

Оценка устойчивости работы радиометра водяного пара с доработанным защитным экраном в условиях выпадения осадков

© В. Ю. Быков, Г. Н. Ильин, А. М. Шишикин

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Водяная плёнка на поверхности антенной системы радиометра водяного пара и особенно водные капли на теплоизоляционном экране, появляющиеся в условиях выпадения жидких осадков, приводят некорректным значениям измеряемых радиометром водяного пара (РВП) параметров тропосфера. Для минимизации воздействия осадков на результаты измерений в конструкции РВП предусмотрена система обдува. Практика эксплуатации РВП в обсерваториях РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» показала, что существующая система обдува требует существенной доработки, так как низкая интенсивность обдува приводит в ряде случаев к многочасовому затягиванию просыхания обдуваемых поверхностей и, как следствие, значительному временному интервалу регистрации некорректных данных после завершения периода осадков. Статистическая обработка данных показала, что потери вследствие длительного просыхания после завершения осадков составляют до половины потерь данных, вызванных осадками.

Существующая система обдува была переработана с целью концентрации воздушного потока на апертуре рупорно-линзовых облучателей, а также усиления потока применением более мощных вентиляторов. Разработана и изготовлена методом 3Д-печати специальная конструкция воздуховодов, реализующая поставленную задачу. Оценка эффективности работы системы обдува проведена на примере работы РВП в обсерватории «Зеленчукская». Оценка выполнялась методом сравнения результатов измерения влажностной тропосферной задержки радиометром и задержки, полученной по данным ГНСС, которые, как известно, инвариантны к выпадению осадков.

Разработанная система обдува показала высокую эффективность. С целью оценки эффективности работы системы обдува РВП обсерватории «Зеленчукская» проведено сопоставление имеющихся данных с аналогичными по длительности данными в период 2023–2024 гг., на протяжении которого наблюдались схожие метеоусловия. Расчёты показали уменьшение относительного времени просыхания с 1.5 до 0.6 %, а по потерям данных с 2.8 до 0.9 %. Более точная оценка эффективности системы обдува будет получена по завершении годового цикла её эксплуатации. Дальнейшее снижение потерь данных РВП в условиях осадков возможно при работе системы в комбинации со специализированным ПО обработки данных.

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

Для цитирования: В. Ю. Быков, Г. Н. Ильин, А. М. Шишикин. Оценка устойчивости работы радиометра водяного пара с доработанным защитным экраном в условиях выпадения осадков // Труды ИПА РАН. 2025. Вып. 72. С. 14–19.

<https://doi.org/10.32876/AppIAstron.72.14-19>

Evaluation of the Water Vapor Radiometer Stability with a Modified Protective Shield in Precipitation Conditions

V. U. Bykov, G. N. Ilin, A. M. Shishikin

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

Abstract

A water film on the surface of the water vapor radiometer antenna system and especially water droplets on the heat-insulating screen, which appear under conditions of liquid precipitation, lead to incorrect values of the tropospheric parameters measured by the WVR. To minimize the impact of precipitation on the measurement results, a blowing system is provided in the WVR design. The practice of operating the WVRs in the VLBI observatories of the Kvazar-KVO complex have shown that the existing blowing system requires significant revision, since low blowing intensity in some cases leads to many hours of delay in drying the blown surfaces and, as a consequence, a significant time interval for recording incorrect data after the end of the precipitation period. Statistical data processing has shown that losses due to prolonged drying after the end of precipitation account for up to half of the data losses caused by precipitation.

The existing blowing system was redesigned to concentrate the air flow on the aperture of the horn-lens feeds, as well as to enhance the flow by using more powerful fans. A special design of air ducts was developed and manufactured using 3D printing to implement the task. The efficiency of the blowing system was assessed using the example of the WVR operation at the Zelenchukskaya Observatory. The assessment was carried out by comparing the results of measuring the humidity tropospheric delay by a radiometer and the delay obtained from GNSS data, which are known to be invariant to precipitation.

