

О ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ УГЛОВ ТРОПОСФЕРНОЙ РЕФРАКЦИИ ПО ДАННЫМ GPS ИЗМЕРЕНИЙ

М. Г. Дембелов, Ю. Б. Башкуев

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

Статья поступила в редакцию 22 мая 2020 г.

Аннотация. С учетом линейной зависимости значений угла полной рефракции и приземного показателя преломления воздуха показана возможность моделирования углов тропосферной рефракции на основе данных GPS измерений. Рассмотрены параметры преломления радиоволн над пунктами наблюдения в разных широтных зонах Сибири (Иркутск, Якутск, Тикси). Значения температуры и относительной влажности воздуха на разных высотных уровнях атмосферного давления определялись по данным запусков метеорологических радиозондов. Приведены рассчитанные значения углов полной рефракции для видимых зенитных углов, близких 90° . Рассчитаны годовые зависимости угла полной рефракции при фиксированном значении видимого зенитного угла и высоты источника излучения по данным полной зенитной тропосферной задержки, полученным по GPS измерениям, без учета метеоданных.

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

Abstract. Parameters of the refraction of radio waves over observation points in different latitudinal zones of Siberia (Irkutsk, Yakutsk, and Tiksi) are researched. The values of temperature and relative humidity at different altitude levels of atmospheric pressure were determined by data from meteorological radiosondes. The calculation of refraction angles is performed for a given altitude profile of the refractive index of air, which is modeled in an approximate exponential form. The refractive index profile also depends on the geographic location of the observation point, altitude and

time of year. The calculated values of the total refraction angles for various visible zenith angles and the height of the source above the surface of the Earth are presented. The tropospheric delay is the delay of signal propagation in the troposphere, tropopause and lower part of the stratosphere. If the signal source is in the zenith direction, then the delay will be minimal, and this delay is called the zenith tropospheric delay (ZTD). ZTD is the sum of the “dry” or hydrostatic (ZHD) and “wet” (ZWD) components. The “dry” component of the tropospheric delay is calculated rather accurately from the surface values of atmospheric pressure. Taking into account the linear dependence of the values of the total refraction angle and the surface refractive index of air, the possibility of modeling the angles of tropospheric refraction based on GPS measurements is shown. The annual dependences of the angle of total refraction are calculated for a fixed value of the visible zenith angle and the height of the radiation source according to the GPS zenith total tropospheric delay without taking into account meteorological data.

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

Введение

Тропосферная рефракция, которую принято учитывать в нейтральной части атмосферы (тропосфера, тропопауза и нижняя часть стратосферы), обуславливается неоднородностью преломления среды в вертикальном направлении. При этом отклонение траектории радиоволн от прямой линии «источник-приемник» приводит к искажению определения точного расстояния и углового параметра истинного нахождения источника. Существенное влияние на процесс преломления радиоволн оказывает изменчивость основных тропосферных метеорологических параметров (температуры, давление и влажность воздуха). Вычисление углов полной рефракции выполняется при заданном высотном профиле показателя преломления воздуха, который моделируется в приближенном экспоненциальном виде [1].

Вертикальные метеорологические профили наиболее точно определяются посредством запусков радиозондов. Регулярные радиозондирования нижней атмосферы проводятся аэрологической службой Росгидромета России, в настоящее время сеть пунктов радиозондирований состоит из 126 станций. Запуск радиозондов осуществляется 2 раза в сутки. Кроме того, данные о вертикальных профилях в тропосфере могут быть получены с использованием результатов дистанционного зондирования аппаратами спутниковой системы NOAA (arl.noaa.gov) [2]. Углы рефракции в тропосфере сильно зависят от высотного профиля показателя преломления воздуха, а сам профиль зависит от географического положения точки наблюдения и времени года [1, 3]. Расчеты углов рефракции основаны на том, что экспоненциальная модель хорошо описывает вертикальную зависимость показателя преломления. Отмечается высокая корреляция между изменениями углов рефракции и показателя преломления воздуха у земной поверхности.

