.

Keywords

radio meteorology, atmospheric refraction index, seasons of year, relief

Funding

The Ministry of Education and Science of the Russian Federation, budget project no. 0270-2021-0004 “Development of ELF-VLF-LF-MF and VHF radio waves propagation fundamental foundations in inhomogenous impedance channels” supported this work

For citation

Bazarova A. S., Sychev R. S., Bazarov A. V., Atutov E. B., Bashkuev Yu. B. Seasonal Distribution of the Radio Wave Refraction Index over the Territory of Buryatia. *Siberian Journal of Physics*, 2021, vol. 16, no. 2, pp. 5–13. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2021-16-2-5-13

Введение

Влияние атмосферной рефракции на распространение электромагнитных волн изучалось с самого начала развития радиоволновой техники [1]. Было доказано, что искривление траектории электромагнитных волн из-за неоднородного пространственного распределения показателя преломления воздуха вызывает неблагоприятные эффекты, такие как многолучевое замирание и помехи [2]. Эти эффекты значительно влияют на радиосвязь, навигацию и радиолокационные системы [3], поэтому исследование их статистических закономерностей необходимо для прогнозов распространения радиоволн [4].

Разнообразие рефракционных свойств атмосферы характеризуется пространственно-временными изменениями диэлектрической проницаемости воздуха ϵ и связанного с ней коэффициента преломления (индекса рефракции) $n = \sqrt{\epsilon}$. Диэлектрическую проницаемость воздуха и связанный с ней индекс рефракции можно получить непосредственно с помощью радиорефрактометров. Однако они довольно сложны, дорогостоящи и малодоступны для массовых измерений. Располагая данными об атмосферном давлении, температуре и влажности воздуха, индекс рефракции можно вычислить из этих метеопараметров.

Исследования атмосферной рефракции континентальных районов были рассмотрены в [5], дальневосточных районов России – в [6], полярных районов – в [7]. Исследований рефракционных свойств атмосферы Байкальского региона в литературе мы не встречали. В данной работе представлены первые результаты по территории Западного Забайкалья.

Материалы и методы

Поскольку n всего на три десятитысячные доли превышает единицу, Ассамблея радиосвязи Международного союза электросвязи рекомендует использовать следующую форму записи для атмосферной рефракции радиоволн [8]:

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

где

- n – индекс рефракции;
- T – абсолютная температура, К;
- P – атмосферное давление, мбар;
- e – упругость водяного пара, мбар.

Входящие в выражение (1) параметры рассчитаны по данным метеорологических станций. Использованы данные метеостанций Росгидромета, расположенных на территории Республики Бурятия. Измерения на метеостанциях проводятся восемь раз в сутки. Всего обработано данных с 43 метеостанций.

Рассчитаны среднемесячные значения рефракции N по данным метеорологических станций Республики Бурятия для центральных месяцев сезонов 2020 г. Использованы данные по температуре воздуха t [°C], относительной влажности воздуха f [%] и атмосферному давлению P [гПа]. Для подстановки этих параметров в формулу (1) данные t [°C] необходимо перевести в T [K], а по данным f [%] – рассчитать e [мбар]. Согласно [9] температура из градусов Цельсия в градусы Кельвина переводится выражением

$$T [K] = t [°C] + 273,15, \quad (2)$$

а упругость водяного пара рассчитывается по формуле

$$e [\text{мбар}] = \frac{f [\%] \cdot E [\text{мбар}]}{100 \%}, \quad (3)$$

где E [мбар] – насыщенное давление водяного пара во влажном воздухе, причем

$$E(P, t) = \text{func}(P) \cdot e_w(t), \quad (4)$$

здесь t в °C,

$$\text{func}(P) = 1,0016 + \frac{3,15 \cdot P}{10^6} - \frac{0,074}{P}, \quad (5)$$

$$e_w(t) = 6,112 \cdot e^{\frac{17,62 \cdot t}{243,12 + t}}. \quad (6)$$

Выражение (5) следует использовать только для измерений на поверхности Земли, но не для измерений на высотах, (6) – в диапазоне температур от –45 до 60°C [9].