The developed blowing system has shown high efficiency. In order to assess the efficiency of the Zelenchukskaya Observatory WVR blowing system, the available data were compared with similar data for the period 2023-2024, during which similar meteorological conditions were observed. Calculations showed a decrease in the relative drying time from 1.5 to 0.6%, and in data losses from 2.8 to 0.9%. A more accurate assessment of the blowing system efficiency will be obtained upon completion of its annual operation cycle. Further reduction in WVR data losses in precipitation conditions is possible when the system is operated in combination with specialized data processing software.

Keywords: radiometer, water vapor, precipitation, stability.

Contacts: Gennadii Ilin (igen@iaaras.ru).

For citation: Bykov V. U., Ilin G. N., Shishikin A. M. Evaluation of the water vapor radiometer stability with a modified protective shield in precipitation conditions // Transactions of IAA RAS. 2020. Vol. 72. P. 14–19.
<https://doi.org/10.32876/AppIAstron.72.14-19>

Введение

Известно, что основным недостатком радиометра водяного пара (РВП) ([Ильин, 2013](#)) является получение некорректных данных о параметрах атмосферы в условиях выпадения жидких осадков. Количественная оценка влияния водяных пленок, образующихся на элементах антенной системы (АС) РВП, представлена в работах ([Jacobson, 1986; Hogg 1983](#)). В них показано, что наиболее сильно

осадки сказываются при намокании защитной поверхности перед раскрытым рупорных антенн.

Для наглядности пример воздействия интенсивных осадков на радиояркостную температуру (РЯТ) принимаемого сигнала и влажностную тропосферную задержку (ВТЗ) РВП со штатной системой обдува передней панели контейнера приведен на рис. 1. На рис. 1 также приведены показания датчика осадков (ДО, у. е.).

