

Уточнение параметров алгоритма расчёта тропосферной задержки по данным локального радиозондирования атмосферы

© Г. Н. Ильин, В. Ю. Быков

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Расчет влажностной тропосферной задержки (ВТЗ) по данным дистанционного радиозондирования атмосферы основан на измерениях радиояркостной температуры излучения атмосферы (РЯТ), полученных с помощью радиометра водяного пара (РВП). Точность расчёта ВТЗ определяется двумя основными факторами: точностью измерения радиояркостной температуры атмосферы и точностью моделей ряда параметров алгоритма пересчёта РЯТ в соответствующие значения ВТЗ. К таким параметрам, например, относится эффективная температура атмосферы, взвешенная по коэффициенту поглощения радиосигнала в атмосфере, компонента оптической толщины атмосферы, связанная с поглощением в молекулярном кислороде, величина, отражающая отношение поглощения в водяном паре на частотах РВП и другие. Подробности алгоритма расчёта ВТЗ приведены в литературных ссылках. Модель расчёта параметров алгоритма основана на данных радиозондовых измерений вертикальных профилей метеопараметров. С целью уточнения параметров алгоритма вполне логичным представляется схема расчёта, основанная на данных станций радиозондирования, расположенных вблизи мест дислокации РВП.

Современная спектральная теория поглощения радиосигналов в атмосферных газах, используемая при обработке многолетнего массива радиозондовых профилей метеопараметров, позволяет получить наиболее точные значения поглощения радиосигнала в кислороде и водяном паре и другие необходимые для вычисления ВТЗ величины. На основе данных радиозондирования возможно построить регрессионную модель, учитывающую сезонные колебания расчётных величин в зависимости от приземной температуры и давления. Таким образом, параметры алгоритма привязываются к определённому географическому месту размещения аппаратуры РВП и соответствующим данному месту климатическим условиям.

В настоящей работе представлены результаты расчёта ряда параметров алгоритма вычисления ВТЗ. Расчет параметров алгоритма производился на основе данных станций аэрологического зондирования атмосферы, расположенных, в том числе, в районах размещения обсерваторий РСДБ-комплекса «Квazar-КВО». Оценка параметров алгоритма проведена на основе анализа данных измерений радиозондовых станций за период с 2019 по 2021 гг. В результате получены уточнённые регрессионные соотношения для коэффициентов алгоритма расчёта тропосферной задержки, учитывающие климатические особенности местоположения обсерваторий. Сравнение значений ВТЗ, рассчитанных по предложенной схеме с аналогичными значениями ВТЗ международной службы IGS в обсерваториях РСДБ-комплекса «Квazar-КВО» показало совпадение абсолютных значений ВТЗ с точностью лучше 10 мм в условиях отсутствия осадков.

Ключевые слова: радиометр водяного пара, распространение радиосигналов в атмосфере, тропосферная задержка, радиозондирование, алгоритм расчета тропосферной задержки.

Контакты для связи: Ильин Геннадий Николаевич (igen@iaaras.ru).

Для цитирования: Ильин Г. Н., Быков В. Ю. Уточнение параметров алгоритма расчёта тропосферной задержки по данным локального радиозондирования атмосферы // Труды ИПА РАН. 2022. Вып. 63. С. 8–16.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.63.8-16>

Refinement of the Algorithmic Parameters for Calculating the Tropospheric Delay Using Local Radio Sounding Data of the Atmosphere

G. N. Ilin, V. Yu. Bykov

Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

Abstract

The calculation of the tropospheric wet delay (TWD) from the data of remote radio sounding of the atmosphere is based on measurements of the brightness temperature of the atmospheric radiation (BT) obtained using a water vapor radiometer (WVR). The accuracy of the TWD calculation is determined by two main factors: the accuracy of measuring the radio brightness temperature of the atmosphere and the accuracy of the models for a parameter number using the algorithm for converting BT into the corresponding values of the TWD. Such parameters, for example, include the effective temperature of the atmosphere, weighted by the absorption coefficient of the radio signal in the atmosphere, the component of the atmosphere optical thickness associated with absorption in molecular oxygen, the value reflecting the ratio of absorption in water vapor at WVR frequencies, and others. Details of the TWD calculation algorithm are given in

the literature references. The model for calculating the parameters of the algorithm is based on the data of radiosonde measurements of vertical profiles of meteorological parameters.

In order to refine the algorithm parameters, it seems quite logical to use the data of radio sounding stations located near the place where WVR is installed. The modern spectral theory of the radio signal absorption in atmospheric gases, used in the processing of a long-term series of radiosonde profiles with meteorological parameters, makes it possible to obtain the most accurate values of the radio signal absorption in oxygen and water vapor and other quantities necessary for calculating the TWD. Based on radio sounding data, it is possible to build a regression model that takes into account seasonal fluctuations in calculated values depending on surface temperature and pressure. Thus, the parameters of the algorithm are tied to the WVR certain geographical location and the climatic conditions corresponding to this place.

The calculation of the algorithm parameters was carried out on the basis of data from atmosphere sounding stations located near the Quasar VLBI Network observatories. The estimation of the algorithm parameters was carried out based on the analysis of measurement data from atmosphere sounding stations for the period from 2019 to 2021. As a result, refined coefficients of the algorithm for calculating the tropospheric delay were obtained, taking into account the climatic features of the observatories location. Comparison of the TWD values calculated according to the proposed scheme with similar values of the international IGS service in the of the Quasar VLBI network stations showed the coincidence of the absolute values of the TWD with an accuracy of 10 mm in the absence of precipitation.

Keywords: water vapor radiometer, propagation of radio signals in the atmosphere, tropospheric delay, radio sounding, tropospheric delay calculation algorithm.

Contacts: Gennady N. Ilin (igen@iaaras.ru).