Так как 1 мбар = 1 гПа, численные значения параметра P останутся те же. С учетом этого замечания и выражений (2)–(6), формула (1) приобретает расчетный вид:

$$N = \frac{77,6}{t [°C] + 273,15} \times$$

$$\times \left(P[\text{гПа}] + \frac{4810 \cdot f[\%] \cdot \left(1,0016 + \frac{3,15 \cdot P[\text{гПа}]}{10^6} - \frac{0,074}{P[\text{гПа}]} \right) \cdot 6,112 \cdot \exp\left(\frac{17,62 \cdot t[^\circ\text{C}]}{243,12 + t[^\circ\text{C}]}\right)}{100 \cdot (t[^\circ\text{C}] + 273,15)} \right). \quad (7)$$

Такой вид (7) для расчета индекса рефракции дает возможность использования всей мощи электронных таблиц для вычисления N по данным метеорологических станций Росгидромета.

Результаты и обсуждение

С использованием выражения (7) по исследуемой территории были восстановлены ежедневные трехчасовые значения рефракции атмосферы в местонахождениях метеостанций и усреднены для января, апреля, июля, октября 2020 г. согласно [10; 11]. По рассчитанным значениям построены изолинии (рис. 1).

Подложкой для карт изолиний N служит цифровая модель рельефа Shuttle Radar Topography Mission (SRTM-3). Видно, что на количественные показания N существенное влияние оказывают влажность от озера Байкал и рельеф, окаймляющий восточное побережье. Напомним, что выражение (1) можно приближенно разложить как сумму двух членов [12] (влиянием облачных эффектов можно пренебречь, так как их значения на два порядка меньше, чем члены, отражающие влияние сухого воздуха и водяного пара):

$$N = N_t + N_e, \quad (8)$$

где

N_t – составляющая рефракции радиоволн, учитывающая сухой воздух;

N_e – составляющая рефракции радиоволн, учитывающая влажный воздух.

Причем, согласно [8],

$$N_t = 77,6 \frac{P_d}{T}, \quad N_e = 72 \frac{e}{T} + 3,75 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2}, \quad (9)$$

где

$P_d = P - e$ – атмосферное давление сухого воздуха;

P – общее атмосферное давление;

e – давление водяного пара в атмосфере;

T – абсолютная температура.

Сопоставление рис. 1 с картой «Физико-географическое положение бассейна озера Байкал» (рис. 2)¹ показывает, что влажностная составляющая N_e вносит более существенный вклад в N вдоль побережья озера, нежели за хребтами Икатский, Улан-Бургасы и Хамар-Дабан (средняя высота которых превышает 2 000 м), окаймляющих побережье. Кроме того, влияние Байкала проникает через долину реки Селенги на Селенгинское среднегорье, представляющее собой гигантское понижение между хребтами Хамар-Дабан, Улан-Бургасы и Хэнтэй-Чикойским нагорьем.

¹ Физико-географическое положение озера Байкал // Байкальский информационный центр. 2015. URL: <http://bic.iwlearn.org/ru/photos/1.1.1.jpg>.