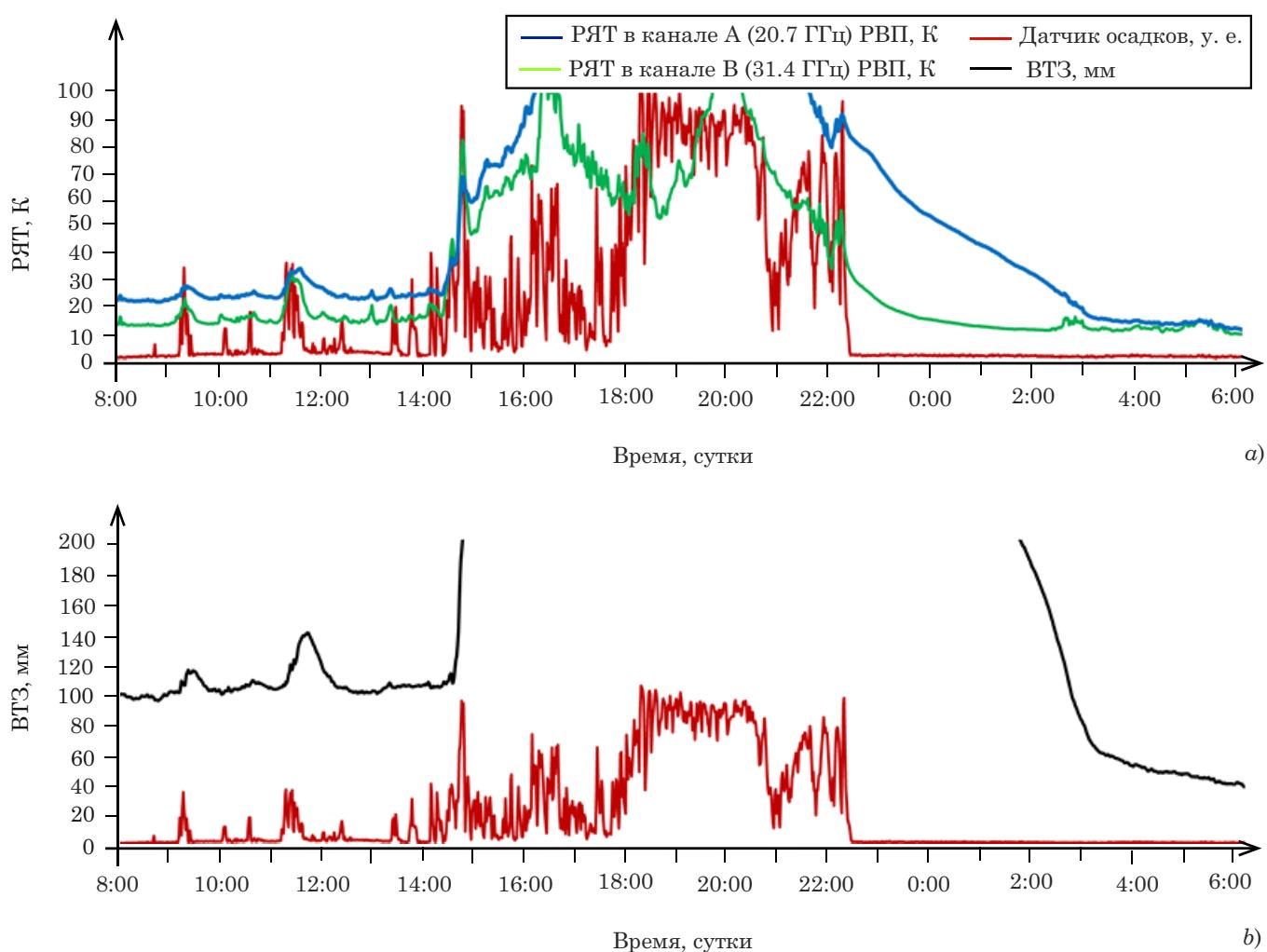


Рис. 1. РАО «Зеленчукская». Вариации РЯТ на интервале 16.11.2023–17.11.2023 гг.

Результаты оценок потерь данных в обсерваториях на годовом интервале

Таблица

Порог для ВТЗ, мм	«Светлое»		«Зеленчукская»		«Бадары»	
	Потери, $\Delta\text{ВТЗ} >$ порога	Просыхание	Потери, $\Delta\text{ВТЗ} >$ порога	Просыхание	Потери, $\Delta\text{ВТЗ} >$ порога	Просыхание
20	10.7	6.6	6.2	3.7	4.4	2.3
25	9.6	5.7	4.9	2.5	3.7	1.6

Из рис. 1 видно, как удлиняется после окончания осадков интервал некорректного измерения ВТЗ (чёрная кривая внизу) вследствие медленного (~ 4.5 ч) и неравномерного по времени высыхания капель на апертуре рупоров РВП.

Единственным способом частичного купирования негативного проявления данного эффекта является разработка мощной (в пределах возможностей) системы обдува поверхности теплозащитного экрана, укрывающего элементы АС РВП. Дополнительно может использоваться подогрев воздушного потока, гидрофобное покрытие теплозащитного экрана. Указанный подход является стандартным решением для приборов, расположенных на открытом воздухе и применяется, например, в серийных изделиях компании RPG Radiometer physics GmbH серии LWP-G5 ([Radiometer physics](#)) и в других аналогичных приборах. В ряде случаев приборы располагают в закрытом помещении под углом к горизонту ($\sim 40^\circ$) ([Wang 2023](#)).

Штатные радиометры РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» также имеют систему обдува теплозащитного экрана, установленного перед рупорными облучателями радиометрических блоков. Практика показала, что существующая схема обдува нуждается в доработке. Анализ данных РВП на интервале декабрь 2023 г. — декабрь 2024 г. в обсерваториях РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» показал, что относительные потери данных (%), связанные со временем испарения водяных капель («Просыхание» после завершения осадков) на поверхностях зеркала и теплозащитного экрана, составляет около половины интервала потерь данных, связанных с выпадением осадков. Количественная оценка таких потерь по обсерваториям РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» приведена в таблице. Оценка потерь данных зависит от установленного порогового значения, определяющего достоверность результатов измерений РВП. Измерения РВП будем считать достоверными, если абсолютное значение разности ВТЗ РВП и опорного ряда ($\Delta\text{ВТЗ}$, мм) не превышает 20–25 мм. В качестве опорного ряда использован ряд значений ВТЗ международной службы IGS ([CDDIS](#)).

В представленной работе рассмотрен результат совершенствования системы обдува передней

панели РВП обсерватории «Зеленчукская». Обновлённая система обдува РВП была установлена 14 ноября 2024 г. В работе представлена оценка работы системы обдува на интервале с 14.11.2024 по 11.03.2025 г. (118 сут) и её влияние на достоверность данных РВП (на обозначенном интервале) в периоды выпадения осадков.

