

УДК 538.566

РЕФРАКЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ В ПРИПОЛЯРНЫХ ПУНКТАХ НАБЛЮДЕНИЯ ТИКСИ, НОРИЛЬСК И ОСТРОВ ВИЗЕ

М. Г. Дембелов¹, Ю. Б. Башкуев¹, А. В. Лухнев²¹ Институт физического материаловедения СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д.6² Институт земной коры СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128

Статья поступила в редакцию 14 мая 2018 г.

Аннотация. Рефракция радиоволн в диапазоне УКВ в нижней нейтральной части атмосферы (тропосфере) может быть рассчитана по значениям высотного профиля показателя преломления воздуха (n). Показатель преломления в основном зависит от атмосферного давления, температуры и влажности воздуха. С целью получения данных по температуре и относительной влажности на разных уровнях атмосферного давления для моделирования высотной зависимости показателя преломления воздуха помимо метода радиозондирования рассматривается возможность применения пассивной спутниковой локации атмосферы. Определены сезонные параметры экспоненциальной модели тропосферной рефракции и значения углов полной рефракции для разных высот источника излучения над поверхностью Земли над пунктами наблюдения Тикси, Норильск и о. Визе. Рассмотрены значения полной тропосферной задержки, полученных в результате обработки GPS измерений.

Ключевые слова: индекс рефракции, вертикальные профили, угол рефракции, GPS измерения, тропосферная задержка.

Abstract. Refraction of radio waves in the VHF band in the lower neutral part of the atmosphere (troposphere) can be calculated from the values of the altitude profile of the refractive index of air (n). The refractive index mainly depends on the atmospheric pressure, temperature and humidity of the air. In order to obtain data on temperature and relative humidity at different atmospheric pressure levels, in addition to the radiosonde method, the possibility of using passive satellite location of the

atmosphere is considered for modeling the altitude dependence of the refractive index of air. The seasonal parameters of the exponential model of tropospheric refraction and the values of the angles of total refraction for different heights of the radiation source above the Earth's surface are determined above the observation points of Tiksi, Norilsk and Vize Island. The values of total tropospheric delay obtained as a result of GPS measurements are considered.

Key words: refractive index, vertical profiles, refraction angle, GPS measurements, tropospheric delay.

Введение

В настоящее время в мире выполняются более 10000 ежедневных запусков радиозондов 2 раза в сутки - в полдень и полночь по Гринвичу. Под эгидой центра радиозондирования Росгидромета осуществляется функционирование аэрологической сети России, состоящей из 126 станций. Сравнение данных по высотному изменению индекса рефракции (N), полученных посредством вертикального радиозондирования и с использованием дистанционного зондирования с аппаратов спутниковой системы NOAA, показало очень хорошее совпадение. Для приполярных пунктов наблюдения Тикси, Норильск и о. Визе после усреднения вертикальных метеоданных дистанционного зондирования за 2016 г. в разные сезоны года получены экспоненциальные высотные зависимости для индекса рефракции.

Наличие в тропосфере основной массы водяного пара, а также различных метеоров в виде капель воды и мелких льдинок составляет особенность этой области и вносит существенное влияние на рефракцию радиоволн. Сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) при распространении в атмосфере испытывают задержку, влияющую на определение точного расстояния до спутника, а, следовательно, и на точность GPS позиционирования. Полной тропосферной задержкой называют задержку сигнала, распространяющегося в тропосфере, тропопаузе и нижней части стратосферы. Величина задержки в основном зависит от физических свойств

атмосферы и отклонения источника от зенитного направления. Если источник сигнала (спутник GPS) находится в зенитном направлении, то задержка будет минимальна и будет называться полной тропосферной зенитной задержкой сигналов (ZTD). Всемирная сеть GPS измерений дает возможность получать первичные и обработанные данные станций ГНСС практически в любом регионе нашей планеты (www.igs.org). Получены ряды многолетних наблюдений полной тропосферной зенитной задержки (ZTD) для пунктов наблюдения TIXI (Тикси) и NRIL (Норильск).

