

### **Измерение временных флуктуаций яркостной температуры в резонансной области поглощения водяного пара 18-27 ГГц**

Д.П. Егоров, Б.Г. Кутуза

*АНО ВО «Российский Новый Университет» (РосНОУ), г. Москва, ул. Радио 22, e-mail: dobrix95@gmail.com*

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова (ИРЭ РАН), г. Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7. E-mail: kutuza@cplire.ru*

*Приведены результаты обработки СВЧ-радиометрических измерений флуктуаций радиоизлучения атмосферы. Разработан программный комплекс цифровой обработки сеансов измерений, выполненных с помощью многоканальных спектральных радиометров. Рассмотрена методика измерений, калибровки и обработки данных. Получены значения яркостных температур и структурных функций радиоизлучения при различной атмосферной облачности.*

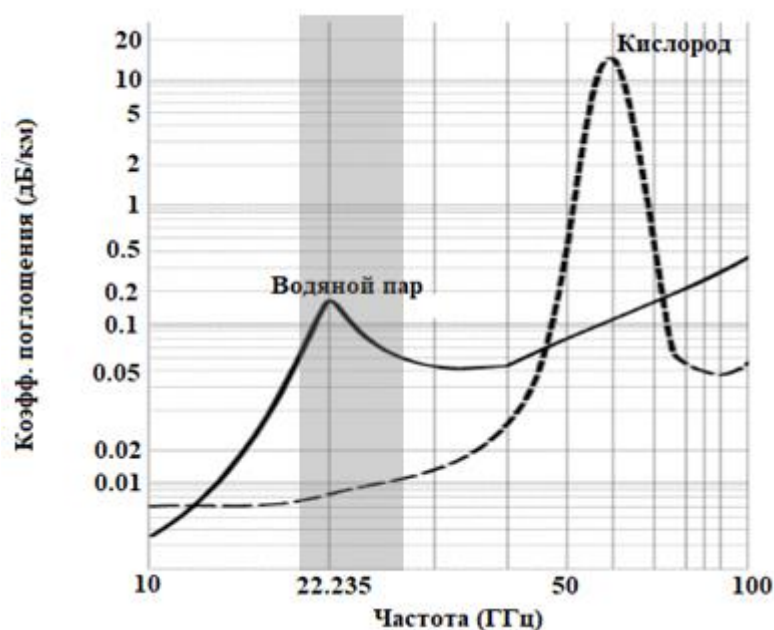
*Results of processing of microwave radiometric measurements of fluctuations in the radio emission of the atmosphere are presented. A software package for digital processing of measurement sessions performed with multichannel spectral radiometer is developed and shown. The methodology of measurement, calibration and data processing is considered. Values of brightness temperatures and structure functions of the radio emission for various atmospheric cloudiness are obtained.*

В докладе представлены результаты обработки многочастотных (от 6 до 47 частот) измерений нисходящего излучения атмосферы в резонансной области поглощения водяного пара (18-27 ГГц). Эксперимент проводился в наземных условиях с помощью специально оборудованных пунктов наблюдений, расположенных в Москве и в г. Фрязино Московской области. В качестве измерительной аппаратуры использовался многочастотный СВЧ-радиометрический комплекс, разработанный в СКБ ИРЭ под руководством С.Ю. Турыгина [4]. Ключевые параметры СВЧ-радиометра: спектральное разрешение – 200 МГц, флуктуационная чувствительность – 0.02 К/сек., типичное время получения спектра – 11 сек. (при измерениях по всем 47 частотам) [5]. Сеансы измерений в Москве были проведены Казаряном Р.А. [4]. Один сеанс измерений составлял от 12 до 24 часов. В течение некоторых сеансов проводилась калибровка радиометра. В качестве эталонов использовались излучение черного тела и яркостная температура безоблачного неба.

На базе платформы Qt (C++) разработан программный комплекс цифровой обработки полученных измерительных сеансов. Программное обеспечение позволяет: эффективно осуществить предварительную обработку данных; выполнить внешнюю калибровку значений яркостных температур рассматриваемых измерительных сеансов; получить исчерпывающие данные о погодных условиях на момент начала измерительного сеанса; построить график временного хода яркостных температур для любого множества частот, на которых проводились измерения; построить график квадратного корня из структурных функций яркостной температуры и, при необходимости, учесть собственные флуктуации радиометра при подсчете структурных функций. Дополнительно реализованы: возможность сортировки сеансов по различным каталогам, исходя из соответствующих значений выбранного метеорологического параметра; возможность выбора рассматриваемого временного интервала в рамках текущего сеанса; некоторые алгоритмы устранения явных выбросов и сглаживания; получение графиков изменчивости полной массы водяного пара и водозапаса облаков,

как интегральных метеопараметров. В докладе рассматриваются алгоритмы и структура программного комплекса.