For citation: Ilin G. N., Bykov V. Yu. Refinement of the algorithmic parameters for calculating the tropospheric delay using local radio sounding data of the atmosphere // Transactions of IAA RAS. 2022. Vol. 63. P. 8–16.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.63.8-16>

Введение

В алгоритме расчёта влажностной тропосферной задержки (ВТЗ) радиосигнала, который используется при обработке результатов измерения радиометра водяного пара (далее алгоритм), задействован ряд параметров, значения которых рассчитываются на основе моделей, опирающихся на приземные метеоданные. К таким параметрам относится, например, взвешенная по коэффициенту поглощения температура атмосферы ([Жевакин и др., 1958](#)). Необходимыми параметрами в алгоритме расчёта ВТЗ по данным измерений двухчастотного ($\vartheta_1 = 20.7$ и $\vartheta_2 = 31.4$ ГГц) радиометра водяного пара (РВП) является поглощение в кислороде $\tau_{O_2, \vartheta}$ (Нп), коэффициент K_1 , отражающий отношение поглощения в водяном паре на частотах РВП и коэффициент K_2 , связывающий поглощение в водяном паре с интегральным содержанием водяного пара Q (г/см²). Перечисленные коэффициенты должны быть предварительно вычислены и затем использованы при обработке данных РВП ([Башаринов и др., 1974](#), [Ильин, Троицкий 2017](#)).

В первом приближении при оценке значений ТЗ коэффициент K_1 и K_2 можно считать константами:

$$\begin{aligned} K_1 &= \tau_{H_2O, \vartheta_2} / \tau_{H_2O, \vartheta_1} \approx 0.5 \\ K_2 &= \tau_{H_2O, \vartheta_1} / Q \approx 0.045 \end{aligned} \quad (1)$$

Среднюю температуру атмосферы и поглощение в кислороде возможно, например, вычислить в соответствии с работой ([Кузовлев, Станкевич, 1964](#)).

С другой стороны, известно, что перечисленные и другие необходимые для расчёта тропо-

сферной задержки (ТЗ) параметры алгоритма наиболее точно рассчитываются при использовании данных о высотных профилях метеопараметров (ВПМ), измеряемых на аэрологических станциях (АЭС). Статистическая обработка многолетних данных АЭС о ВПМ позволяет рассчитать все необходимые параметры для алгоритма расчёта ТЗ по данным РВП, а также значения ТЗ на момент пуска радиозонда. Важным обстоятельством является то, что данные АЭС позволяют более точно учесть в модели расчёта сезонную изменчивость параметров алгоритма, обусловленную в том числе климатическими особенностями места расположения АЭС, с учетом соотношения (для простоты) сезонной изменчивости параметров алгоритма с вариациями приземной температуры воздуха.

В результате по данным АЭС определяются параметры алгоритма, «привязанные» к району расположения АЭС. Далее возникает задача «переноса» параметров алгоритма к местам расположения аппаратуры РВП, имеющим помимо климатических особенностей разный высотный уровень.

Для частного случая обсерваторий РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» коэффициенты (1) корректировались по доступным данным о ТЗ, определяемых международной службой ГНСС (IGS), которые использовались в качестве опорного ряда ([Ильин, 2019](#)). Представляет интерес определить требуемый ряд параметров алгоритма расчета ТЗ для произвольного места расположения РВП.

Качество работы усовершенствованного алгоритма возможно оценить по результату сравнения в обсерваториях РСДБ-комплекса «Квазар-КВО»

Координаты станций зондирования

Номер АЭС, название	Высота над уровнем моря, м	Координаты: сев. широта, вост. долгота, град.
20292 «Мыс Федорова»	15	77.71, 104.30
26075 «Воейково»	72	59.95, 30.70
31977 «Владивосток»	82	43.26, 135.05
37055 «Мин-Воды»	314	44.22, 43.10
30715 «Ангарск»	437	52.48, 103.85
30935 «Красный Чикой»	771	50.36, 108.75
44231 «Мурен»	1283	49.56, 100.16

значений ТЗ РВП и полученных по сигналам ГНСС, обработанных международной службой IGS.

Для расчёта параметров алгоритма были выбраны АЭС, расположенные как вблизи мест размещения действующей и планируемой к вводу (Уссурийский отдел ИПА РАН, АЭС «Владивосток») аппаратуры РВП, так и различающихся по высоте расположения над уровнем моря и климатическими особенностями мест расположения. Обработка данных АЭС (табл. 1) проведена на интервале трёх лет — 2019–2021 г. Для каждой АЭС получен массив данных, содержащий результаты обработки более 2000 запусков радиозондов.

Данные АЭС скачивались с сайта университета Вайоминг, США (University of Wyoming, Department of Atmospheric Science).

Вычисления проводились с помощью специализированного ПО, реализованного на языке Python 3.7. Расчет параметров проводился с использованием спектральной теории поглощения в атмосферных газах в её современной реализации ([Liebe, 1989; Cimini et al., 2018](#)). Далее по тексту представлены результаты проделанных расчётов и сравнения ТЗ, полученных РВП и международной службой IGS в обсерваториях РСДБ-комплекса «Квазар-КВО».

Средняя температура атмосферы

Средняя (взвешенная по поглощению $\alpha(h)$ — высотный профиль коэффициента поглощения радиосигнала в водяном паре и кислороде) температура атмосферы вычислялась для частот РВП в соответствии с ([Жевакин и др., 1958](#)):

$$T_{\text{cp}} = \frac{\int_0^{\infty} \alpha(h) \cdot \tau(h) \cdot \exp\left[-\int_0^h \alpha(h) dh\right] \cdot dh}{\int_0^{\infty} \alpha(h) \cdot \exp\left[-\int_0^h \alpha(h) dh\right] \cdot dh}, \quad (2)$$

где $\tau(h) = \int_0^h \alpha(h) dh$ — оптическая толщина, поглощение сигнала в атмосфере (Нп) от поверхности до высоты h (км).

