

## Анализ вариаций параметров радиометра водяного пара

© В. Ю. Быков<sup>1</sup>, М. В. Дугин<sup>2</sup>, Г. Н Ильин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>АО «НПФ «Микран», г. Томск, Россия

Проведена оценка стабильности основных параметров радиометров водяного пара (РВП), работающих в обсерваториях РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» на протяжении более 3.5 лет. Показано, что высокоточная стабилизация температурных режимов СВЧ-узлов обеспечивает сохранение метрологических характеристик РВП в условиях значительного (до 10 %) изменения коэффициента передачи радиометрических блоков (РБ) на интервале эксплуатации. Среднее значение компонент калибровочных констант РБ сохраняется постоянным в условиях стабильного температурного режима узлов РВП. По результатам вертикальных разрезов атмосферы измерена сезонная зависимость калибровочного сигнала от интегрального содержания водяного пара.

**Ключевые слова:** радиометр водяного пара, температура излучения атмосферы, тропосферная задержка, стабильность, влагосодержание.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.46.108-116>

### Введение

Постоянство метрологических характеристик РВП является ключевым требованием, предъявляемым потребителем к аппаратуре измерения радиояркой температуры излучения атмосферы (РЯТ). Сохранение уровня точности измерения РЯТ на длительном интервале времени (годы) обеспечивает стабильность точности расчета параметров тропосферы: в том числе интегрального содержания водяного пара (ИВС) на луче зрения антенны РВП и зависящей от него влажностной тропосферной задержки (ВТЗ) радиосигнала [1]. Стабильность метрологических характеристик обеспечивается тщательной отработкой конструкции и наличием высокоточных систем регулирования рабочей температуры узлов РВП [2, 3]. Основная метрологическая характеристика РВП — неопределенность измерения РЯТ, которая, в свою очередь, зависит от постоянства калибровочных сигналов  $T_k$  РБ на максимально возможном интервале времени. Особенностью РВП является использование в качестве калибровочного сложного сигнала, значение которого представляет сумму эквивалентной

температуры шума опорного генератора шума (термостатированной волноводной согласованной нагрузки) и температуры шума усилителя, приведенных к входу рупорно-линзовой антенны (РЛА) с учетом потерь во входном тракте РБ. Контроль значений  $T_k$  в течение времени эксплуатации РВП выполнялся на регулярной основе с использованием метода вертикальных разрезов атмосферы [4]. На интервале более трех лет накоплен большой объем экспериментальных данных о вариациях значений параметров РВП.

В работе анализируются результаты сезонных вариаций  $T_k$  в обсерваториях РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» и приводятся количественные оценки ряда основных параметров РВП: в том числе данные о стабильности температурных режимов основных узлов РВП, вариациях коэффициента усиления РБ, количественные оценки зависимости температуры шума РБ от рабочей температуры СВЧ приемного устройства и др.

Анализ на годовых интервалах времени динамики изменения параметров РВП представляет большой интерес для выявления ключевых факторов, влияющих на точность измерений РЯТ, и выработки технических решений по совершенствованию конструкции РВП.

### Температурный режим узлов РВП

В конструкцию РВП заложены меры, обеспечивающие заданный и постоянно контролируемый тепловой режим работы узлов РВП. В файл данных каждые 5 с регистрируется в том числе температура корпуса РЛА и СВЧ-узлов приемной системы РБ, температура воздуха внутри термоизолированного контейнера, в котором размещены РБ РВП.

Постоянная температура корпуса РЛА, а также температура внутри контейнера поддерживаются отдельными системами регулирования с точностью среднеквадратического отклонения (СКО) выше  $\sim 0.1$  °С. В табл. 1 приведен пример распределения температурных режимов узлов РВП, установленного в обсерватории «Бадары». Интервал оценивания — 365 сут.

Таблица 1

Обсерватория «Бадары». Температурный режим узлов РБ-канала А и канала Б в период с 01.12.2016 г. по 01.12.2017 г.

Узел/объект	Канал А		Канал Б	
	Температура, °С	СКО, °С	Температура, °С	СКО, °С
МШУ	35.043	0.014	35.042	0.014
$T_{A1}$	39.981	0.003	39.987	0.015
$T_{A2}$	44.970	0.004	44.988	0.017
РЛА	37.630	0.060	37.550	0.050
	Температура, °С		СКО, °С	
Контейнер	33.97		0.05	
Окружающая среда (среднее значение, СКО)	2.2		13.4	

Значения температуры узлов могут отличаться в зависимости от образца, что вызвано климатическими условиями пункта размещения.