Показатель преломления в основном зависит от атмосферного давления, температуры и влажности воздуха. Углы рефракции в тропосфере также сильно зависят от высотного профиля показателя преломления воздуха, а сам профиль зависит от географического положения точки наблюдения и сезона года [1, 2]. Для определения высотных изменений давления, температуры и упругости водяного пара практически в любой точке планеты появилась возможность использования современных космических технологий [3, 4].

Вертикальные профили индекса рефракции

Современные космические технологии позволяют подробно исследовать атмосферу, использование инструментального комплекса ATOVS на полярно-орбитальных спутниках NOAA дает возможность восстанавливать вертикальные профили температуры и влажности воздуха на разных уровнях атмосферного давления с пространственным разрешением 20 км в ИК диапазоне и 50 км в волновом диапазоне [3]. При отсутствии облачности сканирующий спектрофотометр, входящий в комплекс ATOVS, позволяет определять профили метеорологических данных до высоты 40 км над поверхностью Земли. Обработка первичных данных ATOVS выполняется с помощью программного продукта AAPP [4]. При зондировании тропосферы и стратосферы используется зависимость ширины линии излучения от давления, поэтому данные распределения температуры и влажности привязаны не к высоте, а к атмосферному давлению. В результате выдается вертикальное

распределение температуры и влажности на разных уровнях атмосферного давления на сетке $1^\circ \times 1^\circ$ по широте и долготе.

В качестве примера на рис. 1 показаны сравнительные графики измеренных вертикальных профилей температуры, полученных по данным запусков радиозондов и по данным дистанционного зондирования спутников NOAA для зимних и летних условий в пункте наблюдения Норильск. Наблюдается очень хорошее соответствие результатов вертикального профилирования температуры двумя разными методами.