Усовершенствованная система обдува

Эксплуатируемые в обсерваториях РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» РВП оснащены вентилятором, обдувающим в направлении сверху вниз поверхность теплозащитного экрана, при этом более интенсивно обдувается поверхность перед коротковолновой рупорно-линзовой антенной (РЛА), менее интенсивно обдувается длинноволновая РЛА поскольку она расположена под коротковолновой РЛА. Недостаточная интенсивность воздушного потока приводила к существенной потере данных после окончания осадков.

Были выработаны три подхода для улучшения ситуации:

- усиление потока воздуха, обдувающего переднюю панель РВП;
- создание ламинарной воздушной струи;
- концентрация воздушного потока непосредственно на апертуре рупорно-линзовых антенн (РЛА).

Усиление потока воздуха достигается применением более мощных вентиляторов и применением воздуховодов с наименьшими возможными потерями. И то и другое ограничено в размерах, т. к. должно быть размещено под существующим кожухом РВП. На всём протяжении воздушного потока, от вентилятора до передней панели, воздуховоды должны быть без резких скачков сечения воздуховода с целью обеспечения ламинарного течения воздушного потока и снижения скорости потока. Выход воздуховода на переднюю панель должен быть дефлекторного типа, со скруглением, для устранения турбулентных завихрений.

Воздуховоды должны быть сконструированы так, чтобы довести воздушный поток непосредственно до апертур РЛА, расположенных друг над другом (РЛА диапазона 31.4 ГГц расположена вверху, РЛА диапазона 20.7 ГГц — внизу). Таким образом, созданный воздушный поток будет обду-

вать только «активную зону» апертур РЛА, а не «распыляться» на всю переднюю панель. При этом следует иметь в виду, что конструкция воздуховодов не должна вносить значимых дополнительных потерь принимаемого сигнала и тем самым приводить к увеличению эквивалентной шумовой температуры (ЭШТ) радиометрических блоков РВП (более чем на 1–2 К).

Для решения поставленных задач наиболее соответствуют вентиляторы постоянного тока в центробежном конструктивном исполнении. Именно они при компактных размерах создают достаточно мощный воздушный поток и развивают давление воздуха, позволяющее им работать с системой воздуховодов с ненулевыми аэродинамическими потерями.

Предложенный подход к совершенствованию системы обдува реализован в виде воздуховодов, изготовленных методом 3Д-печати и устойчивым к воздействию окружающей среды.

Оценка работы модифицированной системы обдува РВП в обсерватории «Зеленчукская»

С момента установки прототипа модифицированной системы обдува передней панели термоизолированного контейнера РВП (14.11.2024) в обсерватории «Зеленчукская» по 11.03.2025 г. получены данные, позволяющие в первом приближении оценить результаты проведенной работы. На рис. 2 приведена кривая температуры воздуха, позволяющая определить тип осадков: дождь / снег. Средняя температура воздуха на интервале анализа составляла ~ 1 °C. На анализируемом отрезке времени наблюдались как ливневые осадки (дождь в районе 16 ноября и мокрый снег 27–28 ноября), так и периоды сухой погоды, отмеченные минимальными значениями датчика осадков ДО, В (рис. 3). На рис. 3 приведена кривая влажностной тропосферной задержки (ВТЗ), мм. Из рис. 3 следует, что осадки при отрицательной температуре (сухой снег) практически не вносят искажения в результаты оценки ВТЗ РВП.