На основании измерений наземных метеостанций, расположенных в Москве и Московской области, создана база данных (MySQL) погоды за 2013-2017 гг. Метеоданные регистрировались с интервалом в 3 часа. При выполнении внешней калибровки и для расчета коэффициентов поглощения водяного пара и кислорода в программе использовались такие метеохарактеристики, как температура, атмосферное давление и абсолютная влажность. Расчет коэффициентов поглощения производился в соответствии с теоретико-эмпирическими формулами, указанными в рекомендациях международного союза электросвязи ITU-R P.676 [3]. Соответствующая модель поглощения для случая стандартной атмосферы отражена на рис. 1. Здесь серым цветом выделена рассматриваемая область резонансного поглощения водяного пара.



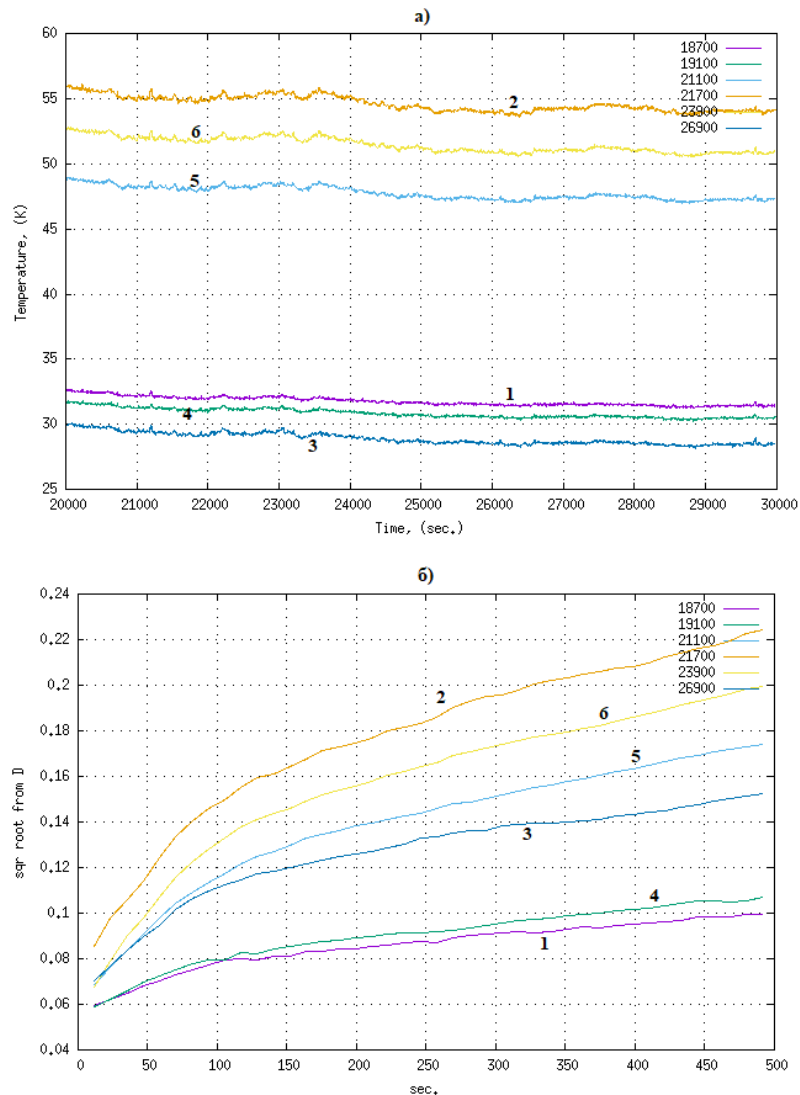
**Рис. 1. Зависимость погонного коэффициента поглощения от частоты (для стандартной атмосферы).**

Цифровая обработка данных позволила получить значения структурных функций яркостных температур в интервале частот от 18 до 27 ГГц в широком диапазоне временных интервалов от 3 до 200 секунд. Квадратный корень из структурной функции здесь выступает в качестве меры интенсивности пространственно-временных флуктуаций радиоизлучения атмосферы. Эти флуктуации возникают за счет пульсаций атмосферных метеопараметров, вызываемых тропосферной турбулентностью [1, 2].