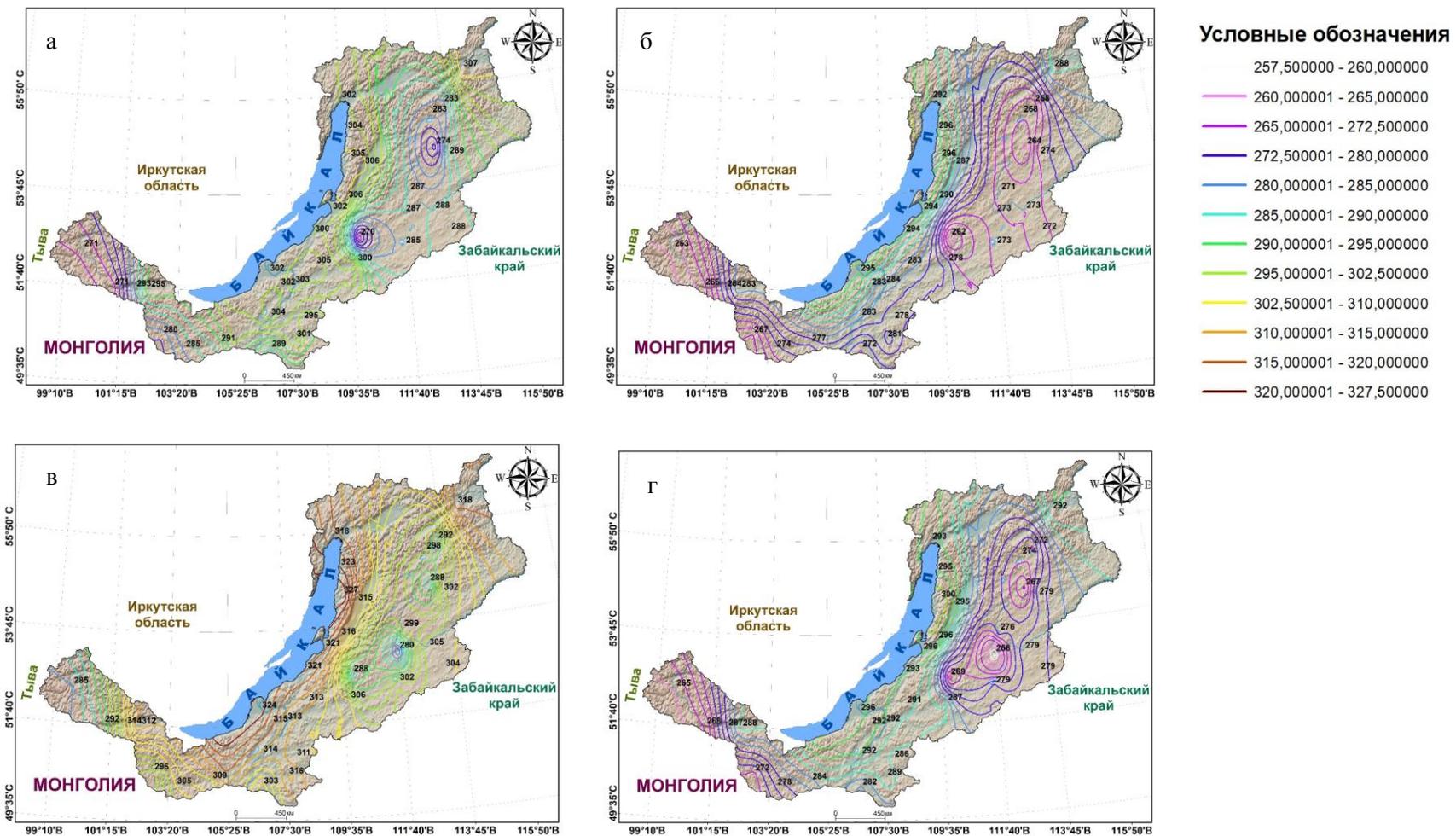


Рис. 1. Изолинии N в 2020 г.: а – январь; б – апрель; в – июль; г – октябрь
 Fig. 1. Contours N in 2020: a – January; b – April; c – July; d – October