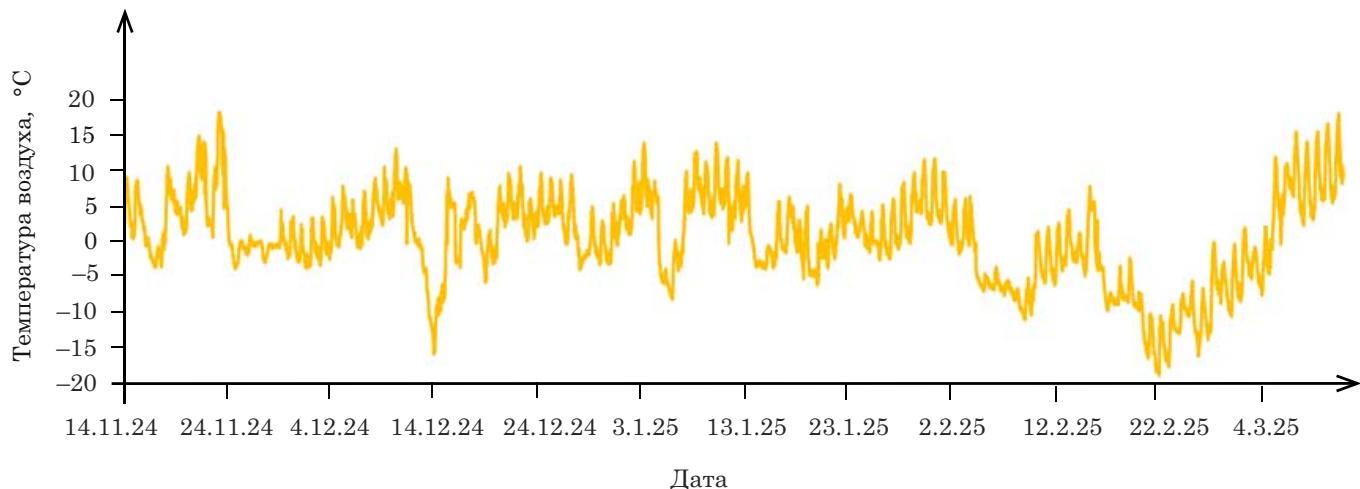


Рис. 2. РАО «Зеленчукская», температура воздуха

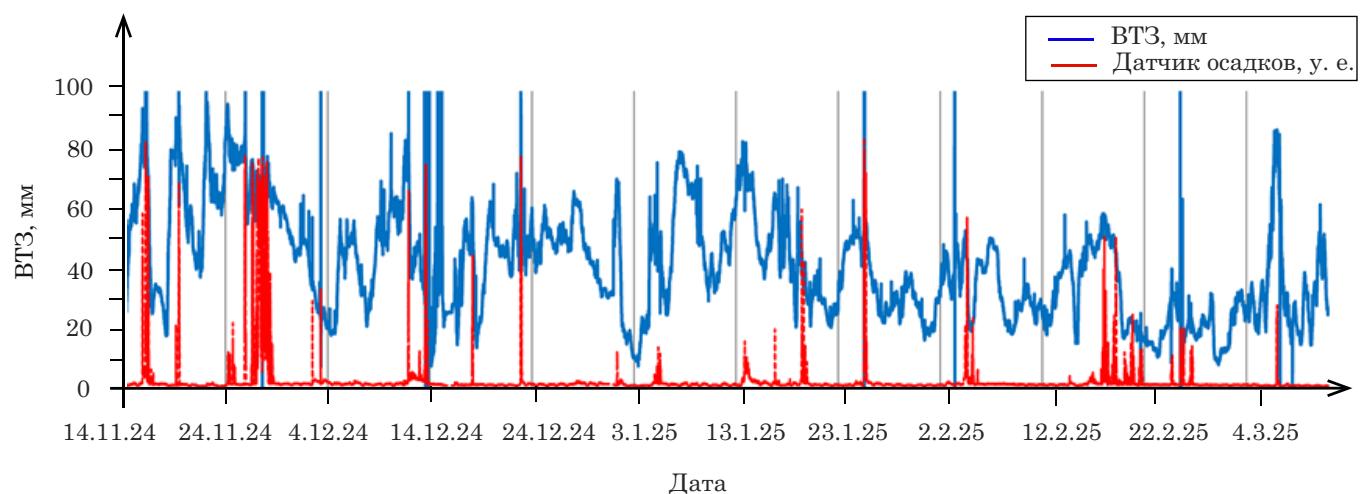


Рис. 3. РАО «Зеленчукская»