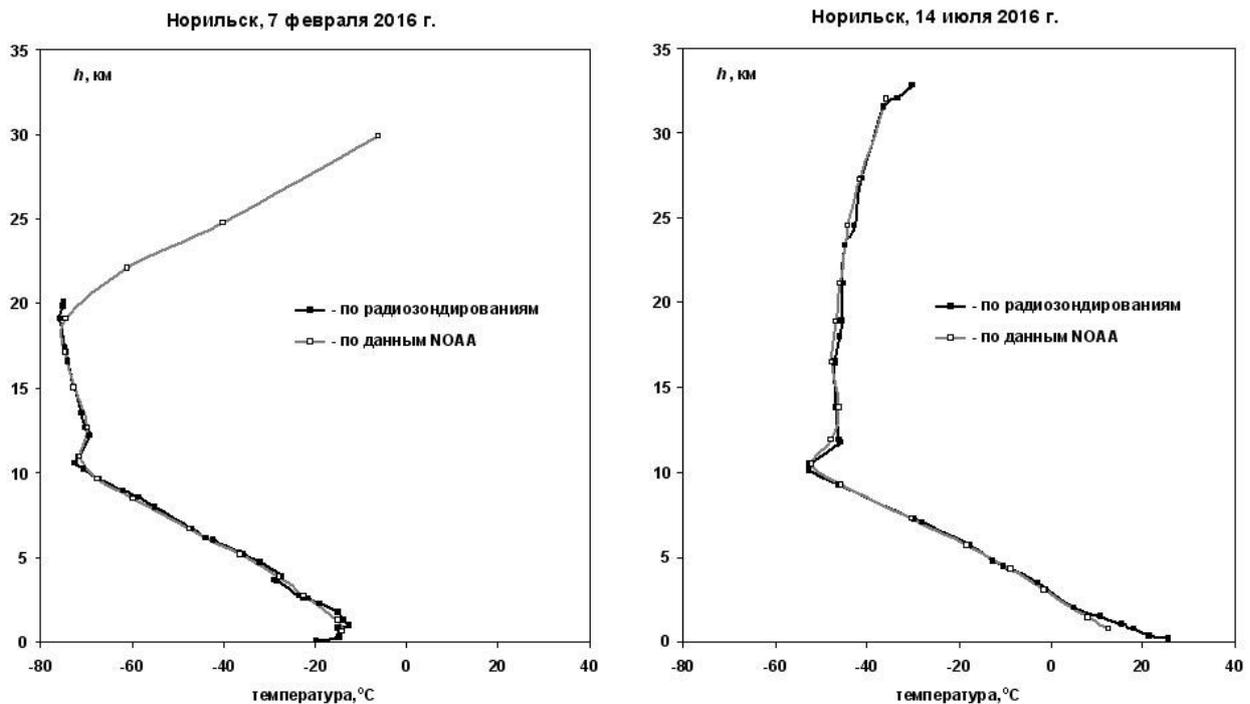


Рис. 1. Сравнительные температурные профили для зимних и летних условий над пунктом наблюдения Норильск.

Зависимость индекса рефракции (N) от высоты h записывается в экспоненциальном виде [1]:

$$N(h) = (n - 1) \times 10^6 = N_0 \exp(-\beta h), \quad (1)$$

где N_0 – индекс рефракции на поверхности Земли; β , км^{-1} - скорость убывания индекса рефракции по высоте h , км. На рис. 2 показаны сравнительные графики индексов рефракции, полученных путем радиозондирования и расчета по экспоненциальной модели (1), для пункта наблюдения Тикси в середине февраля и июля 2016 г. Параметр β в формуле (1) определялся методом

наименьших квадратов по результатам измерений метеорологических данных на разных высотах с дальнейшим расчетом вертикального профиля для N по известной формуле Фрума-Эссена [5]:

$$N = \frac{77,6}{T} \left(p + \frac{4810e}{T^2} \right) = N_T + N_e, \quad (2)$$

где p – атмосферное давление, мбар; T – температура, К; e – упругость водяного пара, мбар; N_T – компонента для сухого воздуха; N_e – компонента для водяного пара.