На интервале эксплуатации радиометрических комплексов рабочая температура СВЧ-узлов РБ (малощумящего усилителя (МШУ) и переключателя) —  $T_{\text{по}}$ , опорных нагрузок —  $T_{A1}$ ,  $T_{A2}$  — поддерживалась на постоянном уровне с точностью СКО не ниже  $0.02^\circ\text{C}$  (рис. 1). При этом не выявлено деградации характеристик датчиков температуры. Проводимые на испытательном стенде периодические измерения абсолютных значений температуры, регистрируемой контрольным датчиком температуры, не выявили значимых изменений показаний за трехлетний период.

### **Вариации параметров радиометрических блоков**

Известно, что коэффициент усиления и шумовая температура современных транзисторных усилителей отличаются высокой чувствительностью к изменению рабочей температуры. При этом рост рабочей температуры приводит к снижению коэффициента усиления и увеличению эффективной температуры шума МШУ. Экспериментально установлено, что шумовая температура СВЧ усилителей на транзисторе с высокой подвижностью электронов (HEMT-транзисторе, *High Electron Mobility Transistor*) возрастает по близкому к линейному закону при увеличении физической температуры транзистора  $T_0$  от 80 К до 300 К [5].

При соблюдении постоянства температурного режима и питающих токов и напряжений СВЧ-транзисторов шумовая температура МШУ остается постоянной на интервале времени. Данное свойство СВЧ усилительных устройств используется в микроволновой радиометрии, в том числе для создания опорных нагрузок («активных холодных нагрузок») с известными параметрами, применяемыми для калибровки радиометров [6, 7].

Оценка температурной зависимости параметров СВЧ-конверторов каналов А и Б РВП, проведенная с помощью стандартного измерителя коэффициента шума, показала, что шумовая температура конвертора возрастает с увеличением рабочей температуры со скоростью  $\sim 0.6 \text{ K}/^\circ\text{C}$  и  $\sim 0.7 \text{ K}/^\circ\text{C}$  в каналах А и Б соответственно.

Аналогичные измерения проводились в обсерватории «Светлое» 16 марта 2018 г. в условиях безоблачной атмосферы. На интервале измерений ( $\sim 2$  ч), изменение РЯТ в канале А и Б составило 0.1 К и  $-0.3$  К. Оценивалось изменение значения калибровочного сигнала  $T_k$  в каналах РВП при увеличении температуры МШУ с  $T_{\text{МШУ}}^1=30^\circ\text{C}$  до  $T_{\text{МШУ}}^2=35^\circ\text{C}$ . Увеличение рабочей температуры МШУ на 5 К привело к увеличению значения РЯТ в канале А и Б на 2.1 К и 3.0 К. Данное изменение эквивалентно изменению  $T_k$  для канала А и Б на 3.2 К и 5.4 К соответственно. При этом увеличение рабочей температуры МШУ привело к уменьшению коэффициента передачи с соотношением  $\sim 1.0 \text{ } \%/^\circ\text{C}$  — в канале А и  $\sim 1.9 \text{ } \%/^\circ\text{C}$  — в канале Б. Калибровка методом вертикальных разрезов, проведенная при указанных температурах МШУ, показала увеличение

значения  $T_k$  в каналах А и Б  $T_k$  на 2.9 К и 5.3 К. Изменение значений  $T_k$  связано с увеличением на соответствующую величину шумовой температуры МШУ.

Долговременная стабильность шумовой температуры МШУ может контролироваться по сигналам внутренних опорных нагрузок, температура которых поддерживается постоянной на уровне  $t_c \approx 40$  °С и  $t_h \approx 45$  °С. Текущее значение шумовой температуры МШУ в каналах А и Б —  $T'_{пА}$  ( $T'_{пБ}$ ) — определяется отношением значений сигналов нагрузок, регистрируемых в файл данных  $\beta_A = V_4/V_5$  ( $\beta_B = V_6/V_7$ ), см. ниже. При указанных значениях температуры опорных нагрузок значение  $\beta$  в каналах РВП составляет  $\beta \sim 0.99$ . Постоянство значения  $\beta$  зависит от постоянства сигнала опорной нагрузки, параметров переключателя и от сигнала шума МШУ и находится на уровне  $\sim (2-4) \cdot 10^{-5}$  (СКО). На рис. 1 в качестве примера представлено изменение шумовой температуры МШУ в каналах А и Б на протяжении 2017 г. в обсерватории «Бадары». Сезонное увеличение  $T'_{пБ}$  связано, вероятно, с влиянием наружной температуры на параметры переключателя, т. к. показания датчика температуры МШУ остаются постоянными в пределах сотой доли градуса. Средние значения температур МШУ на интервале составляют для  $T'_{пА} = 100.2 \pm 0.7$  К и для  $T'_{пБ} = 172.7 \pm 1.9$  К.