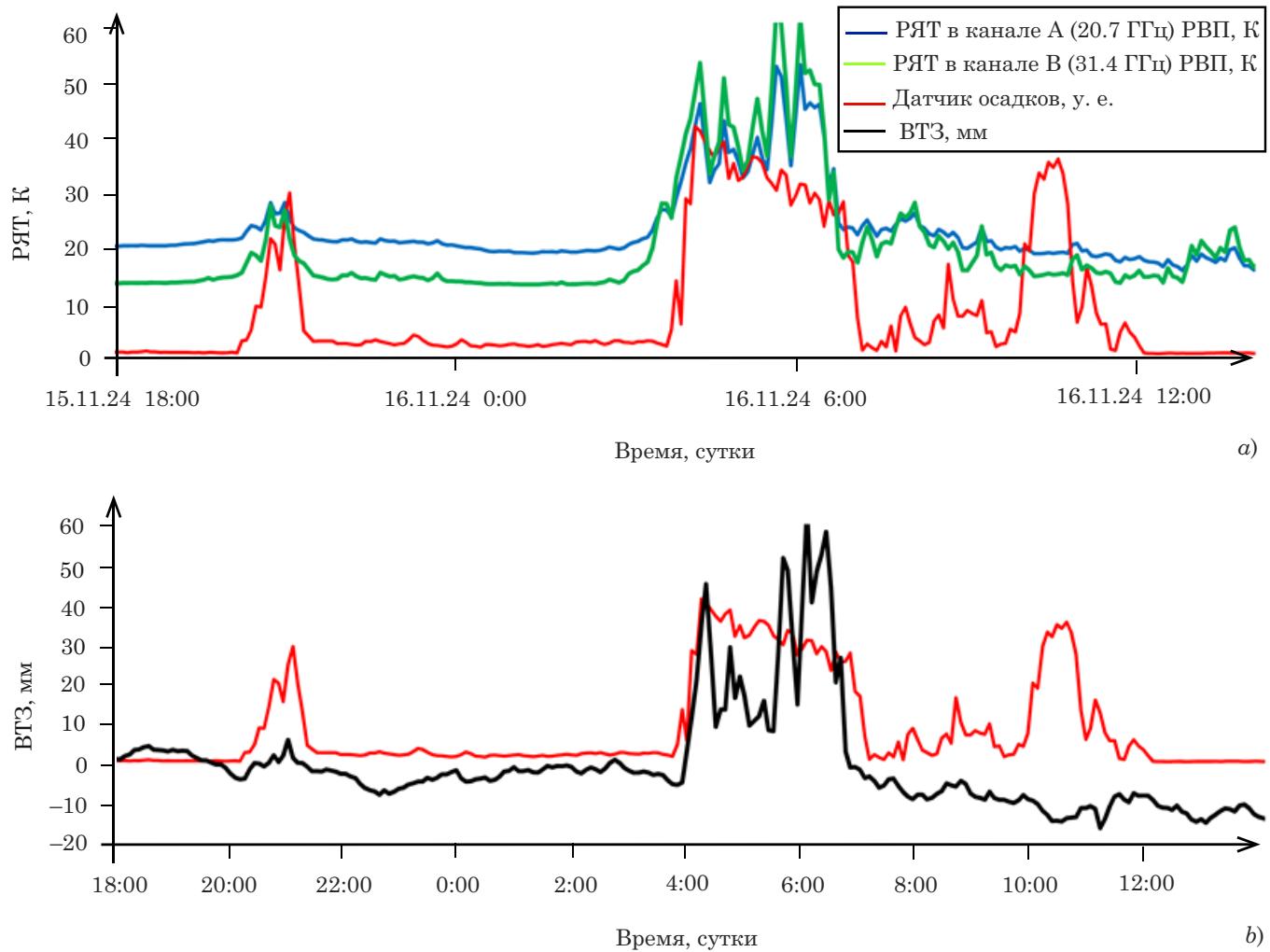


Рис. 4. РАО «Зеленчукская». Вариации показаний датчика осадков 15.11.2024–16.11.2024 гг.

Короткие узкие «выбросы» на кривой ВТЗ 18, 20 ноября и 01, 02, 03, 04 декабря 2024 г. и им подобные связаны с выполнением калибровки методом вертикальных разрезов атмосферы ([Нан, 2000](#)). Данные «выбросы» легко фильтруются и не влияют на оценку точности измерения ВТЗ.

Появление подобных выбросов может иметь иное происхождение — птица, артефакт и т. п.