Под тропосферной задержкой понимается задержка распространения сигнала в тропосфере, тропопаузе и нижней части стратосферы. Если источник сигнала находится в зенитном направлении, то задержка будет минимальной, и такая задержка называется полной зенитной тропосферной задержкой (ZTD). ZTD является суммой «сухой» или гидростатической (ZHD) и «влажной» (ZWD) компонент. «Сухая» компонента тропосферной задержки довольно точно рассчитывается по приземным значениям атмосферного давления. Негидростатическая составляющая главным образом зависит от распределения водяного пара и капель воды в нижней части тропосферы. Цель работы – показать возможность определения годовых изменений углов рефракции на основе обработанных годовых данных GPS измерений в виде полной зенитной тропосферной задержки без учета метеорологических данных.

Параметры тропосферы и угол полной рефракции

Зависимость нормированного показателя преломления (индекса рефракции) N от высоты h может быть представлено экспоненциально [1]:

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

Здесь n – показатель преломления; N_0 – индекс рефракции у поверхности Земли; β , км^{-1} – скорость уменьшения величины индекса рефракции по высоте h , км. Параметр β в формуле (1) определялся методом наименьших квадратов с использованием метеорологических данных на разных высотах с последующим вычислением вертикального профиля для N с использованием известной формулы [4]:

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

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

Усредненные параметры вертикального градиента тропосферной рефракции получены для пунктов наблюдения Иркутск, Якутск и Тикси, расположенных в разных широтных областях, для февраля, апреля, июля и октября 2018 года. В таблице 1 приведены параметры N_0 и β в разные сезоны года для рассматриваемых пунктов наблюдения. Для пункта Тикси, расположенного на побережье Северного Ледовитого океана, параметр β имеет повышенное значение в холодное время года ($0,136 \text{ км}^{-1}$) и пониженное в теплое время года ($0,129 \text{ км}^{-1}$). Приземное значение индекса рефракции в течение года изменяется в среднем от 309 до 332. Еще большие сезонные вариации параметра β (в пределах $0,133 \dots 0,142 \text{ км}^{-1}$) наблюдаются над Якутском. Это обусловлено значительной годовой разницей в значениях приземной температуры и влажности воздуха. Заметно меньшее годовое изменение этого параметра наблюдается над Иркутском (в пределах $0,128 \dots 0,133 \text{ км}^{-1}$). При этом сезонные приземные значения индекса рефракции имеют максимальные вариации в среднем от 287 до 319. Значения параметров N_0 и β служат исходными данными для расчета значений углов рефракции [1, 3].

В таблице 1 также приведены углы полной рефракции α , рассчитанные по известной формуле из работы [1], для зенитных углов $z_0 = 85^\circ$ и $z_0 = 89^\circ$ для высот источника излучения над поверхностью Земли $H = 30$ км и $H \rightarrow \infty$. Углы α рассчитываются для разных сезонов года в точках наблюдения Тикси, Якутска и Иркутска с соответствующими тропосферными параметрами N_0 и β . Углы преломления над Тикси больше, чем углы над другими точками для каждого сезона, поскольку Тикси находится почти на уровне моря, а пункты Якутск и Иркутск расположены соответственно на уровнях 101 и 440 метров. Существует высокая корреляция между значениями углов рефракции и значениями показателя преломления на земной поверхности. Угол увеличивается быстрее, когда z_0 стремится к 90° . Расчеты показали, что угол рефракции не изменяется для высот H , которые превышают эквивалентную высоту h_d , приблизительно равную $h_d \approx 40$ км.

Усредненные в разные сезоны 2018 года параметры тропосферы можно считать характерными для рассмотренных пунктов наблюдения, и их можно использовать в последующие годы для расчета углов рефракции и истинного расстояния от источника до приемника по формулам, приведенным в работах [1, 3].