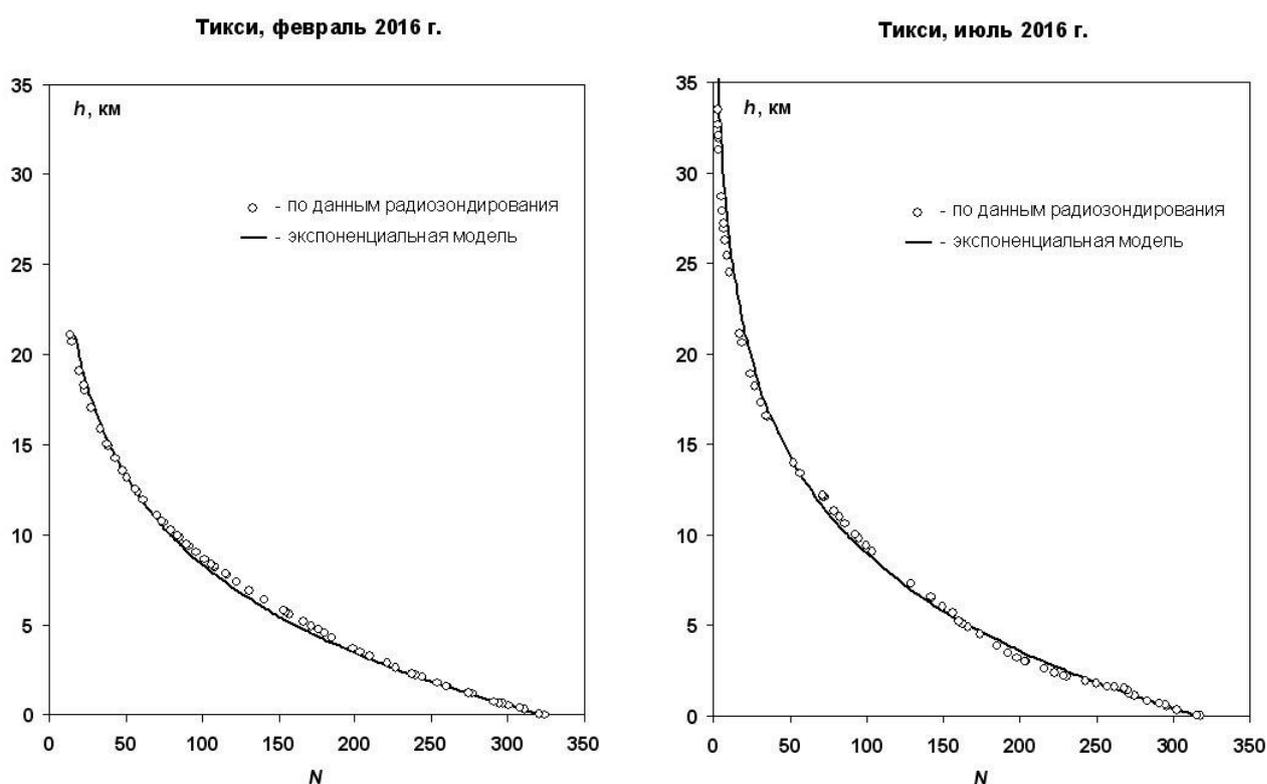


Рис. 2. Сравнительные высотные профили индекса рефракции над пунктом наблюдения Тикси в зимнее и летнее время 2016 г.

Следуя работе [1], рассчитаны усредненные параметры N_0 и β для пунктов наблюдения Тикси, Норильск и о. Визе в феврале, апреле, июле и марте 2016 г. В таблице 1 приведены параметры N_0 и β в разные сезоны года для этих 3-х пунктов наблюдения. Над пунктами наблюдения, расположенными в непосредственной зоне Северного ледовитого океана (Тикси, о. Визе) параметр β имеет повышенные значения особенно в наиболее холодное время года ($0,143 \text{ км}^{-1}$ и $0,146 \text{ км}^{-1}$ соответственно). Знание максимально точных значений

параметров N_0 и β является важным, так как они служат исходными данными в определении величин углов рефракции (рис. 4). Сравнение тропосферных параметров для пункта наблюдения о. Визе, полученных по результатам зондирований спутниками NOAA в 2016 г., и по данным работы [1], которые были получены по данным радиозондирований в конце 80-х годов, показали хорошее совпадение результатов по параметру β , несмотря на большой промежуток по времени между измерениями. Отличие величин N_0 для каждого сезона объясняется тем, что в первом случае приземные метеоданные рассмотрены для $h=180$ м, а во втором по данным работы [1] для $h=0$. При этом разницы между значениями N_0 в разные сезоны года сохраняются в обоих случаях.

Таблица 1. Параметры экспоненциальной модели в 3-х пунктах наблюдения.

Пункт наблюдения	Месяц года	N_0	β , км ⁻¹
Тикси (71°38' N, 128°52' E)	февраль	335	0,143
	апрель	320	0,137
	июль	318	0,13
	октябрь	316	0,135
Норильск (69°20' N, 88°11' E)	февраль	317	0,131
	апрель	309	0,13
	июль	321	0,131
	октябрь	315	0,135
о. Визе (79°30' N, 76°54' E)	февраль	314	0,146
	апрель	309	0,145
	июль	312	0,139
	октябрь	307	0,14
о. Визе (по данным работы [1])	февраль	336	0,145
	апрель	331	0,145
	июль	335	0,139
	октябрь	326	0,14

Тропосферная задержка сигнала

Полная тропосферная зенитная задержка по определению выражается посредством интегрирования по вертикальному профилю значений индекса рефракции $N(h)$ (h_S – высота пункта приема сигнала над уровнем моря) [6, 7]:

$$ZTD = 10^{-6} \int_{h_s}^{\infty} N(h) dh . \quad (3)$$

На рис. 3 показаны полученные в результате обработки GPS данных (пункты ТИХИ (Тикси) и NRIL (Норильск)) и приземных метеоданных (пункт о. Визе) изменения значений полной тропосферной зенитной задержки (ZTD) за весь 2016 г. Значения ZTD по приземным метеоданным рассчитываются по известной модели Саастамоинена [8]. Несмотря на большой географический разнос 3-х пунктов наблюдения можно наблюдать их общий годовой тренд.