В качестве примера приведём результат расчёта средней температуры атмосферы по данным АЭС «Воейково» (рис. 1). Регрессионная зависимость от приземной температуры воздуха имеет вид: $T_{\text{cp}}(\vartheta_1, T_a) = 0.8029 \times T_a + 42.49$. Из рисунка видно, что точность аппроксимации $T_{\text{cp}}(\vartheta_1, T)$ составляет ~ 3.5 К (СКО). Следует отметить, что точки на рис. 1, приходящиеся на ночное время (00:00 UT), располагаются выше прямой $T_{\text{cp}}(\vartheta_1, T)$, а дневные (12:00 UT) — ниже.

На рис. 2 приведены регрессионные зависимости средней температуры атмосферы (2) на частотах ϑ_1 и ϑ_2 от приземной температуры воздуха T_a (К), рассчитанные для АЭС, перечисленных в табл. 1.

Следует отметить, что средняя температура атмосферы на частоте ϑ_1 превышает аналогичную температуру на частоте ϑ_2 на 2–3 К.

Из рис. 2 видны существенные отличия от других станций в характере зависимостей T_{cp} АЭС арктической зоны (в летний период) и АЭС «Владивосток». Данное обстоятельство следует учитывать при расчёте оптических толщин по данным РВП.

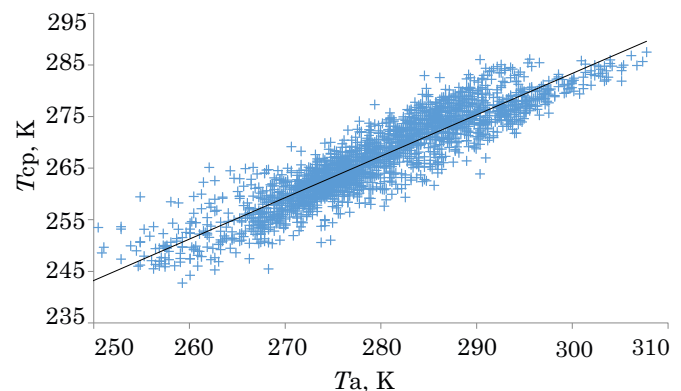


Рис. 1. Средняя температура атмосферы (2) на частоте РВП ϑ_1 в зависимости от приземной температуры воздуха

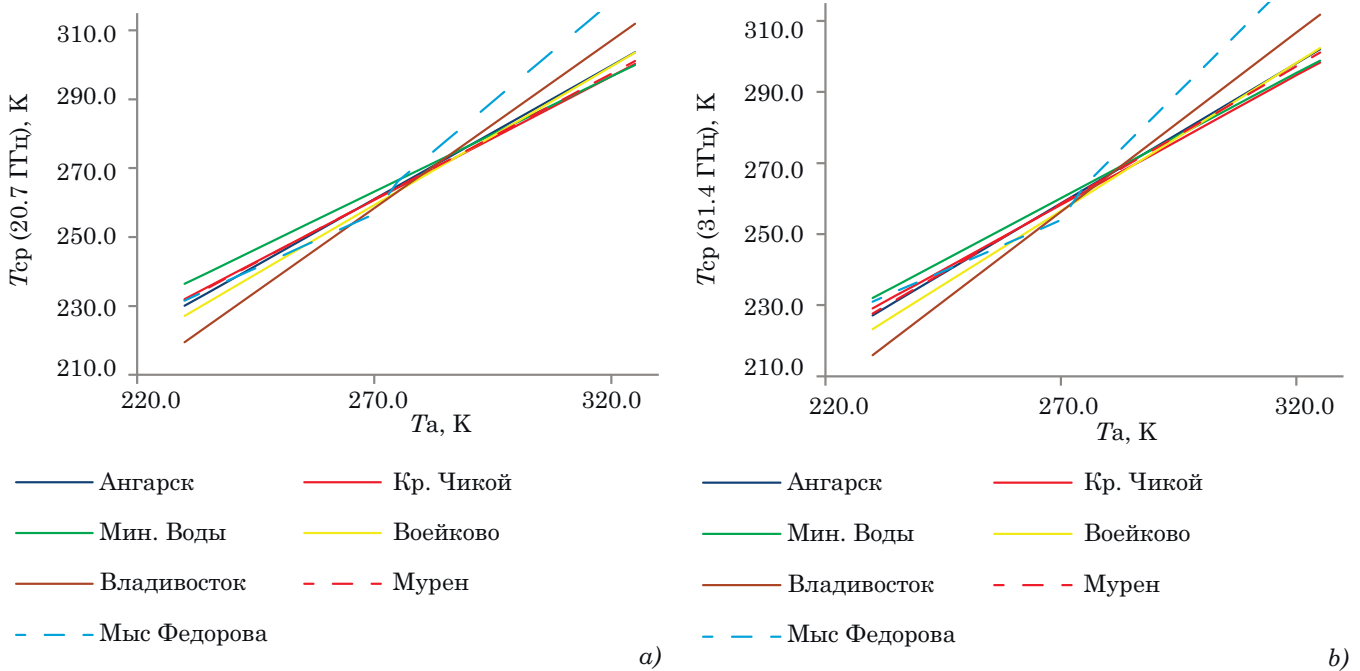


Рис. 2. Средняя температура атмосферы (2): а) на частоте ϑ_1 , б) на частоте ϑ_2 (в зависимости от приземной температуры воздуха)

В средних широтах наклон кривых практически совпадает и для расчётов $T_{sp}(\vartheta, T)$ можно использовать следующие выражения:

$$\begin{aligned} T_{sp}(\vartheta_1, T) &= 0.725 \times Ta + 66 \\ T_{sp}(\vartheta_2, T) &= 0.781 \times Ta + 47. \end{aligned} \tag{3}$$

Отношение поглощения в водяном паре на частотах РВП

Коэффициент K_1 (1) также имеет сезонную изменчивость, которую удобно выразить через температуру воздуха. В качестве примера на рис. 3 приведены результаты расчёта данного параметра для АЭС «Воейково» на частоте канала РВП ϑ_1 .