Таблица 1. Сезонные параметры экспоненциальной модели и значения углов полной рефракции в угловых секундах для $H=30$ км и $H \rightarrow \infty$

Пункт набл.	Месяцы	N_0	β , км ⁻¹	$z_0=85^\circ$		$z_0=89^\circ$	
				$H=30$ км	$H \rightarrow \infty$	$H=30$ км	$H \rightarrow \infty$
Иркутск (52°12'N, 104°17'E)	февраль	307	0,131	642	651	1698	1710
	апрель	287	0,128	597	607	1565	1577
	июль	319	0,133	669	678	1781	1792
	октябрь	298	0,129	621	631	1634	1646
Якутск (62°01'N, 129°44'E)	февраль	332	0,142	703	710	1912	1921
	апрель	301	0,137	633	641	1694	1704
	июль	323	0,133	678	687	1811	1822
	октябрь	312	0,135	655	664	1750	1760
Тикси (71°38'N, 128°52'E)	февраль	332	0,137	699	707	1877	1888
	апрель	313	0,131	655	664	1734	1746
	июль	321	0,129	670	680	1770	1783
	октябрь	309	0,13	645	655	1705	1716

Разделение влажной и сухой компонент тропосферной задержки

На основе рядов данных по полной зенитной тропосферной задержке (ZTD), полученных посредством непрерывных GPS измерений (рис. 1), рассматривается возможность расчета изменений угла полной рефракции для пунктов наблюдения Тикси (TIXI), Иркутска (IRKM) и Якутска (YAKT). Временной ряд полученных данных по ZTD для трех станций показывает характерное годовое изменение с более низкими значениями в зимние месяцы и более высокими значениями в летние месяцы. Наименьшая амплитуда годового изменения ZTD наблюдается над приарктическим пунктом Тикси. Наибольшая годовая амплитуда наблюдается над Иркутском, это связано с большим межсезонным температурным ходом, а также с повышенным уровнем влагосодержания тропосферы в летнее время.

Индекс рефракции на поверхности Земли можно выразить в виде соотношения [5]:

$$N_0 = 0,5 \cdot 10^7 \cdot (ZWD/h_w + ZHD/h_d). \quad (3)$$

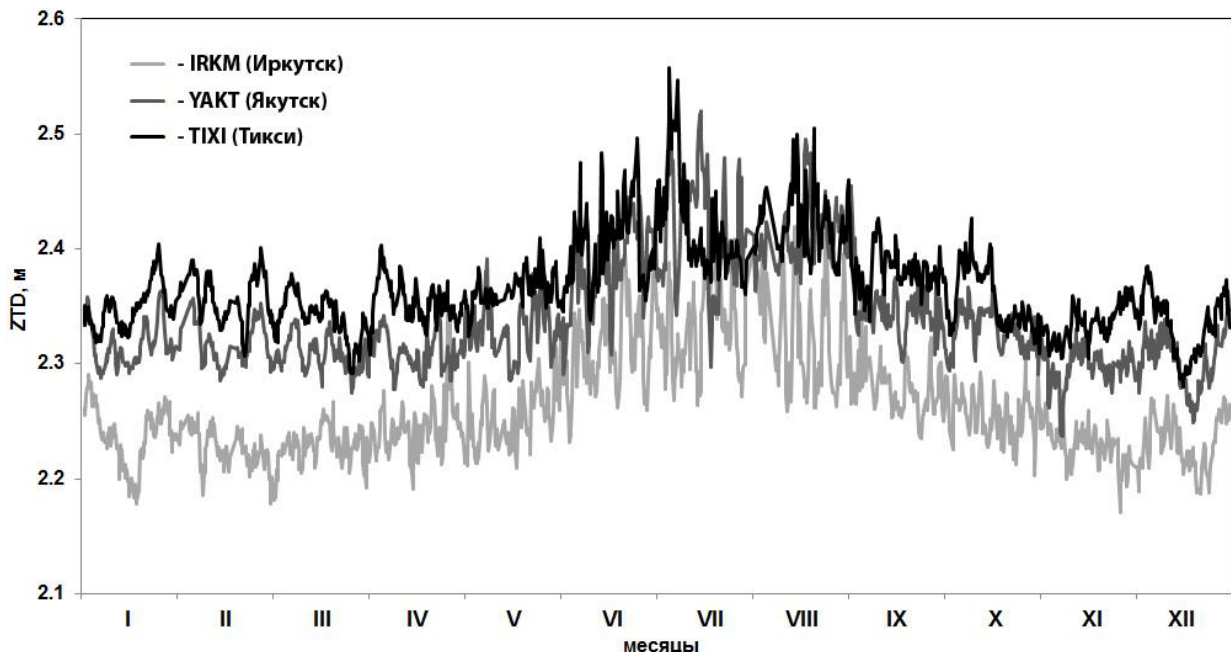


Рис 1. Вариации ZTD, полученных посредством GPS измерений в течение 2018 г., над тремя пунктами наблюдения.

Здесь ZWD и ZHD «влажная» и «сухая» составляющие полной зенитной тропосферной задержки соответственно; h_w – высота тропосферы над уровнем

моря, около 11 км; h_d – эквивалентная высота над уровнем моря, равная $h_d = 40136 + 0,148 \cdot t$, м (t – температура воздуха у поверхности, °C) [6].

Специальный алгоритм MOPS [7] применяется для определения «сухой» составляющей ZHD в случае отсутствия метеорологических данных. Такой приближенный подход использует стандартные метеорологические параметры, которые зависят от широты, высоты над уровнем моря и учитывают сезонные изменения. Основным недостатком этой методики заключается в нивелировании вариаций атмосферного давления, которое вносит основной вклад в характер изменения «сухой» компоненты ZHD. Погрешность учета атмосферного давления в 5 мбар вносит вклад в погрешность определения ZHD примерно в 11 см. При использовании алгоритма MOPS в холодное время года такая погрешность вполне возможна. На рис. 2 представлены сравнительные графики годовых изменений «влажной» компоненты ZWD для Иркутска. Графики рассчитаны с использованием метеорологических данных [8] и на основе измеренных GPS данных по ZTD с учетом приземных барометрических данных для ZHD и с учетом значений ZHD, полученных по методике MOPS.