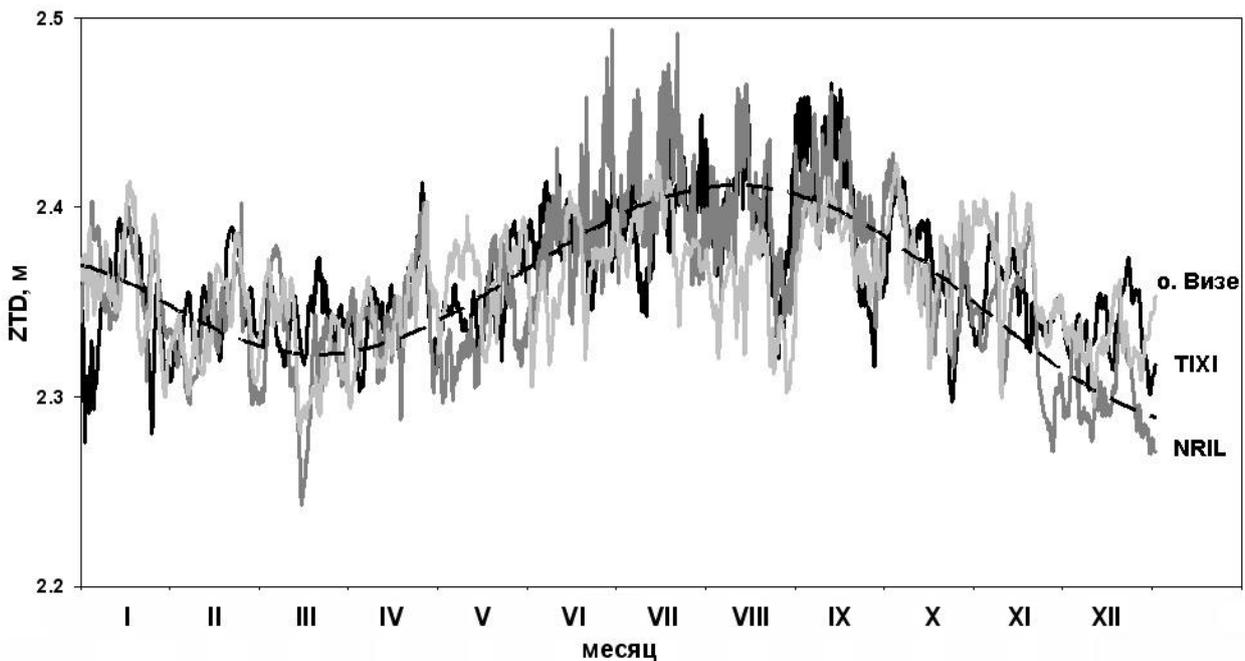


Рис. 3. Годовой ход полных тропосферных зенитных задержек (ZTD) для пунктов наблюдения ТИХИ (Тикси), NRIL (Норильск) и о. Визе в 2016 г.