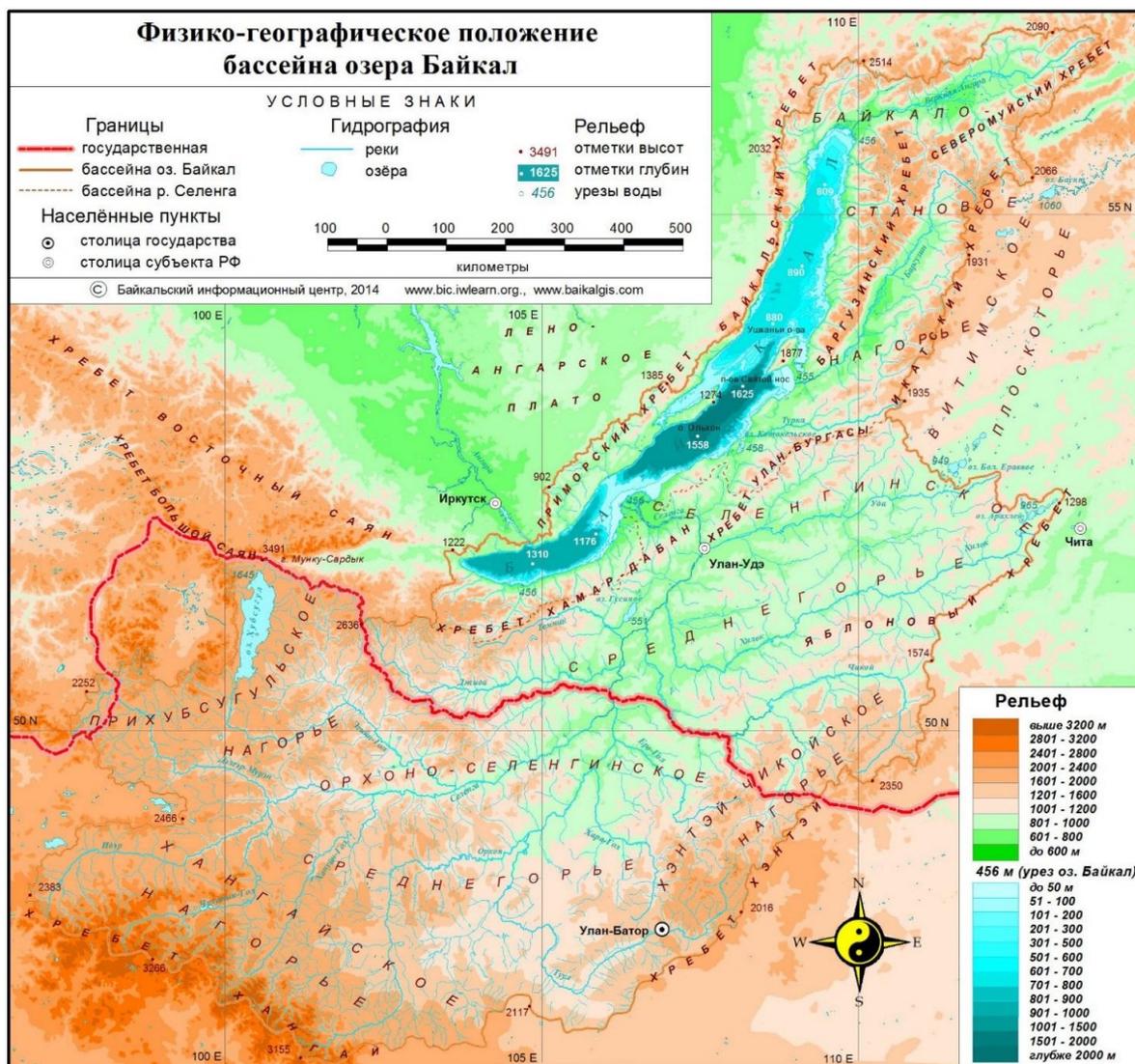


Рис. 2. Физическая карта бассейна озера Байкал
Fig. 2. Physical map of the Lake Baikal basin

В среднем значения индекса рефракции около озера превышают значения N за горами на 20–30 N -единиц (см. таблицу). Также показания таблицы свидетельствуют о том, что среднемесячные значения N имеют максимумы зимой и летом и минимумы весной и осенью, причем главный максимум приходится на июль.

Пространственно-временное распределение N
Space-time distribution N

Месяц	Среднее значение N	
	на побережье	за хребтами
Январь	300	280
Апрель	290	270
Июль	320	290
Октябрь	290	260

Заключение

Таким образом, мы начинаем исследования рефракционных свойств атмосферы Байкальского региона. Байкальский регион включает в себя Иркутскую область, Республику Бурятия, частично Забайкальский край и Монголию как водосборный бассейн реки Селенги. В данной работе мы показали, что сформирован массив метеорологической информации по данным наземных станций для территории Республики Бурятия, рассчитан индекс рефракции N атмосферы в точках расположения метеостанций. Построены изолинии для центральных месяцев сезонов 2020 г. Анализ полученных результатов демонстрирует, что на количественные показания N существенное влияние оказывают влажность от озера Байкал и рельеф, окаймляющий восточное побережье. В среднем значения индекса рефракции около озера превышают значения N за горами на 20–30 N -единиц. Кроме того, выявлено, что среднемесячные значения N имеют максимумы зимой и летом и минимумы весной и осенью, причем главный максимум приходится на июль. В дальнейшем мы планируем расширить область исследований до границ Байкальского региона и освоить методику восстановления вертикального распределения N по экспоненциальному закону согласно [8; 13–15].