Усовершенствованная система обдува значительно изменила характер вариаций РЯТ и ВТЗ в моменты выпадения жидкого осадка. На рис. 4 видно, что интервал искаженных осадками (дождь 16 ноября) результатов измерений ВТЗ сопоставим с интервалом выпадения осадков. Из рис. 4 также следует, что по окончании выпадения дождевых осадков не наблюдается длительного по времени затягивания процесса просыхания водяных капель на апертуре рупора канала А РВП, который приводил к увеличению интервала получения некорректных данных РВП (рис. 1).

Влияние осадков на результат измерения ВТЗ показан на рис. 4 (внизу), где приведена разность значений ВТЗ РВП и образцового ряда ВТЗ GPS международной службы IGS ([CDDIS](#)).

Из рис. 4 следует, что значения ВТЗ РВП приходят к корректным значениям сразу после прекращения дождевых осадков и искажение данных РВП происходит только при достаточно интенсивных осадках (на рис. 4 интервал с 04 до 07 ч 16.11.2024). Таким образом, работа по модификации системы обдува апертуры АС РВП дала положительный результат, практически обнулила время получения некорректных данных, обусловленных временем высыхания дождевых капель после окончания выпадения осадков.

С целью оценки эффективности работы системы обдува РВП было проведено сопоставление имеющихся данных с аналогичными по длительности данными в период 2023–2024 г., на протяжении которого наблюдались схожие метеоусловия. Расчеты показали уменьшение относительного времени просыхания с 1.5 до 0.6 %, а по потерям данных с 2.8 до 0.9 %. Более точная оценка эффективности системы обдува будет получена по завершении годового цикла её эксплуатации. Дальнейшее снижение потерь данных РВП в условиях осадков возможно при работе системы в комбинации со специализированным ПО обработки данных

([Ivanov, 2019](#)). Результаты такой работы предполагается рассмотреть в отдельной публикации.

Заключение

Выполнены работы по дооснащению действующих образцов РВП в обсерваториях РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» с целью повышения устойчивости работы в условиях выпадения осадков», в том числе:

- разработана конструкция воздуховодов для более эффективного обдува апертуры РЛА;
- элементы конструкции реализованы с применением технологии 3Д-печати;
- выполнен монтаж разработанной системы обдува в обсерваториях «Зеленчукская» и «Светлое»;
- анализ данных РВП показал высокую эффективность работы системы, выражющуюся в минимальном времени просыхания апертуры РЛА после окончания осадков.

Более точные количественные оценки эффективности работы системы обдува будут получены по мере накопления данных в весенне-летнем сезоне 2025 г.

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

Литература

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, 2013. Вып. 27. С. 210–215.

CDDIS [Электронный ресурс]. URL: <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/troposphere/zpd/2024/> (дата обращения: 19.12.24).

Hogg D. C., Guiraud F. O., Snider J. B., et al. A steerable dual-channel microwave radiometer for measurement of water vapor and liquid in the troposphere // *J. Appl. Meteorol.* 1983. Vol. 22, no. 5. P. 789–806.

Ivanov S. I., Ilin G. N. The method of fuzzy logic and data mining for monitoring troposphere parameters using ground-based radiometric complex. In: Intelligent Distributed Computing XIII. IDC 2019. ed. by Kotenko I., Badica C., Desnitsky V., El Baz D. Ivanovic M. Studies in Computational Intelligence. 2020, Springer. Vol. 868. P. 1081–114. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-32258-8_13.

Jacobson M. D., Hogg D. C., Snider J. B. Wet reflectors in millimeter-wave radiometry-experiment and theory // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1986. Vol. GE-24, no. 5.

Radiometer-physics [Электронный ресурс]. URL: https://www.radiometer-physics.de/download/PDF/Radiometers/LWP/RPG_MWR_LWP_TN_2023.pdf (дата обращения: 02.04.25).

Yong Han, Westwater E. R. Analysis and improvement of tipping calibration for ground-based microwave radiometers // *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*. 2000. Vol. 38, no. 3. P. 1260–1276. Doi: 10.1109/36.843018.

Wang W., Murk A., Sauvageat E., et al. An indoor microwave radiometer for measurement of tropospheric water // *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*. 2023. Vol. 61.