Соответствующая регрессионная зависимость имеет вид: $K_1(\vartheta_1, Ta) = -0.001285 \times Ta + 0.82$.

На рис. 4 приведены зависимости коэффициента (1) от температуры воздуха Ta (K), рассчитанные для АЭС, перечисленных в табл. 1. Из рисунка следует, что характер сезонной зависимости сохраняется для разных АЭС, наклон кривых приблизительно совпадает и составляет: $dK_1/dTa \approx -0.00131 \pm 0.00020$.

Представляет интерес сравнить значения K_1 , полученные по данным АЭС, с аналогичными результатами РВП. Характер зависимости $K_1(Ta)$ в месте расположения обсерваторий возможно оценить из данных РВП в условиях безоблачной погоды, когда водосодержание в атмосфере близко к нулю (менее 0.05 кг/м^3). На рис. 5 представлена зависимость $K_1(Ta)$, рассчитанная по данным РВП обсерватории «Светлое». Из рисунка видно, что

средние значения $K_1(Ta)$ РВП и АЭС «Воейково» существенно различаются. В летний период, когда $Q > 1 \text{ г/см}^2$ и $Ta > 295 \text{ К}$, коэффициент K_1 по данным РВП определяется достаточно точно: $K_1(Ta) = 0.4 \pm 0.03$, АЭС «Воейково»: $K_1 \approx 0.45$ (рис. 4). Возможно, что подобное различие связано с завышенными (на $\sim 5\%$) по отношению к РВП значениями поглощения в водяном паре, рассчитанными по данным радиозондирования. На подобное

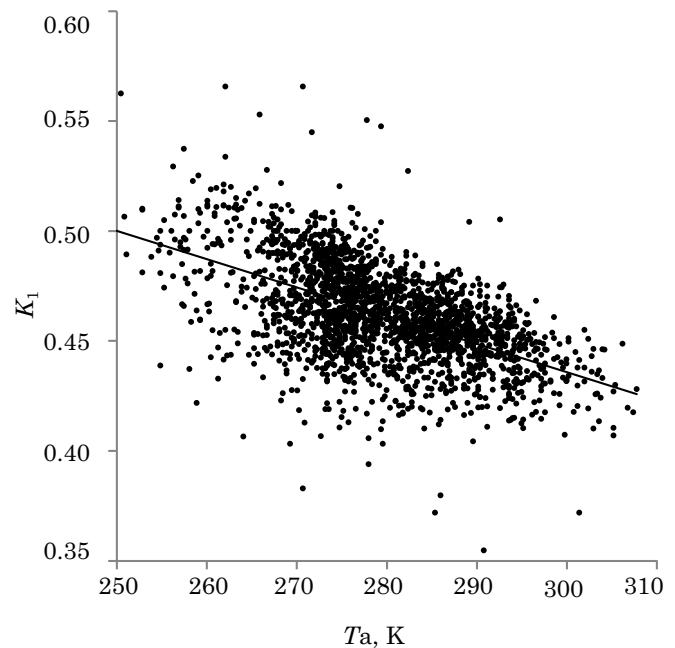


Рис. 3. Параметр K_1 (станция «Воейково») в зависимости от приземной температуры воздуха

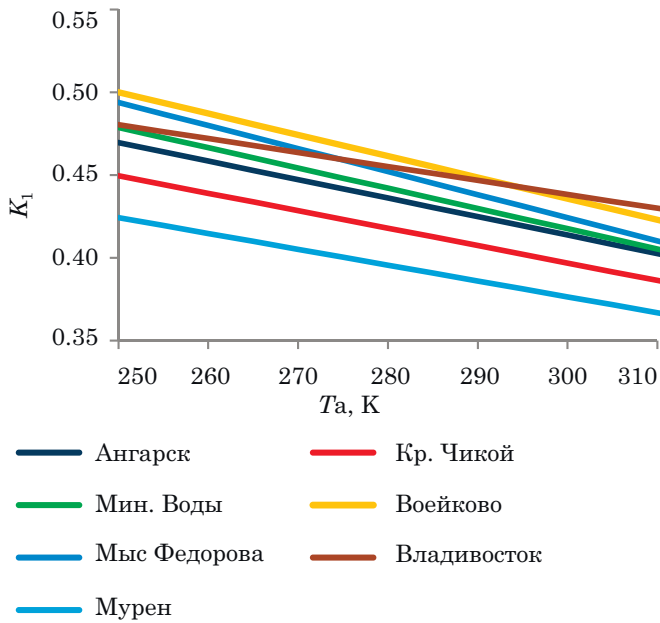


Рис. 4. Коэффициент K_1 в зависимости от приземной температуры воздуха

расхождение результатов радиозондирования и ГНСС в части ВТЗ (или Q) обращено внимание в (Горшков и др., 2019).

Разность значений K_1 РВП и АэС аналогичным образом проявляется в обсерваториях «Бадары» и «Зеленчукская» (рис. 6). На рис. 6 отложены значения K_1 в зависимости от высоты места расположения при фиксированной приземной температуре 300 К, рассчитанные по данным АэС и РВП.

Оценка значений K_1 по результатам измерений РВП представляется более достоверной по сравнению с результатами АэС и использована нами в модели $K_1(Ta)$ для расчёта ТЗ. В модернизированной версии алгоритма вычисления ТЗ по данным РВП обсерваторий используются регрессионные зависимости $K_1(Ta)$ ближайшей к обсерватории АэС (рис. 4), скорректированные с учётом результатов оценки K_1 радиометрическим методом (табл. 2).

Обработка данных АэС позволяет найти уточнённые значения коэффициента K_2 для обсерваторий РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» (рис. 7). По оси абсцисс отложены значения высоты АэС над уровнем моря.