Список литературы

1. **Kerr D. E.** (ed.). *Propagation of Short Radio Waves*. London, Peter Peregrinus Ltd., 1987, 737 p.
2. **Lavergnat J., Sylvain M.** *Radio Wave Propagation: Principles and Techniques*. Chichester, John Wiley & Sons, 2000, 308 p.
3. **Grabner M., Kvicera V.** *Atmospheric Refraction and Propagation in Lower Troposphere Electromagnetic Waves*. Rijeka, InTech, 2011, pp. 139–156.
4. **Grabner M., Kvicera V., Pechac P., Kvicera M., Valtr P., Martellucci A.** World maps of atmospheric refractivity statistics. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2014, vol. 62, no. 7, pp. 3714–3722.
5. **Гомбоев Н. Ц., Цыдыпов Ч. Ц.** Рефракционные свойства атмосферы континентальных районов. Новосибирск: Наука, 1985. 125 с.
6. **Батуева Е. В., Дарижапов Д. Д.** Рефракционные свойства тропосферы дальневосточных районов России. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 142 с.
7. **Жамсуева Г. С.** Радиометеорологические параметры полярной тропосферы и их влияние на распространение радиоволн. М., 1994. 138 с.
8. Рекомендация МСЭ-R P.453-12. Индекс рефракции радиоволн: его формула и данные о рефракции. Geneva, ITU, 2017. 25 с.
9. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. Seventh ed. Geneva, World Meteorological Organization, 2008, no. 8, 681 p.
10. **Гомбоев Н. Ц., Ленскинов Н. И., Матханова Е. М., Тыхеева Р. Л.** О косвенном методе расчета статистических характеристик коэффициента преломления воздуха. Улан-Удэ: БНЦ СО АН СССР, 1989. 19 с.
11. **Гомбоев Н. Ц.** Статистическая структура вертикальных градиентов показателя преломления атмосферы в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке России. Улан-Удэ: Наука, 2017. 111 с.
12. **Дембелов М. Г., Башкуев Ю. Б., Лухнев А. В., Лухнева О. Ф., Саньков В. А.** Влагодержание тропосферы в Байкальском регионе по данным GPS измерений // Журнал радиоэлектроники. 2016. № 3. С. 5.
13. **Бин Б. Р., Даттон Е. Д.** Радиометеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 363 с.
14. **Четырин Ю. С., Давиденко А. Н.** Методика восстановления вертикальных профилей параметров атмосферы для их использования прогностическими подразделениями Дальневосточного гидрометеорологического центра // Информационный сборник № 42. Ре-

зультаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов / Под ред. А. А. Алексеевой. Москва; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2015. С. 129–138.

15. **Кашкин В. Б., Клыков А. О.** Построение карт тропосферной задержки сигналов ГЛОНАСС / GPS по данным спутникового дистанционного зондирования атмосферы // Журнал сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2014. Т. 7, № 7. С. 839–845.