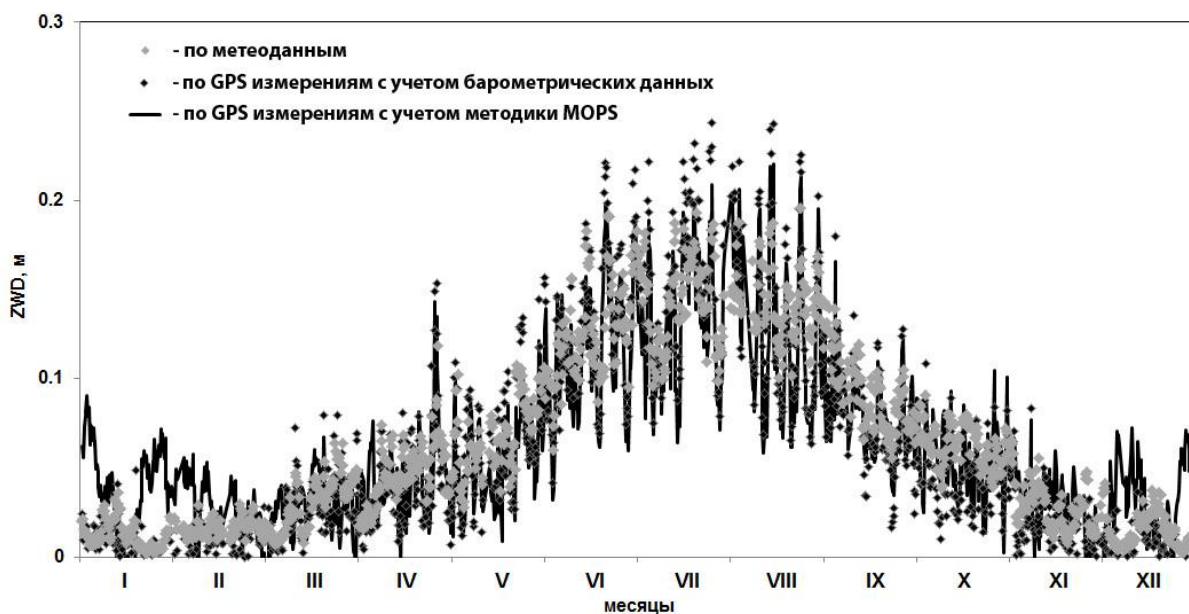


Рис. 2. Сравнительные графики годовых изменений ZWD, полученные по метеоданным и по GPS измерениям с учетом барометрических данных для ZHD и с учетом методики MOPS для ZHD для Иркутска в 2018 году.

На рис. 3 показана разница двух вариантов «сухих» задержек для трех рассматриваемых пунктов, первый вариант – расчет по прямым метеорологическим данным [8], второй – по методике MOPS без учета метеоданных. Отклонение ZHD от ZHD (MOPS) не превышает 3,3% относительно компоненты ZHD для всех трех пунктов. СКО составило для Иркутска 0,023 м, для Якутска – 0,021 м, для Тикси – 0,022 м.

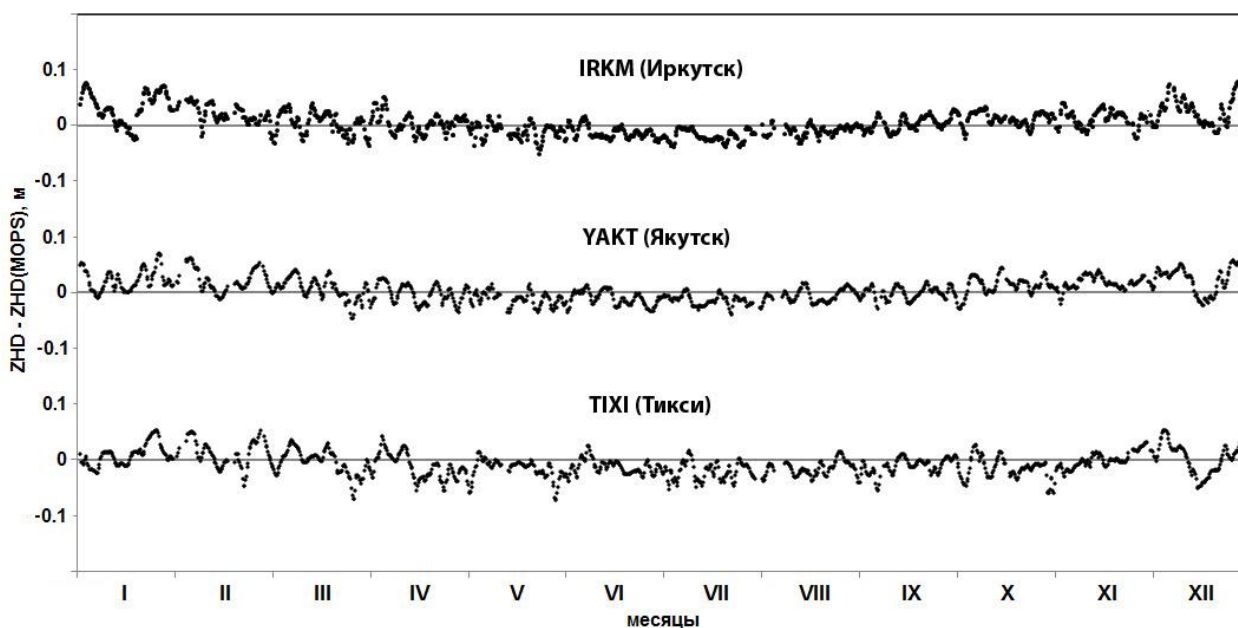


Рис. 3. Временные ряды для пунктов наблюдения IRKM, YAKT и TIXI разностей ZHD – ZHD (MOPS).