Сигналы от спутников принимаются в каждый момент времени под определенным углом относительно зенитного направления. Идеальным является расположение спутника в зенитном направлении, когда тропосферная задержка принимает минимальное значение. Реальную (наклонную) тропосферную задержку для линии «спутник-приемник» можно выразить в виде:

$$STD = ZTD \cdot m(z_0) . \quad (4)$$

Здесь STD – полная наклонная (slant) тропосферная задержка, $m(z_0)$ - функция

отображения (mapping function), которая представляет собой фактор наклона для масштабирования зенитной задержки как функции зенитного угла z_0 . В настоящее время предложено довольно много примеров функций отображения. Удобно использовать функцию с фиксированными средними коэффициентами, например, как функцию отображения, рассмотренную в работе [9]:

$$m(z_0) = \frac{1}{\cos z_0 + \frac{0,00143}{\operatorname{ctg}(z_0) + 0,00035}}. \quad (5)$$

Углы тропосферной рефракции

На рис. 4 представлены параметры, связанные с рефракцией, где A – место расположения приемника; B – истинная точка над тропосферой; B' – кажущаяся за счет рефракции точка над тропосферой; R – радиус Земли; \overline{AZ} – зенитное направление; L – расстояние по прямой; L' – кажущееся расстояние; H – высота точки B над Землей; z_0 – видимый зенитный угол; α – угол полной рефракции; δ – угол истинной рефракции; ψ – угол фотограмметрической рефракции ($\psi = \alpha - \delta$). Расчет угла полной рефракции α рассчитывается по известной формуле [1, 2]:

$$\alpha = -n_0 \sin z_0 \int_0^H \frac{\left(\frac{dn(h)}{dh} \right) dh}{n(h) \sqrt{n(h)^2 (1 + h/R)^2 - n_0^2 \sin^2 z_0}}, \quad (6)$$

Здесь n_0 – показатель преломления у земной поверхности, $n(h)$ – высотный профиль показателя преломления тропосферы, $\frac{dn(h)}{dh}$ – вертикальный градиент показателя преломления.

В таблице 2 приведены значения углов полной рефракции α , рассчитанные по формуле (6) для видимых зенитных углов $z_0 = 80^\circ$ и $z_0 = 89^\circ$ для разных высот H источника излучения над поверхностью Земли. Углы α определены для разных сезонов года в пунктах наблюдения Тикси, Норильск и о. Визе согласно данным по N и β , приведенным в таблице 1.

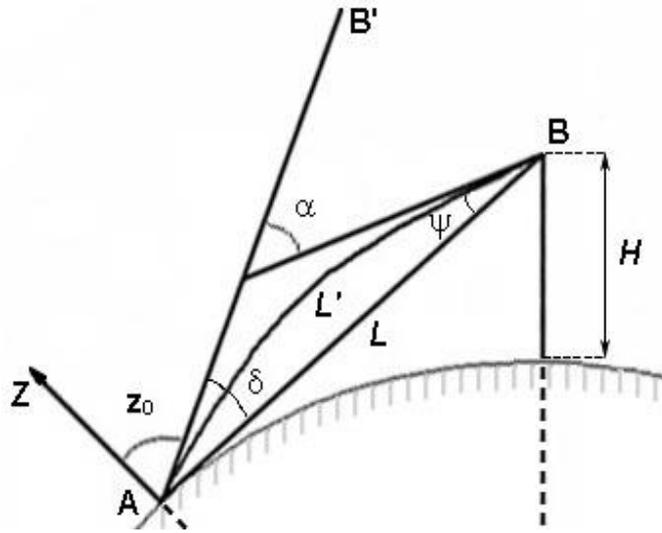


Рис. 4. Геометрия задачи о тропосферной рефракции.

Таблица 2. Значения углов полной рефракции α в угловых секундах

Пункты наблюдения	Месяц 2016 г.	$z_0=80^\circ$			$z_0=89^\circ$		
		$H=15$ км	$H=30$ км	$H=\infty$	$H=15$ км	$H=30$ км	$H=\infty$
Тикси (TIXI)	февраль	339	376	381	1842	1936	1945
	апрель	320	358	363	1713	1810	1820
	июль	312	354	360	1654	1758	1770
	октябрь	314	353	358	1677	1774	1785
Норильск (NRIL)	февраль	315	354	360	1682	1780	1791
	апрель	303	344	350	1603	1705	1717
	июль	316	357	364	1677	1782	1794
	октябрь	312	351	357	1657	1757	1768
О. Визе	февраль	319	353	357	1736	1820	1828
	апрель	314	347	351	1700	1784	1792
	июль	312	349	354	1680	1772	1781
	октябрь	308	344	349	1657	1746	1755