По результатам непрерывных многочастотных измерений проведена классификация данных по различным категориям погодных условий. Это помогает получить более ясное представление о влиянии отдельных погодных параметров на характер и интенсивность флуктуаций радиояркостной температуры и поведение ее структурных функций. Результаты обработки измерений подтверждают, что при частотах, близких к резонансной частоте водяного пара, на поведение структурных функций оказывают довольно сильное влияние погодные условия, связанные с содержанием полной массы водяного пара и водозапаса облаков.

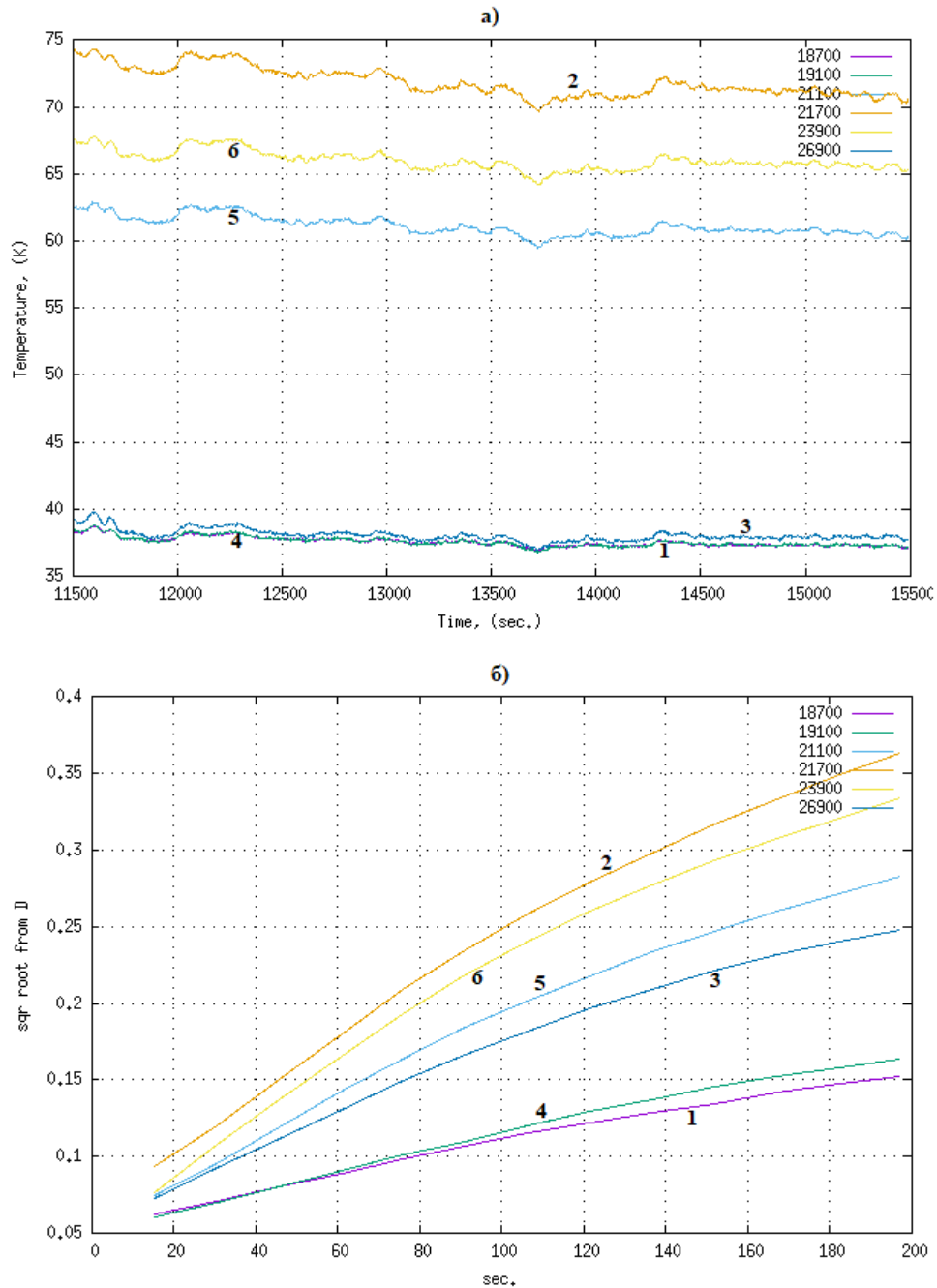
При безоблачной погоде временная изменчивость яркостной температуры и структурные функции на разных частотах соответствуют их положению относительно резонансной линии 22235 МГц (см. рис. 1). На рис. 2 представлены временной ход яркостных температур и соответствующие структурные функции для измерительного