Постоянство шумовой температуры МШУ в каналах А и Б также возможно контролировать методом разрезов. Результаты представлены в следующем разделе статьи.

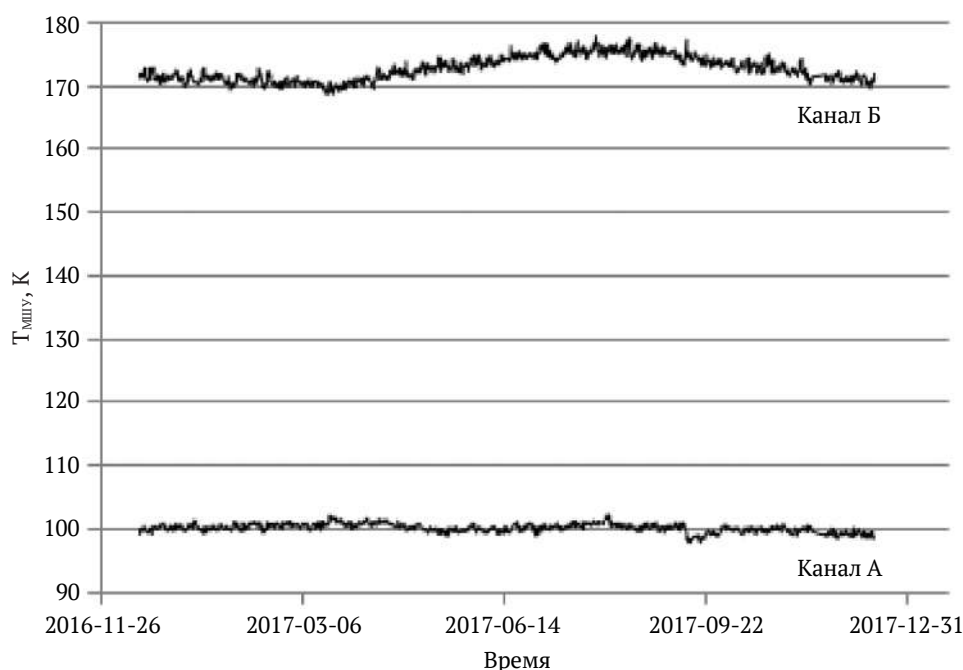


Рис. 1. «Бадары», изменение шумовой температуры МШУ на протяжении 2017 г.

Временные вариации коэффициента усиления РБ контролировались по сигналам опорных нагрузок  $V_4$  и  $V_6$ , представляющих суммарный шумовой сигнал опорной «холодной» нагрузки и МШУ. Следует отметить, что температурная стабилизация узлов РВП обеспечивает относительную стабильность коэффициента усиления в пределах  $\sim(0.5-1.5) \cdot 10^{-3}$  на небольших промежутках времени (2–3 сут.).

На более длительных интервалах времени (месяцы) проявляется значительный тренд данного параметра, связанный, по-видимому, с деградацией параметров электронных компонентов усилительного тракта РБ. В табл. 2 приведены значения сигналов  $V_4$ ,  $V_6$  образцов РВП, эксплуатируемых на протяжении более трех лет в обсерваториях РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» и относительные изменения значения коэффициента усиления на данном интервале времени. Из табл. 2 следует, что фактические изменения коэффициента передачи РБ зависят от образца и могут отличаться по знаку, достигая за время эксплуатации существенных значений — более 10 %.