Разница ΔL между кажущимся расстоянием и L' истинным расстоянием L (рис. 4) является тропосферной задержкой STD, которая наиболее точно определяется по данным GPS измерений с учетом формул (4) и (5). Значение ΔL составляет довольно малую величину относительно расстояния L . В пункте наблюдения TIXI значение STD находилось в пределах 12,51...13,55 м для видимого зенитного угла $z_0=80^\circ$ и в пределах 26,8...29,02 м для $z_0=89^\circ$ в течение

2016 г. В пункте наблюдения NRIL значение STD находилось в пределах 12,35...13,86 м для видимого зенитного угла $z_0=80^\circ$ и в пределах 26,44...29,67 м для $z_0=89^\circ$. Отметим большой разброс значений STD в пункте наблюдения NRIL, расположенном в континентальной части, над которым имела место большая вариабельность влагосодержания в тропосфере в течение всего года.

Заключение

Применение данных полярно-орбитальных спутников NOAA по вертикальным профилям температуры и влажности воздуха на разных уровнях атмосферного давления позволяет успешно восстанавливать вертикальные профили индекса рефракции. Получены характерные усредненные месячные данные параметров экспоненциальной модели (N_0 и β) в разные сезоны 2016 года для пунктов наблюдения Тикси, Норильск и о. Визе. Показано, что сезонные параметры экспоненциальной модели остаются постоянными на протяжении ряда лет на примере о. Визе. Выполнены расчеты углов полной рефракции для разных высот источника излучения над земной поверхностью в разные сезоны года над пунктами наблюдения Тикси, Норильск и о. Визе. Дана оценка измеренной наклонной тропосферной задержки сигнала (STD) в пунктах наблюдения ТИХИ и NRIL.

Литература

1. Мошков А.В., Пожидаев В.Н. Особенности рефракции радиоволн в приполярных районах. // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59. - № 11. С. 1085-1089.
2. Арманд Н.А., Колосов М.А. О рефракции радиоволн в тропосфере. // Радиотехника и электроника. 1965. Т. 10. - № 8. С. 1401-1409.
3. Кашкин В.Б. Внутренние гравитационные волны в тропосфере. // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. - № 10. С. 908-916.
4. Кашкин В.Б., Владимиров В.М., Клыков А.О. Оценка тропосферной задержки сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. // Успехи современной радиоэлектроники. 2014. - № 5. С. 37-42.

5. Smith, E. K., Weintraub S. The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies. // Proceedings of the institute of Radio Science. 1953. Vol. 41. PP. 1035-1037.
6. Дембелов М.Г., Башкуев Ю.Б., Лухнев А.В., Лухнева О.Ф., Саньков В.А. Диагностика содержания атмосферного водяного пара по данным GPS-измерений. // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. - № 2. С. 172-177.
7. Дембелов М.Г., Башкуев Ю.Б., Лухнев А.В., Лухнева О.Ф., Саньков В.А. Влагосодержание тропосферы в Байкальском регионе по данным GPS измерений. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2016. №3. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar16/10/text.pdf>
8. Saastamoinen J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. - in: Henriksen, The Use of Artificial Satellites for Geodesy. Geophys. Monogr. Ser. AGU. Washington. D.C. 1972. V. 15. P. 247-251.
9. Калинин В.В., Хуторова О.Г., Тептин Г.М. Использование сигналов спутниковых навигационных систем для определения характеристик тропосферы. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. - № 6. С. 705-713.

Для цитирования:

М.Г.Дембелов, Ю.Б.Башкуев, А.В.Лухнев. Рефракционные параметры в приполярных пунктах наблюдения Тикси, Норильск и остров Визе. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun18/1/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.6.1