сеанса от 07 июля 2016 г., Москва. Для обработки выбран участок от 23:57 до 02:44 следующего дня (безоблачная погода; средняя температура воздуха за период: 12.9°C). Цифрами (1) – (6) на графиках ниже обозначены кривые, соответствующие следующим длинам волн: (1)  $\lambda = 1.6\text{см}$  (18.7 ГГц); (2)  $\lambda = 1.38\text{см}$  (21.7 ГГц); (3)  $\lambda = 1.11\text{см}$  (26.9 ГГц); (4)  $\lambda = 1.57\text{см}$  (19.1 ГГц); (5)  $\lambda = 1.42\text{см}$  (21.1 ГГц); (6)  $\lambda = 1.26\text{см}$  (23.9 ГГц); (7)  $\lambda = 1.24\text{см}$  (24.1 ГГц).



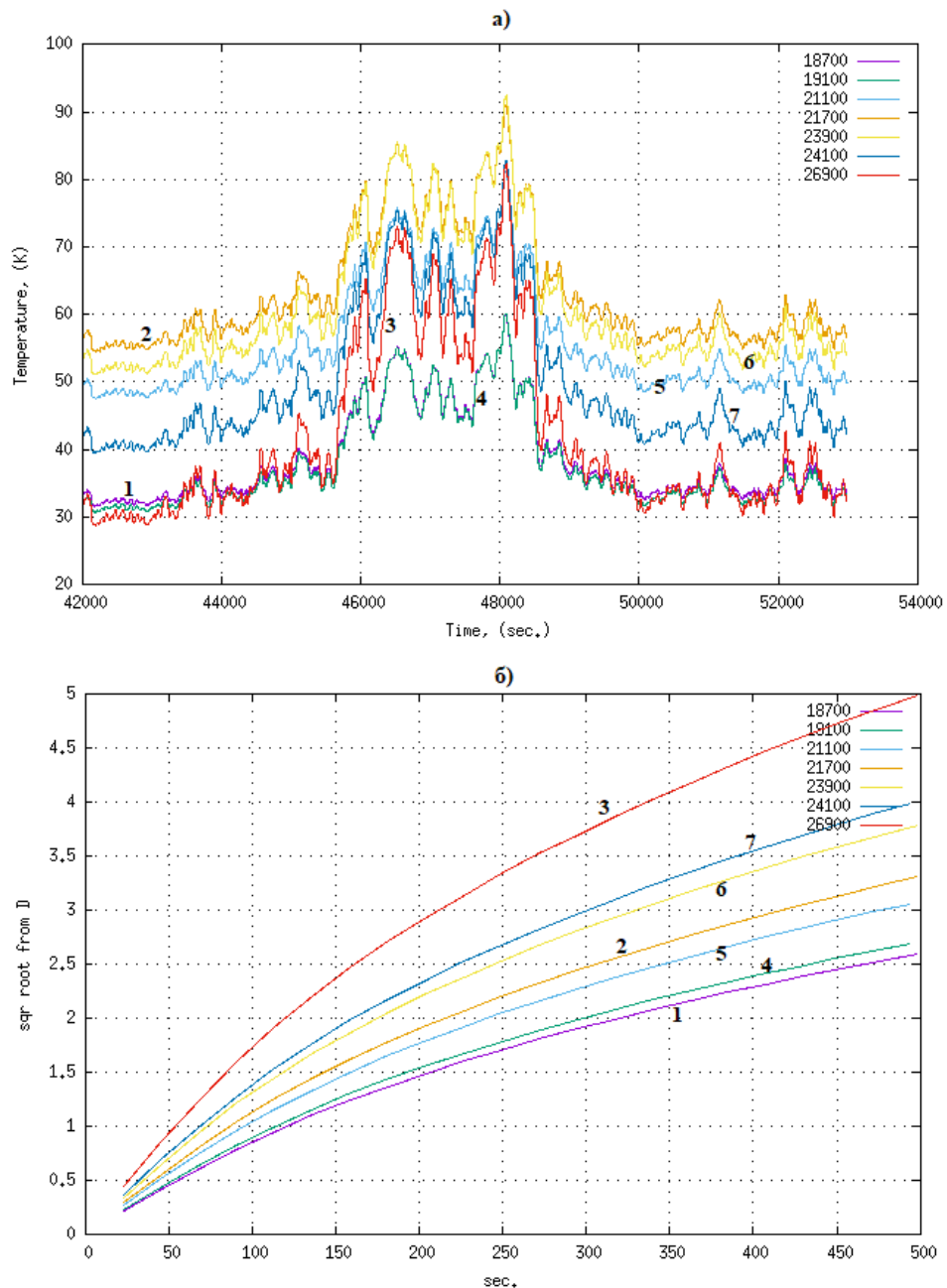
**Рис. 2. Безоблачная атмосфера.**  
**а) Временной ход яркостных температур**  
**б) Структурные функции**