References

1. **Kerr D. E.** (ed.). Propagation of Short Radio Waves. London, Peter Peregrinus Ltd., 1987, 737 p.
2. **Lavernat J., Sylvain M.** Radio Wave Propagation: Principles and Techniques. Chichester, John Wiley & Sons, 2000, 308 p.
3. **Grabner M., Kvicera V.** Atmospheric Refraction and Propagation in Lower Troposphere Electromagnetic Waves. Rijeka, InTech, 2011, pp. 139–156.
4. **Grabner M., Kvicera V., Pechac P., Kvicera M., Valtr P., Martellucci A.** World maps of atmospheric refractivity statistics. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2014, vol. 62, no. 7, pp. 3714–3722.
5. **Gomboev N. C., Cidipov Ch. C.** Refractive properties of the atmosphere continental regions. Novosibirsk, Nauka, 1985, 125 p. (in Russ.)
6. **Batueva E. V., Darijapov D. D.** Refractive properties of the troposphere of the Far Eastern regions of Russia. Novosibirsk, SB RAS Publ., 1999, 142 p. (in Russ.)
7. **Zhamsueva G. S.** Radiometeorological parameters of the polar troposphere and their influence on the propagation of radio waves. Institute of Radio Engineering and Electronics, 1994. 138 p. (in Russ.)
8. Recommendation ITU-R. The radio refractive index: its formula and refractivity data. Geneva, ITU, 2016, 25 p. (in Russ.)
9. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. Seventh ed. Geneva, World Meteorological Organization, 2008, no. 8, 681 p.
10. **Gomboev N. C., Lenskinov N. I., Mathanova E. M., Tirheeva R. L.** On an indirect method for calculating the statistical characteristics of the refractive index of air. Ulan-Ude, BSC SB of the RAS USSR, 1989, 19 p. (in Russ.)
11. **Gomboev N. C.** Statistical structure of vertical gradients of the refractive index of the atmosphere in Eastern Siberia and the Far East of Russia. Ulan-Ude, Nauka, 2017, 111 p. (in Russ.)
12. **Dembelov M. G., Bashkuev Yu. B., Luhnev A. V., Luhneva O. F., Sankov V. A.** Moisture content of the troposphere in the Baikal region according to GPS measurements. *Zhurnal Radioelektroniki*, 2016, no. 3, p. 5. (in Russ.)
13. **Bin B. R., Datton E. D.** Radiometeorology. Leningrad, Hydrometeoizdat, 1971, 363 p. (in Russ.)
14. **Chetyrin Yu. S., Davidenko A. N.** Methods for reconstructing vertical profiles of atmospheric parameters for their use by the forecasting subdivisions of the Far Eastern Hydrometeorological Center. In: Alekseeva A. A. (ed.). Information digest no. 42. Results of testing new and improved technologies, models and methods of hydrometeorological forecasts. Moscow, Obninsk, IG-SOCIN, 2015, pp. 129–138. (in Russ.)
15. **Kashkin V. B., Klikov A. O.** Construction of maps of tropospheric delay of GLONASS / GPS signals based on satellite remote sensing of the atmosphere. *Siberian Federal University Journal. Series Technics and Techology*, 2014, vol. 7, no. 7, pp. 839–845. (in Russ.)

Информация об авторах

Арюна Сергеевна Базарова, аспирант

WoS Researcher ID J-6334-2018

Scopus Author ID 57220185188

SPIN 9806-1618

Роман Сергеевич Сычев, аспирант

WoS Researcher ID ABI-6010-2020

Scopus Author ID 57214752084

SPIN 1471-9201

Александр Владимирович Базаров, кандидат технических наук

WoS Researcher ID J-3225-2017

Scopus Author ID 50560986300

SPIN 7389-2040

Евгений Борисович Атутов, кандидат физико-математических наук

WoS Researcher ID J-1530-2018

Scopus Author ID 16023981900

SPIN 5267-4690

Юрий Буддич Башкуев, доктор технических наук, профессор

WoS Researcher ID T-1634-2017

Scopus Author ID 6603635934

Information about the Authors

Aryuna S. Bazarova, Postgraduate Student

WoS Researcher ID J-6334-2018

Scopus Author ID 57220185188

SPIN 9806-1618

Roman S. Sychev, Postgraduate Student

WoS Researcher ID ABI-6010-2020

Scopus Author ID 57214752084

SPIN 1471-9201

Aleksandr V. Bazarov, Candidate of Technical Sciences

WoS Researcher ID J-3225-2017

Scopus Author ID 50560986300

SPIN 7389-2040

Evgeniy B. Atutov, Candidate of Science (Physics and Mathematics)

WoS Researcher ID J-1530-2018

Scopus Author ID 16023981900

SPIN 5267-4690

Yuriy B. Bashkuev, Doctor of Technical Sciences, Professor

WoS Researcher ID T-1634-2017

Scopus Author ID 6603635934

*Статья поступила в редакцию 19.03.2021;
одобрена после рецензирования 01.05.2021; принята к публикации 01.05.2021
The article was submitted 19.03.2021;
approved after reviewing 01.05.2021; accepted for publication 01.05.2021*