Для определения эквивалентной высоты h_d в формуле (3) годовое изменение значения температуры у поверхности t , °C аппроксимировано в виде параболы с максимумом, соответствующему дате 20 июля – условно самому теплому дню года. В качестве примера на рис. 4 показаны сравнительные графики приземного индекса рефракции, рассчитанных по формуле (3) на основе данных ZTD, полученных посредством GPS измерений в течение 2018 г. в пункте наблюдения IRKM. В первом случае значения ZHD и h_d рассчитаны по метеоданным, во втором – соответственно по методике MOPS и посредством параболической аппроксимации. Данные на графиках имеют высокий коэффициент взаимной корреляции, равный 0,88. СКО отличия годовых значений двух графиков составило 8,3.

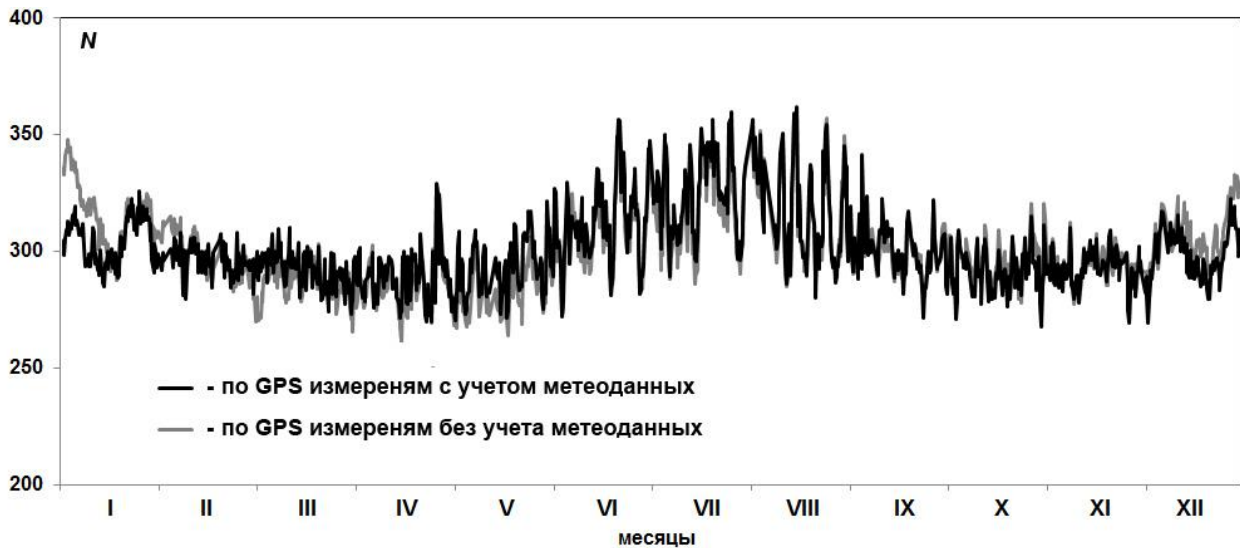


Рис. 4. Сравнительные годовые графики вариаций приземного индекса рефракции N_0 , полученных для г. Иркутск за 2018 г.

Угол полной рефракции по данным GPS измерений

Годовые расчеты полного угла рефракции α выполнены с использованием формулы, приведенной в работе [1], с учетом поверхностных значений индекса рефракции N_0 , рассчитанного по формуле (3), и выбора усредненного значения β для Иркутска, равного 0,13, для Якутска – 0,137 и для Тикси – 0,133 согласно значениям тропосферных параметров, приведенных в таблице 1. На рис. 5 представлены сравнительные графики расчетов полного угла рефракции α для пунктов наблюдения Иркутск (IRKM), Якутск (YAKT) и Тикси (TIXI) для видимого угла $z_0 = 85^\circ$ и высоты излучателя $H = 30$ км. Расчеты α выполнены на основе данных ZTD, полученных в результате обработки GPS данных, с учетом и без учета метеорологических данных для определения значений индекса рефракции N_0 . Основой этих расчетов является высокая корреляция между вариациями углов преломления и поверхностными значениями индекса рефракции [1, 3]. Наибольшее отличие графиков наблюдается в зимний период, это связано с большей несогласованностью модели MOPS с барометрической моделью для ZHD в это время года (рис. 2). В целом сравнение расчетов по пункту Иркутск дает хорошее согласие. Наблюдается более заметная несогласованность расчетов в пунктах наблюдения Якутск и Тикси, поскольку