В условиях слабой облачности интенсивность флуктуаций яркостной температуры увеличивается, но незначительно, поэтому структурные функции принимают немногим более высокие значения, но ведут себя в целом так же, как и в случае безоблачной погоды. Это можно видеть на рис. 3. Выбран участок от 17:25 до 18:32 сеанса от 21 июня 2016 г., Москва (температура воздуха: 28°C, относительная влажность: 44%, общая облачность: 50-60%).



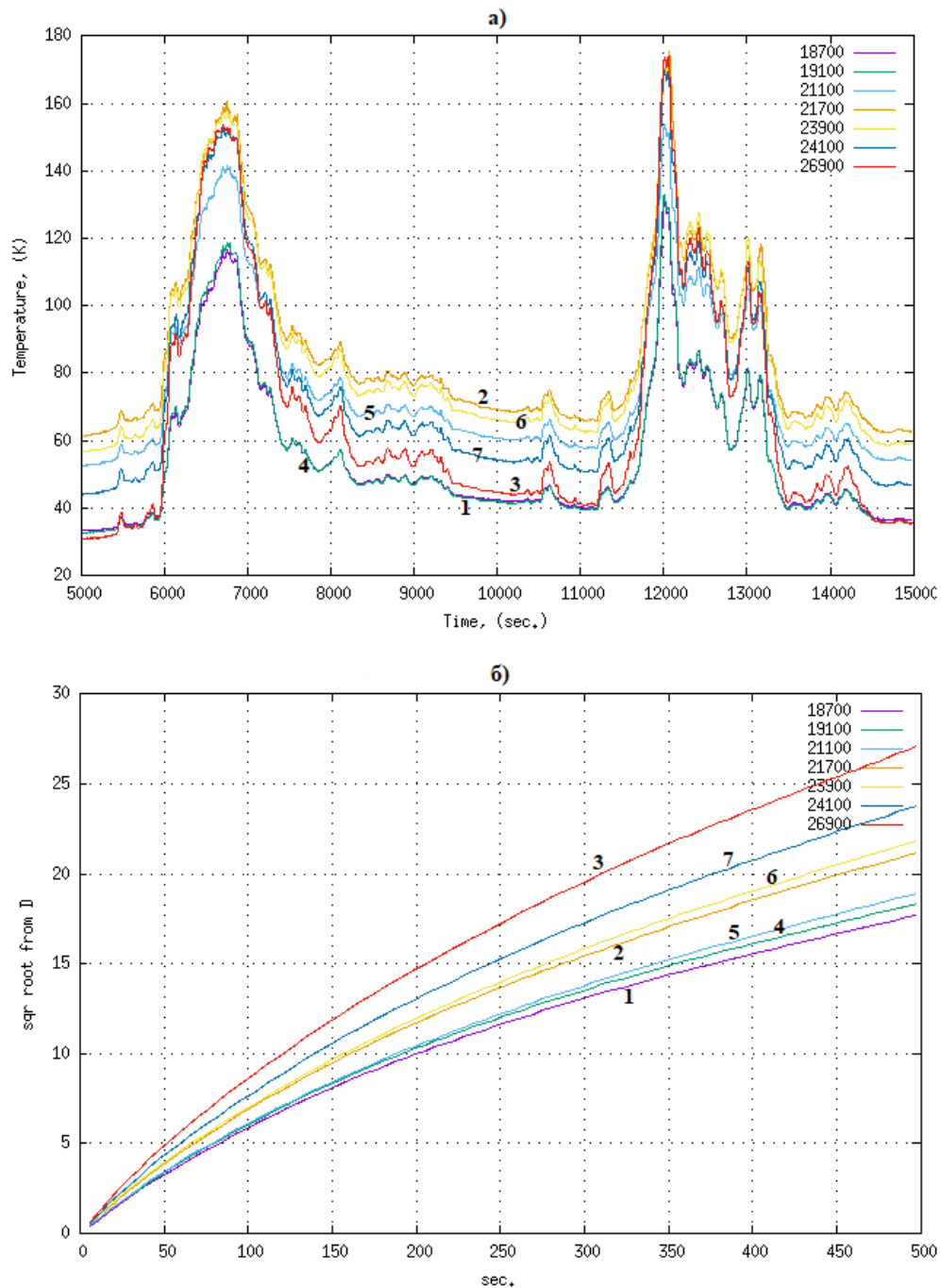
**Рис. 3. Слабая облачность.**  
**а) Временной ход яркостных температур**  
**б) Структурные функции**