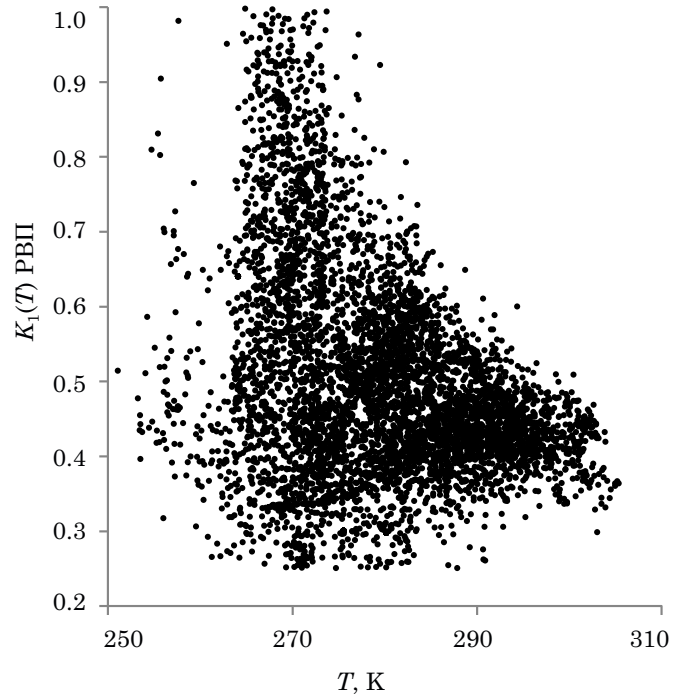


Рис. 5. Параметр K_1 по данным РВП «Светлое» в зависимости от приземной температуры воздуха

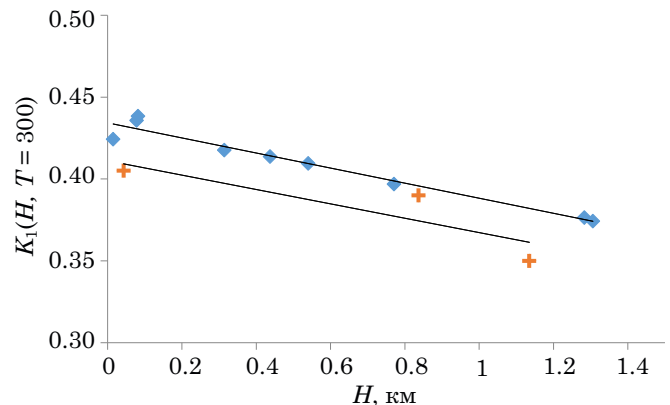


Рис. 6. Параметр K_1 АэС (вверху) и K_1 РВП «Светлое», «Бадары», «Зеленчукская» в зависимости от высоты места расположения пункта и фиксированной температуре воздуха 300 К

Таблица 2

Параметры модели для РВП обсерваторий

Название обсерватории	Высота над уровнем моря, м	Координаты: широта / долгота, градус	$K_1(Ta)$	$K_1(300)$	K_2
«Светлое»	43	60.53 / 29.78	$-0.001285 \times Ta + 0.79$	0.405	0.044
«Бадары»	837	51.77 / 102.23	$-0.00105 \times Ta + 0.69$	0.375	0.046
«Зеленчукская»	1135	43.79 / 41.56	$-0.001561 \times Ta + 0.83$	0.362	0.048

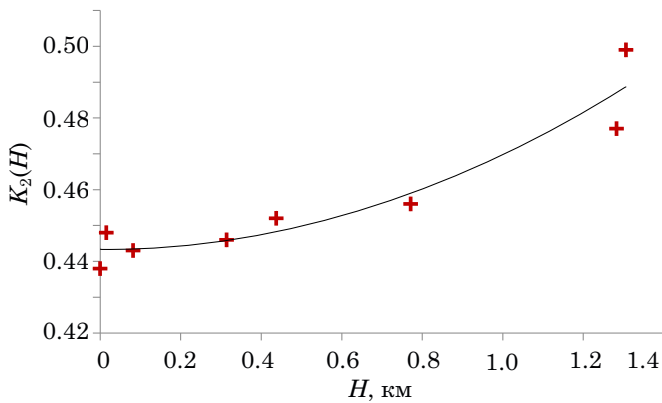


Рис. 7. Параметр K_2 в зависимости от высоты расположения АЭС, км

На рис. 6 добавлены две станции — 47104 «Южная Корея» и 44292 «Улан-Батор», расположенные на высоте 89 и 1306 м соответственно.

Потери в кислороде

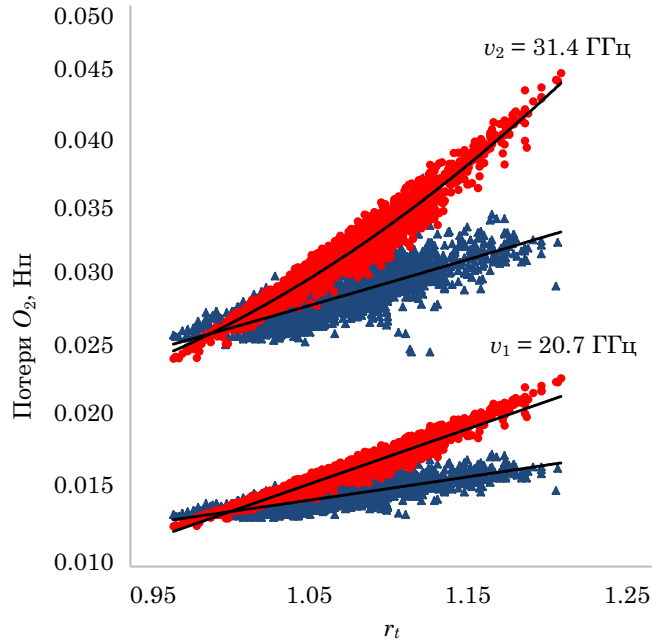
В ряде случаев расчёт текущих значений поглощения в кислороде производится на основе модели, зависящей от приземных метеопараметров — давления и температуры, выраженных в относительных единицах (Кузовлев, Станкевич, 1964):

$$\tau_{O_2} = A_{\vartheta_{1,2}} \cdot r_p^2 \cdot r_t^{2.8}, \quad (4)$$

где $r_p = \frac{P}{1013.25}$, $r_t = \frac{300}{T_a}$ — относительное давление и температура, A — константа, зависящая от частоты. Для частот РВП: $A_{\vartheta_1} = 0.014$, $A_{\vartheta_2} = 0.027$.