Таблица 2

Динамика изменений сигнала опорного ГШ в каналах А и Б

Дата	01.01.15	01.01.16	01.01.17	01.01.18	%
«Бадары»					
$V_4$ , мВ	1085	1206	1245	1266	16.7
$V_6$ , мВ	1216	1179	1160	1156	-9.9
«Зеленчукская»					
$V_4$ , мВ	603	640	651	660	9.5
$V_6$ , мВ	1003	1002	1001.3	997	-0.6
«Светлое»					
$V_4$ , мВ	1145	1157	1158	1157	1.0
$V_6$ , мВ	715	729	732	724	2.4

### Оценка текущих значений калибровочных сигналов методом разрезов

Оценка текущих значений калибровочных сигналов РВП проводилась на регулярной основе методом разрезов [4] и позволила оценить по результатам измерений зависимость калибровочных сигналов  $T_k$  от величины ИВС  $Q$ , г/см<sup>2</sup>.

Результаты измерений показали превышение «летних» значений калибровочного сигнала над «зимними». Различие сезонных значений  $T_k$  может достигать единиц градусов. Характер зависимостей  $T_k(Q)$  различается для образцов РВП и обусловлен условиями пункта размещения оборудования и, возможно, конструктивными особенностями РВП. В табл. 3 приведены регрессионные уравнения, отражающие зависимость  $T_k(Q)$ . Данные получены по результатам измерений на интервале 2017–2018 гг. Погрешность (СКО) расчета  $T_k$  (и шумовой температуры МШУ соответственно) при этом не превосходит 1 К.

Таблица 3

Зависимость калибровочных сигналов от ИВС  $Q$ , г/см<sup>2</sup>

	$T_k(Q), K$
«Бадары»	
Канал А	$2.01 \cdot Q + 454.2$
Канал Б	$2.59 \cdot Q + 577.4$
«Зеленчукская»	
Канал А	$-0.02 \cdot Q + 457.0$
Канал Б	$0.42 \cdot Q + 570.8$
«Светлое»	
Канал А	$1.1 \cdot Q + 448.0$
Канал Б	$3.2 \cdot Q + 549.8$

«Зимние» значения калибровочных сигналов (при  $Q=0$ ) представляются наиболее точными и их следует использовать для расчета РЯТ излучения атмосферы.

### Оценка параметров входного тракта РВП

Для количественной оценки вклада входного СВЧ-тракта РВП в значение  $T_k$  целесообразно оценить суммарные потери входного тракта. Входной тракт радиометрического канала РВП состоит из РЛА, гермоввода с волноводным теплоразвязывающим элементом на входе в корпус РБ и плеча ферритового волноводного переключателя (ВП) с потерями  $\varepsilon$ . Потери во входном тракте оценивались с использованием модели, основанной на схеме СВЧ-тракта радиометрического канала РВП (рис. 2) [2, 8]. В расчетах полагалось, что параметры СВЧ переключателей ВП1 и ВП2 идентичны и в линиях передачи сигнала обеспечен режим согласования.

С учетом близости реальных значений температуры узлов входного тракта (табл. 1) примем температуру входного тракта, характеризуемую потерями  $\varepsilon_{вх}$ , равной температуре МШУ и СВЧ переключателя  $T_{по}$ .

Суммарные потери во входном тракте  $\varepsilon_{вх}$  представим в виде (рис. 2):

$$\varepsilon_{вх} = \varepsilon + \varepsilon_0, \quad (1)$$

$\varepsilon_0$  – потери в рупорно-линзовой антенне и СВЧ-тракте до входа ВП № 1,  $\varepsilon$  – прямые потери в ВП № 1 и ВП № 2.

Характерные значения  $\varepsilon$  и  $L_l$  ( $L_l$  – величина, характеризующая обратные потери плеча ВП) принятые в модельных расчетах:  $-0.15$  дБ и  $-30$  дБ.

Способ оценки потерь входного тракта заключается в сравнении измеренных методом разрезов и расчетных (на основании модели) значений температур шума СВЧ приемной системы. В расчетах также использовались измеренные РВП на момент проведения разреза значения РЯТ излучения атмосферы в каналах А и Б:  $T_{аА}$  и  $T_{аБ}$ , которые при ясной атмосфере составляют 15–20 К.