При развитой облачности характер кривых значительно отличается (рис. 4 – участок от 06:04 до 09:07 измерительного сеанса от 08 июля 2016 г., Москва. Температура воздуха: 12.2°C, относительная влажность 91%, общая облачность 100%). Флуктуации яркостной температуры по сравнению с безоблачной погодой увеличиваются значительно. Поглощение и яркостная температура за счет жидких капель сильно возрастают. При этом вклад облаков увеличивается с ростом частоты, что приводит к увеличению яркостной температуры и смещению максимума структурной функции в сторону более высокой частоты 26.9 ГГц ( $\lambda = 1.11\text{см}$ ), кривая (3).



**Рис. 4. Сильная облачность.**  
**а) Временной ход яркостных температур**  
**б) Структурные функции**

Если в условиях сильной облачности начинается дождь (рис. 5 – участок от 19:47 до 22:34 сеанса от 07 июля 2016 г., Москва. Температура воздуха 14.5°C, относительная влажность 93%, общая облачность 100%, слабый ливневый дождь), то на графике временного хода яркостных температур можно наблюдать сильные всплески (максимальные флуктуации), а структурные функции обладают много большими значениями (~ в 6 раз) по сравнению с условиями сильной облачности в отсутствие осадков. Максимум  $\Delta T_{\gamma}$  по-прежнему смещен в сторону высокой частоты 26.9 ГГц.



**Рис. 5. Сильная облачность. Дождь.**  
**а) Временной ход яркостных температур**  
**б) Структурные функции**

### Заключение

Анализ результатов измерений флуктуаций радиоизлучения атмосферы в резонансной области водяного пара показал, что:

- С увеличением временного интервала наблюдается монотонный рост флуктуаций (квадратный корень из структурных функций) яркостной температуры вплоть до значений 200 сек. При этом наклон кривых уменьшается с ростом временного интервала, что подтверждает существующие положения.

- В безоблачной атмосфере максимальные значения квадратного корня из структурных функций наблюдаются на частоте близкой к частоте 22235 МГц и

уменьшаются по их удалению относительно резонансной частоты. Это подтверждает положение, что за флуктуации яркостной температуры ответственны флуктуации поля влажности, вызываемые тропосферной турбулентностью.

- При наличии развитой кучевой облачности происходит достаточно сильное увеличение интенсивности флуктуаций. Максимум смещается в сторону высокой частоты 27 ГГц. Это связано с тем, что поглощение и яркостная температура облачной атмосферы достаточно сильно увеличивается с ростом частоты.

### **Литература**

1. Кутуза Б.Г., Данилычев М.В., Яковлев О.И. – Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: ЛЕНАНД, 2016
2. Kutuza B.G. – Spatial and temporal fluctuations of the atmospheric microwave emission, Radio Science, vol. 38, #3, pp. 12-1 – 12-7, 2003
3. Rec. ITU-R P.676-3 / P.676-11 «Attenuation by atmospheric gases» – The ITU Radio-communication Assembly, 1997 / 2016
4. Данилычев М.В., Казарян Р.А., Калинин А.А., Кутуза Б.Г., Турыгин С.Ю. – Наземный СВЧ-радиометр для исследования атмосферы и обеспечения подспутниковых экспериментов //Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации: Материалы 9-ой Международной научно-технической конференции /НТОРЭС им. А.С. Попова, Суздаль, Россия, 2016. с.203-207.
5. Smirnov M.T., Savorsky V.P., Ermakov D.M., Kutuza B.G., Turygin S.Yu. – Spectral Variability of the Atmosphere Downwelling Radiation Measured by Microwave Radiometer-spectrometer in the Range of 18–27 GHz //2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium /Spring (PIERS), St Petersburg, Russia, 22–25 May 2017. pp. 872 – 875