Обработка данных АЭС показывает, что данная модель недостаточно точно отражает сезонную изменчивость поглощения в кислороде. На рис. 8 для примера показаны результаты расчёта поглощения в кислороде по данным АЭС «Воейково» (синий) и оценка поглощения согласно модели (4) (красный). Верхняя группа кривых на рис. 5 относится к частоте ϑ_2 , а нижняя — к частоте ϑ_1 . Из рисунка видно, что расхождение оценок в зимний период превышает ~30 %.

Модель (4) может быть улучшена, если ввести температурную зависимость коэффициента A вида



■ Результаты расчёта поглощения в кислороде по данным АЭС «Воейково»
 ■ Оценка поглощения согласно модели (4)

Рис. 8. Потери в кислороде: станция «Воейково» в зависимости от температуры воздуха

$$A(r_t, \vartheta_{1,2}) = ar_t^b. \quad (5)$$

Значения коэффициентов a и b находятся из результатов статистической обработки данных АЭС. Таким образом, уточнённая модель расчёта потерь в кислороде имеет вид

$$\tau_{O_2} = ar_t^b \cdot r_p^2 \cdot r_t^{2.8}. \quad (6)$$

Коэффициенты a и b для частот РВП и разных АЭС перечислены в табл. 3. Из табл. 3 следует, что кривые $A(T_a)$ для разных станций (рис. 6, 7) отличаются. Имеет место зависимость коэффициента b от высоты расположения АЭС. Данное обстоятельство следует учитывать в алгоритме расчёта параметров атмосферы по данным РВП. При выборе модели расчёта поглощения в кислороде следует ориентироваться на данные ближайшей АЭС.

Таблица 3

Коэффициенты a и b для частот РВП

Аэрологическая станция, высота, м	a , 20.7 ГГц	b , 20.7 ГГц	a , 31.4 ГГц	b , 31.4 ГГц
20292 «Е. К. Fedorova», 15 м	0.0138	-1.5316	0.0267	-1.5135
26075, «Воейково», 72 м	0.0140	-1.4408	0.0272	-1.4138
31977 «Владивосток», 82 м	0.0135	-1.1817	0.0263	-1.1530
37055 Минеральные воды, 314 м	0.0140	-1.6893	0.0272	-1.7060
30715 Ангарск, 437 м	0.0141	-1.5961	0.0273	-1.5739
30935 Красный Чикой, 771 м	0.0141	-1.6199	0.0273	-1.6333
44231 Мурен, 1283 м	0.0148	-1.6538	0.0286	-1.6301

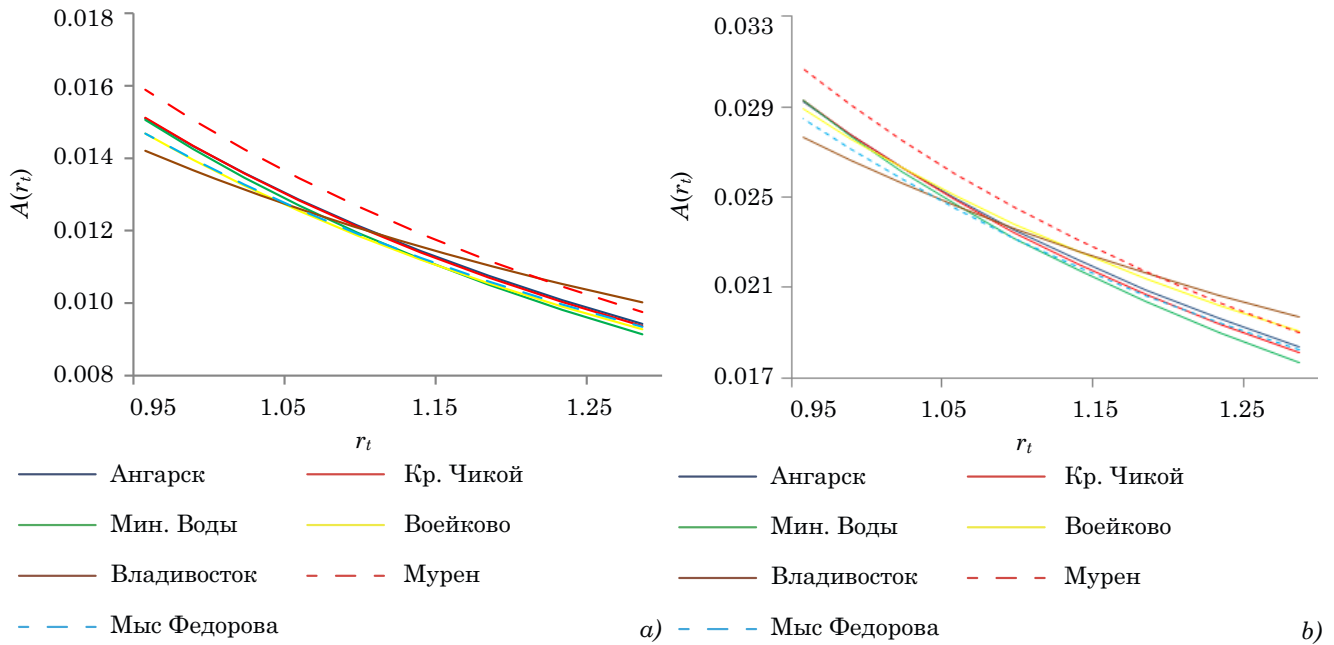


Рис. 9. Зависимость коэффициента A от r_t : а) для $\vartheta_1 = 20.7$ ГГц; б) для $\vartheta_2 = 31.4$ ГГц;

Из табл. 3 видно, что значения коэффициентов a имеют относительно небольшие различия. Коэффициенты b различаются в большей степени — до 10 % (СКО).