в этих пунктах сезонные значения вертикального градиента β имеют большие вариации в течение года в отличие от пункта наблюдения Иркутск.

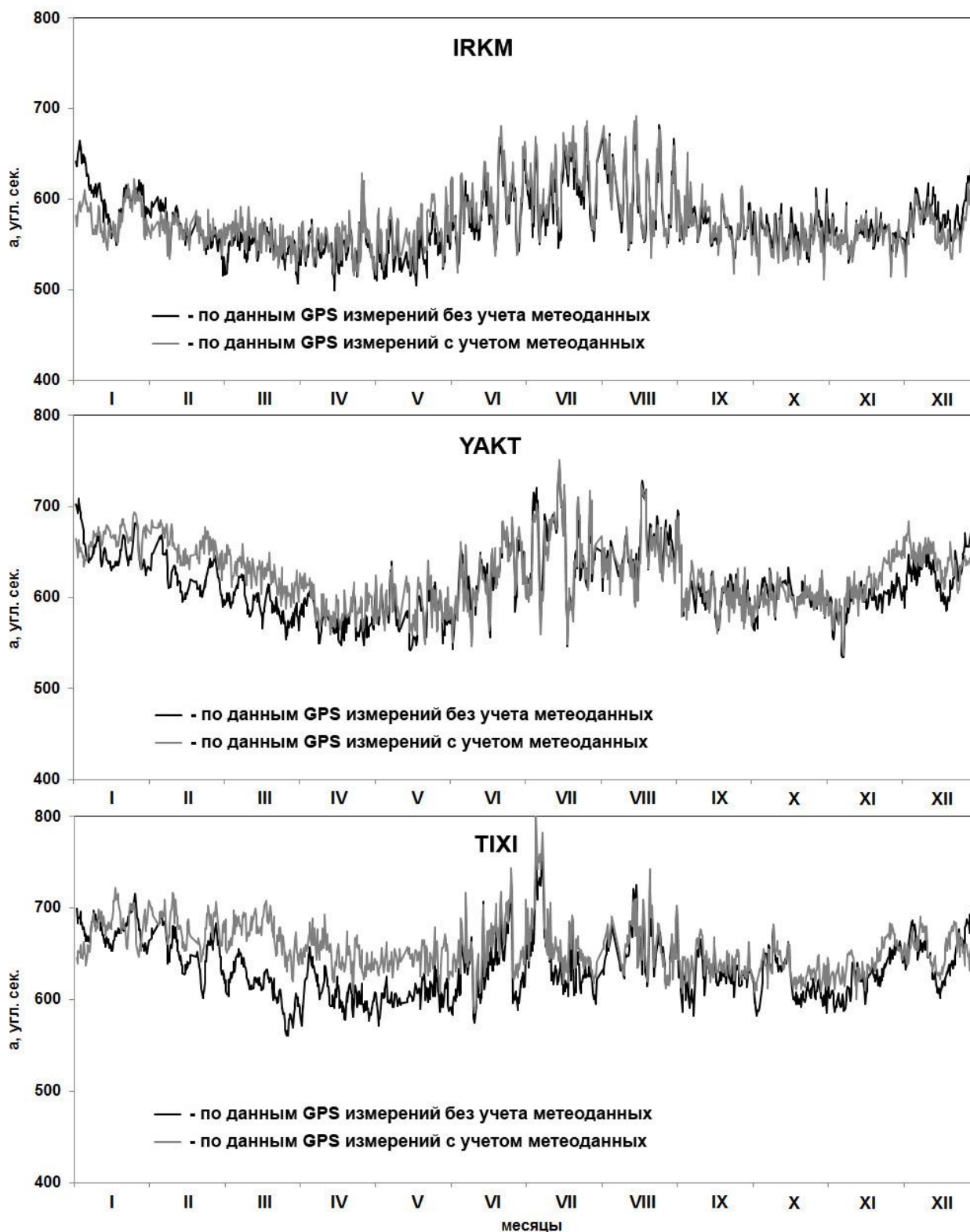


Рис. 5. Сравнительные расчеты полного угла преломления α над точками наблюдения Иркутск (IRKM), Якутск (YAKT) и Тикси (TIXI) в течение 2018 г.

В таблице 2 приведены результаты сравнения расчетов, показанных на рис. 5, для каждого пункта наблюдения. В третьей и четвертой колонках показано расстояние горизонтального разнесения и высоты над уровнем моря пункта GPS измерений и метеостанции со службой запусков радиозондов. Наибольшее стандартное отклонение разницы между расчетами составило для Тикси – 22,3 угл. сек., такой разброс не превышает 3%. В данном пункте наблюдения отмечается разброс данных, достигающий 86 угл. сек., это не превышает 11%. Коэффициенты корреляции между представленными данными высоки, более 0,73 для всех трех пунктов наблюдения.

Таблица 2. Сравнение результатов годовых расчетов полного угла рефракции, выполненных с учетом и без учета метеоданных

Пункт GPS наблюдения	Количество измерений	Расстояние, км	Высоты над ур. моря, м	СКО, угл. сек.	Корреляция
IRKM	1208	41	505 / 437	15,9	0,88
YAKT	1211	2,5	103 / 101	19,3	0,85
TIXI	1211	6,5	47 / 7	22,3	0,73

Заключение

Получены усредненные месячные данные параметров экспоненциальной модели (N_0 и β) в разные сезоны 2018 года для пунктов наблюдения Иркутск, Якутск и Тикси, расположенных в разных широтных зонах Сибири. Расчеты показали, что углы рефракции при высоте точки излучения выше 40 км остаются практически неизменными. Характер годового изменения углов рефракции над пунктами наблюдения в разных широтных зонах Сибири существенно не отличаются друг от друга. Использование данных по полной