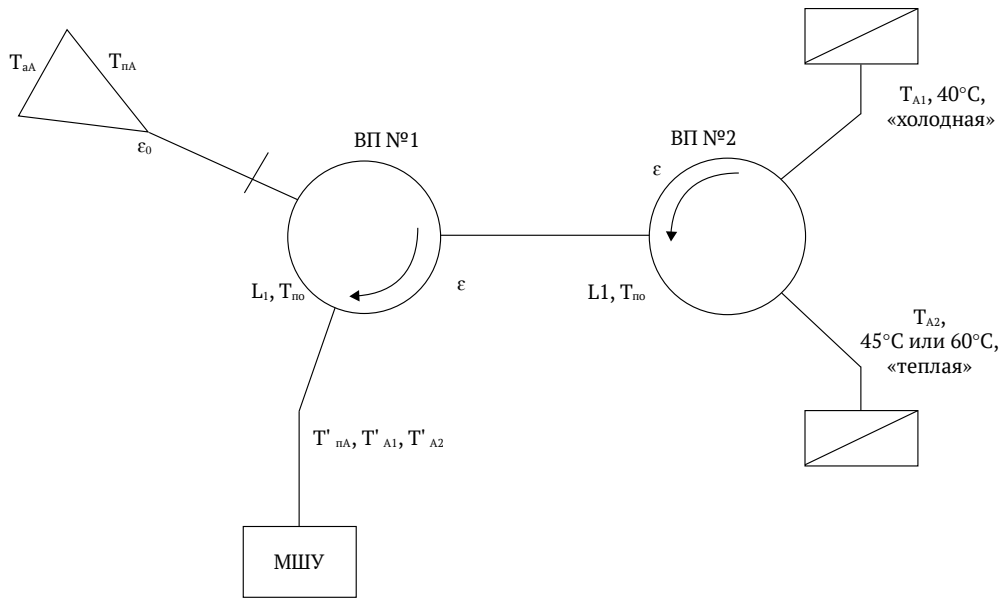


Рис. 2. Схема входного СВЧ тракта радиометрического блока А РВП

Оценим эффективную температуру сигналов волноводных нагрузок  $T'_{A1}$  и  $T'_{A2}$  на входе МШУ (при двух положениях ВП2) и положении СВЧ-переключателя ВП1 – «нагрузка», [8].

Сигнал «холодной» нагрузки  $T'_{A1}$  на входе МШУ может быть записан в следующем виде (индекс А соответствует каналу А):

$$T'_{A1} = T_{A1} \times \varepsilon^2 + T_{п0} \cdot (1 - \varepsilon^2) + T_{A2} \cdot L_1 \cdot \varepsilon + T_{aA} \cdot L_1 \cdot \varepsilon_0. \quad (2)$$

Аналогично для «теплой» нагрузки  $T'_{A2}$ :

$$T'_{A2} = T_{A2} \times \varepsilon^2 + T_{п0} \cdot (1 - \varepsilon^2) + T_{A1} \cdot L_1 \cdot \varepsilon + T_{aA} \cdot L_1 \cdot \varepsilon_0. \quad (3)$$

В файле данных РВП регистрируются соответствующие подключаемым нагрузкам сигналы  $V_4$ ,  $V_5$ :

$$\begin{aligned} V_4 &= \alpha \cdot (T'_{A1} + T'_{пА}) \\ V_5 &= \alpha \cdot (T'_{A2} + T'_{пА}). \end{aligned} \quad (4)$$

Из (4) получим выражение для температуры шума МШУ канала А на его входе и определим потери входного тракта  $\varepsilon_{вх}$ :

$$T'_{пА} = \frac{\beta \cdot T'_{A2} - T'_{A1}}{1 - \beta}, \quad (5)$$

где  $\beta = V_4/V_5$

$$\varepsilon_{вх} = \frac{T'_{A1} + T'_{пА}}{T_k}. \quad (6)$$

В качестве примера измеренные и расчетные (помечены штрихом) значения величин для РВП обсерватории «Бадары» перечислены в табл. 4. Из (5) следует, что точность определения шумовой температуры приемника за-

висит от разности температур нагрузок. Увеличение температуры «теплой» нагрузки выше +60 °С ограничено возрастающей сложностью поддержания стабильности температурного режима РБ и по этой причине нецелесообразно.