Кривые $A(\vartheta_1, \vartheta_2, r_t)$ вида (4) построены в соответствии с табл. 3 и представлены на рис. 9.

С учётом относительно небольшого разброса параметра $A(\vartheta, r_t)$ можно предложить «усреднённую» модель потерь в кислороде (Нп), которая имеет вид:

$$\begin{aligned} \tau_{O_2, \vartheta_1} &= 0.014 \cdot r_p^2 \cdot r_t^{1.28} \\ \tau_{O_2, \vartheta_2} &= 0.0272 \cdot r_p^2 \cdot r_t^{1.28} \end{aligned} \quad (6)$$

Программа расчёта параметров атмосферы по данным АЭС

ПО расчёта параметров атмосферы по данным АЭС включает модуль для сбора данных радиозондов и модуль, реализующий расчёт искомых параметров атмосферы. ПО реализовано в виде набора скриптов на языке Python 3.7.

Модуль сбора данных запрашивает необходимые данные из базы University of Wyoming (<http://weather.uwyo.edu>). Ответ загружается в виде html-страницы, содержащей сведения о станции и измерительные данные. Данные измерений представлены в виде таблицы, сведения о станции представлены в виде списка. Оба раздела заключены в отдельные тэги «PRE». Дата и момент времени запуска зонда размещены в тэге «H2». Модуль запрашивает данные измерений на интервале один месяц. Запрос данных реализуется с применением библиотеки «requests», для «парсинга» html-страницы используется библиотека «lxml». Извлечён-

ные данные сохраняются в табличном файле с расширением «.csv», в отдельном файле сохраняются значения осаждённой воды (мм). Процесс формирования файла достаточно трудоёмкий. Для примера, формирование выходного файла АЭС за период с 2019–01–01 по 2021–12–31 занимает порядка 15–20 мин и его объем составляет более 150 000 строк.

Модуль расчёта параметров тропосферы использует файл с зондовыми измерениями в качестве входных данных. В алгоритм расчёта заложена модель поглощения радиоволн в атмосферных газах (Liebe, 1989, Cimini et al., 2018). Расчёт искомых параметров проводится для частот каналов РВП. В результате формируется файл, содержащий следующие параметры для каждого момента времени запуска радиозонда (00:00 и 12:00 UT):

- температура, давление и влажность в приземном слое, °С, гПа, %;
- интегральное содержание водяного пара, г/см²,
- средняя температура тропосферы, взвешенная по влагосодержанию и поглощению, К;
- «сухая» и «влажностная» компоненты тропосферной задержки в зените, мм;
- погонное поглощение, обусловленное водяным паром и кислородом, Нп/км;
- поглощение в зените, обусловленное водяным паром и кислородом на уровне земли, Нп;
- радиояркая температура излучения атмосферы;
- температура атмосферы на высотах 0.5, 1, 5 и 10 км.

Пользователь имеет возможность произвольно задать частоту, для которой выполняется расчёт. Выходные данные представляют собой текстовый табличный файл с расширением «.csv». Файл содержит секцию с описанием аэрологической станции, перечнем расчётных параметров и секцию выходных данных. Файл за трехлетний период содержит более 2000 строк.

В модуле расчёта для манипуляций с данными используются библиотеки «numpy» и «pandas».

Среднее время скачивания и обработки годичной сессии данных радиозондирования составляет ~60 мин, а объем файла с результирующими данными за трехлетний период ~380–400 кБ.