зенитной тропосферной задержке (ZTD), полученных посредством GPS измерений, с использованием метеорологических данных позволяет с достаточно высокой точностью рассчитывать углы рефракции. Показано, что метод GPS измерений позволяет изучать рефракционные эффекты как самих сигналов GPS, так и других сигналов диапазона УКВ без учета метеоданных.

Исследование выполнено по госбюджетному проекту «Распространение радиоволн в неоднородных импедансных каналах» в ИФМ СО РАН.

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. Дембелов М.Г., Башкуев Ю.Б., Лухнев А.В. 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](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.6.1)
3. Арманд Н.А., Колосов М.А. О рефракции радиоволн в тропосфере // Радиотехника и электроника. 1965. Т. 10. № 8. С. 1401-1409.
4. Smith E. K., S. Weintraub The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies // Proceedings of the Institute of Radio Science. 1953. Vol. 41.P. 1035-1037.
5. 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.
6. Hopfield H. S. Tropospheric refraction effects on satellite range measurements // APL Technical Digest. 1972. Vol. 11. P. 11–19.
7. MOPS, Minimum operational performance standards for global positioning system/wide area augmentation system airborne equipment, Document No. RTCA/DO-229A, 1998. URL: <https://standards.globalspec.com/std/10072442/RTCA%20DO-229>
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. Vol. 15. P. 247-25.

Для цитирования:

Дембелов М.Г., Башкуев Ю.Б. О возможности моделирования углов тропосферной рефракции по данным GPS измерений. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun20/2/text.pdf> DOI [10.30898/1684-1719.2020.6.2](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.6.2)