Таблица 4

Обсерватория «Бадары». Параметры сигналов в канале А и канале Б

Параметр	$T_k$	$T_{пА}$	$T_{А1}$	$T_{А2}$	$T'_{пА}$	$T'_{А1}$	$T'_{кА}$	$\beta$	$\varepsilon_{вх}$ , дБ
Значение	454.5	142.5	313.1	333.1	100.3	313.1	413.4	0.98885	0.4

Параметр	$T_k$	$T_{пБ}$	$T_{Б1}$	$T_{Б2}$	$T'_{пБ}$	$T'_{Б1}$	$T'_{кБ}$	$\beta$	$\varepsilon_{вх}$ , дБ
Значение	577.2	264.1	313.1	318.1	172.8	313.1	486.0	0.9905	0,75

$T_k = T_{пА} + T_{А1}$  - среднее на момент оценивания (июнь 2018 г) значение калибровочного сигнала в канале А [4].

Погрешность значений расчетных параметров, учитывая простоту модели и принятые допущения, находится в пределах 10 %.

Наличие относительно больших потерь во входном тракте и, следовательно, их существенный вклад в калибровочный сигнал накладывает жесткие требования на поддержание стабильности температурного режима узлов входного тракта (табл. 2). Особое внимание должно быть уделено тепловой развязке РЛА и узлов РВП от воздействия окружающей среды.

### Заключение

Проведенный анализ ключевых параметров РВП, влияющих на точность измерения РЯТ атмосферы, показал, что точность измерения РЯТ сохраняется на межповерочном интервале (2 года). Технические решения, заложенные в конструкцию РВП, обеспечили на интервале анализа постоянство значений составляющих  $T_k$ , связанных с потерями во входном тракте и шумами СВЧ-конверторов РБ. При этом значительный дрейф коэффициента усиления, проявившийся на интервале эксплуатации, не сказывается на качестве измерений и метрологических характеристиках РВП.

С помощью регулярно проводимых разрезов атмосферы выполнена оценка зависимости калибровочного сигнала от содержания водяного пара в атмосфере. Для корректного измерения РЯТ атмосферы необходимо использовать значения калибровочных сигналов, определенные при минимальных («зимних») значениях ИВС.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП/УНУ «Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО».



## Литература

1. Ильин Г. Н., Троицкий А. В. Определение тропосферной задержки радиосигнала радиометрическим методом // Известия высших учебных заведений. Радиофизика — Н. Н.: ННГУ, 2017. — Т. 60, № 4. — С. 326–335.
2. Ильин Г. Н., Быков В. Ю., Стэмпковский В. Г., Шишкин А. М. Высокостабильный двухканальный радиометр водяного пара для измерений тропосферной задержки в реальном времени // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2013. — Вып. 27. — С. 210–215.
3. Ильин Г. Н., Быков В. Ю. О стабильности характеристик радиометра водяного пара // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2016. — Вып. 36. — С. 47–50.
4. Ильин Г. Н. Калибровочные сигналы радиометра водяного пара // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2018. — Вып. 46. — С. 57–67.
5. Davisa R. J., Wilkinson A, et al. Design, development and verification of the 30 and 44 GHz front-end modules for the Planck Low Frequency Instrument // Journal of Instrumentation. — 2009. — Vol. 4. — P. 36. doi: 10.1088/1748-0221/4/12/T12002.
6. Frater R., Williams D. An active “cold” noise source // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — 1981. — Vol. 29. — P. 344–347.
7. Buhles P., Lardizabal S. Design and characterization of MMIC active cold loads // Radio Frequency Integrated Circuits Symposium Digest — Boston, MA. — 2000. — P. 221–225.
8. Быков В. Ю., Ильин Г. Н., Кайдановский М. Н. Аппаратура системы измерения электрических характеристик тропосферы // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2010. — Вып. 21. — С. 255–269.

## Analysis of Variations in the Parameters of Water Vapor Radiometer

V. Yu. Bykov, M. V. Dugin, G. N. Ilin

Stability of the main parameters is estimated for the water vapor radiometers (WVR) which have been operated in the “Quasar” network observatories for more than 3.5 years. It is shown that the high-precision stabilization of the microwave component temperature modes provides a way to preserve the metrological characteristics of the WVR with a significant (up to 10 %) change in the transmission coefficient of the radiometric blocks (RB) over an operational interval. The average values of the components of the RB calibration signal remain constant if the temperature modes of the WVR components are stable. The seasonal dependence of the calibration signal on the integral water vapor content is measured using the results of the vertical atmospheric “cuts” (“tip-curve” calibrations).

**Keywords:** water vapor radiometer (WVR), atmospheric brightness temperature, tropospheric delay, stability, water vapor content.