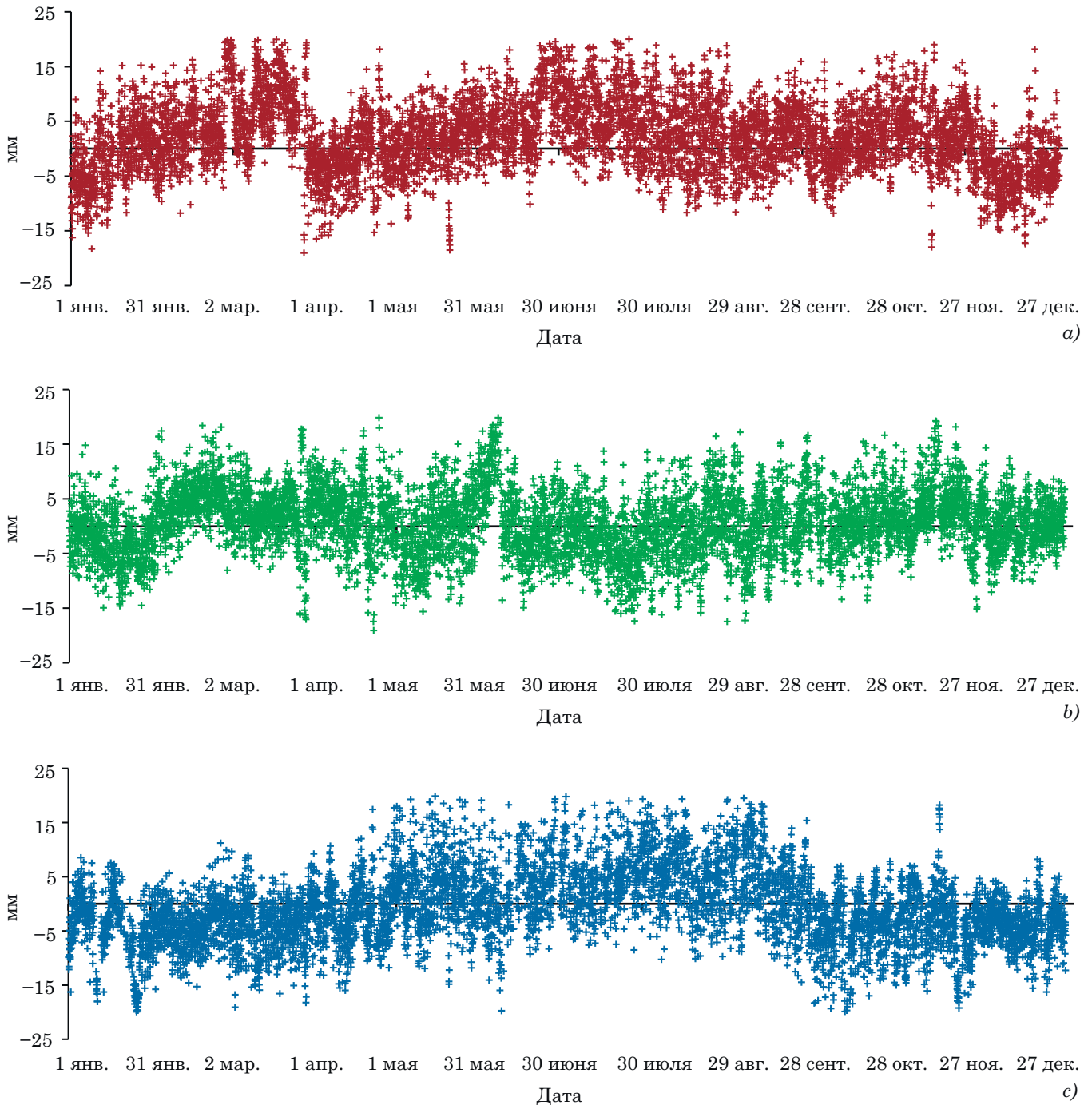


Рис. 10. Разность ВТЗ РВП и ГНСС в обсерваториях «Светлое», «Зеленчукская» и «Бадары» на интервале 2022 г.

Результаты

В соответствии с результатами данной работы в обсерваториях РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» были модернизированы алгоритмы расчёта ВТЗ по данным радиометрических измерений. На рис. 10 представлены разности значений ВТЗ РВП и ГНСС (IGS), осредненных на часовом интервале времени. Интервалы времени, приходящиеся на жидкие осадки, исключены (менее 11 %). Ряд ГНСС использовался в качестве опорного ряда. Данные о ТЗ, полученной средствами ГНСС, для обсерваторий скачивались с сайта IGS: ([NASA Earthdata](https://www.nasa.gov/data/Earthdata/)).

Сравнение данных РВП и ГНСС на интервале 2022 г. (в условиях отсутствия осадков), показало их хорошее согласие (рис. 10). Среднее значение и СКО разности ВТЗ РВП и ГНСС в обсерваториях «Светлое», «Зеленчукская» и «Бадары» составило: 2.1 ± 6.4 , 0.6 ± 5.8 и -0.9 ± 6.6 мм.

Выводы

Результаты обработки данных АЭС, полученные в соответствии с современной спектральной моделью поглощения радиосигнала в атмосферных газах, позволили уточнить параметры алгоритма расчёта ВТЗ по данным наземного радиометрического зондирования атмосферы. Данный подход обеспечил возможность более корректно учесть сезонные вариации параметров алгоритма, обусловленные особенностями климата места расположения РВП. Получено хорошее согласие радиометрических и ГНСС-измерений ВТЗ для условий обсерваторий РСДБ-комплекса «Квазар-КВО». Результаты расчетов будут применены в алгоритме вычисления ВТЗ РВП, создаваемого для Уссурийской астрофизической обсерватории ИПА РАН.

Литература

- Башаринов А. Е., Гурвич А. С., Егоров С. Т. Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974. С. 188.
- Горшков В. Л., Гришина А. С., Щербакова Н. В. Мониторинг влагосодержания в атмосфере над территорией Ленинградской и смежных областей с помощью ГНСС // Труды ИПА РАН. 2019. Вып. 49. С. 23–31.
- Жевакин С. А., Троицкий В. С., Цейтлин Н. М. Радиоизлучение атмосферы и исследование поглощения сантиметровых радиоволн // Изв. вузов. Радиофизика. 1958. Т. 1, № 2. С. 19–26.
- Ильин Г. Н. Экспериментальная оценка параметров алгоритма расчета влажностной тропосферной задержки и их влияние на точность расчета // Труды ИПА РАН. 2019. Вып. 50. С. 36–43.
- Ильин Г. Н., Троицкий А. В. Определение тропосферной задержки радиосигнала радиометрическим методом. Известия высших учебных заведений // Радиофизика. 2017. Т. 60, № 4. С. 326–335.
- Кузовлев В. В., Станкевич К. С. Об эффективной высоте поглощения радиоволн сантиметрового диапазона в атмосферном кислороде и водяном паре // Изв. ВУЗов Радиофизика. 1964. Т. 7, № 1. С. 175–176.
- Liebe H. J. MPM — An atmospheric millimeter wave propagation model // Int. J. Infrared Millimeter Waves, 1989. Vol. 10, no. 6. P. 631–650.
- Cimini D., Rosenkranz P. W., Tretyakov M. Y., et al. Uncertainty of atmospheric microwave absorption model: impact on ground-based radiometer simulations and retrievals // Atmos. Chem. Phys. 2018. Vol. 18. P. 15231–15259. Doi: 10.5194/acp-18-15231-2018.
- University of Wyoming, Department of Atmospheric Science [Электронный ресурс]. URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (дата обращения: 25.11.2022).
- NASA. Earthdata [Электронный ресурс]. URL: <https://cdsis.nasa.gov/archive/gnss/products/troposphere/zpd/> (дата обращения: 25.11.2022).