

## **Влияние облаков на флуктуации радиоизлучения атмосферы в резонансной области водяного пара 18 – 27.2 ГГц**

Д.П. Егоров, Б.Г. Кутуза

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва*  
*[egorov.dp@ntcup.ru](mailto:egorov.dp@ntcup.ru), [kutuza@cplire.ru](mailto:kutuza@cplire.ru)*

*Представлены результаты обработки данных эксперимента по измерению яркостной температуры нисходящего излучения атмосферы вблизи линии резонансного поглощения водяного пара 22.235 ГГц. Эксперимент проведён при помощи специального 47-канального микроволнового радиометра-спектрометра. В работе рассмотрены наблюдения летнего периода 2018 – 2019 гг., в ходе которых атмосфера оставалась безоблачной, либо проявлялась кучевая облачность различного вертикального развития. Для оценки динамики флуктуаций яркостных температур используется аппарат структурных функций А.Н. Колмогорова. Спектры квадратного корня структурной функции при безоблачной атмосфере и кучевой облачности получены для широкого диапазона временных интервалов. Обсуждается двухчастотный метод расчёта интегральных параметров влагосодержания атмосферы. Приведены экспериментальные зависимости водозапаса облаков от значения квадратного корня структурной функции.*

*The results of processing new experimental data on brightness temperature of atmospheric downwelling radiation near the resonance absorption line of water vapor 22.235 GHz are presented. The experiment was carried out by means of special 47-channel microwave radiometer-spectrometer. In this article the observations of stable clear sky and also cumulus cloud cover of various vertical extent for summer 2018-2019 measurement periods are considered. Due to assess the dynamics of brightness temperature fluctuations, the apparatus of Kolmogorov's structural functions is used. Spectra of square root of structural function for wide range of temporal interval values under clear sky and cumulus cloud cover conditions are obtained. The two-frequency method of integral atmospheric moisture content evaluation is discussed. Experimental dependencies of cloud liquid water content on square root of structural function are shown.*

### **Введение**

Известно, что пространственно-временные флуктуации излучения атмосферы в микроволновой области спектра напрямую связаны с явлением тропосферной турбулентности, что является предметом особого внимания физики атмосферы, поскольку такая связь позволяет дистанционно оценить статистические характеристики этой турбулентности [1, 2]. Во многих областях флуктуации излучения, напротив, являются только мешающим фактором, как, например, в радиоастрономии. Их также необходимо учитывать при разработке навигационных систем и различных систем дистанционного зондирования. Диапазон частот 18 – 27 ГГц, в свою очередь, интересен тем, что эти частоты находятся вблизи достаточно мощного резонанса водяного пара, вращательной линии 22.235 ГГц, и могут быть использованы для получения характеристик атмосферной влажности. В совокупности с другими частотными диапазонами, в том числе, связанных с влиянием атмосферного кислорода, удаётся проводить полноценный мониторинг метеорологической обстановки, прогнозировать погоду, осадки и опасные метеоявления.

Первые экспериментальные исследования флуктуаций микроволнового излучения атмосферы были выполнены в 1976 г. на радиотелескопе РТ-22 для двух длин волн 0.8 и 1.35 см [3]. Измерения пространственных флуктуаций были в дальнейшем продолжены с помощью самолёта-лаборатории ИЛ-18, а временных – с наземных наблюдательных пунктов [4]. Полученные данные подтвердили, что флуктуации

поглощения атмосферы и её яркостной температуры вызваны изменчивостью полей влажности и скорости ветра. Новые данные удалось получить благодаря использованию современной аппаратуры [5] – многоканального радиометра-спектрометра (47 каналов в полосе 18 – 27.2 ГГц) с улучшенной флуктуационной чувствительностью и высокой температурной стабильностью коэффициента усиления. Такой радиометр позволяет проводить длительные (от 2 до 5 часов) сеансы непрерывных наблюдений. Появляется возможность расчёта структурных функций для больших временных интервалов и более детального исследования влияния изменчивости полей водяного пара и влажности на флуктуации радиоизлучения.

### Эксперимент

Наблюдения нисходящего излучения атмосферы в диапазоне 18 – 27.2 ГГц проводятся в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН с 2016 г., были начаты в московской части Института и продолжены с 2017 г. в его филиале в г. Фрязино Московской области. Радиометр-спектрометр [5] измеряет спектры яркостной температуры круглосуточно из окна лаборатории под углом  $51^\circ$  к направлению в зенит. Данные измерений записываются на дисковое пространство удалённого сервера. В качестве дополнительной информации с помощью 2.0-мегапиксельной камеры HI3516C производится видеофиксация текущих погодных условий. Две метеостанции Vantage Pro2, расположенные относительно радиометра-спектрометра на расстоянии порядка 300 м, с интервалом в 1 минуту регистрируют значения температуры воздуха, атмосферного давления, абсолютной влажности, скорости ветра и величины осадков (15м над уровнем Земли)[6]. Ниже приведена таблица основных характеристик радиометра-спектрометра (таблица 1).

**Таблица 1. Характеристики микроволнового радиометра-спектрометра.**

Рабочий диапазон частот	18 – 27.2 ГГц
Разрешение по частоте	200 МГц
Кол-во спектральных каналов	47
Флуктуационная чувствительность	0.02 К
Время получения полного спектра	около 11 сек.
Угловое разрешение	$5-7^\circ$

Угловое разрешение радиометра-спектрометра составляет от 5 до 7 градусов в зависимости от частоты. Как известно, характеристическая высота распределения водяного пара – 2.1 км. На данной высоте пространственное разрешение рассматриваемого радиометра составит от 183 до 256 метров. Таким образом, в предположении гипотезы Тейлора о «замороженной» турбулентности данный радиометр позволяет исследовать неоднородности, линейный размер которых как меньше, так и больше внешнего масштаба турбулентности.

### Структурные функции

Аппарат структурных функций был введён А.Н. Колмогоровым в 1941 г. для статического описания локально однородной и изотропной турбулентности в средах. В своей наиболее общей форме структурная функция – это средний квадрат модуля разности флуктуационных компонент некоторого поля в двух различных точках пространства. Применительно к атмосфере, имеет смысл рассматривать структурную функцию полей температуры воздуха, скорости ветра и др. Значение структурной функции, рассчитанной для двух взятых точек пространства, расположенных внутри инерционного интервала турбулентности, в таком случае, согласно закону «двух-третей» Колмогорова-Обухова, будет пропорционально расстоянию между ними (пространственному интервалу) в степени  $2/3$ . Для полей различных физических величин, однако, коэффициент пропорциональности будет различным. Аналог

структурной функции можно ввести и для показаний яркостной температуры  $T_b(\nu)$ , наблюдаемой на фиксированной частоте  $\nu$  [7]. Для этого перейдём от пространственных интервалов к временным, что можно сделать на основании гипотезы о «замороженной» турбулентности, предполагая, что скорость сноса отдельных неоднородностей много больше скорости изменения их формы. Пусть  $l$  – пространственный интервал, тогда исходя из гипотезы Тейлора  $l = u_h \cdot \tau$ , где  $u_h$  – горизонтальная компонента скорости ветра,  $\tau$  – временной интервал. Пусть также антенна радиометра занимает фиксированное положение в течение всего времени наблюдений, тогда структурную функцию яркостной температуры можно записать, как

$$D_{T_b}(\nu, \tau) = \langle |T_b(\nu, t + \tau) - T_b(\nu, t)|^2 \rangle, \quad (1)$$

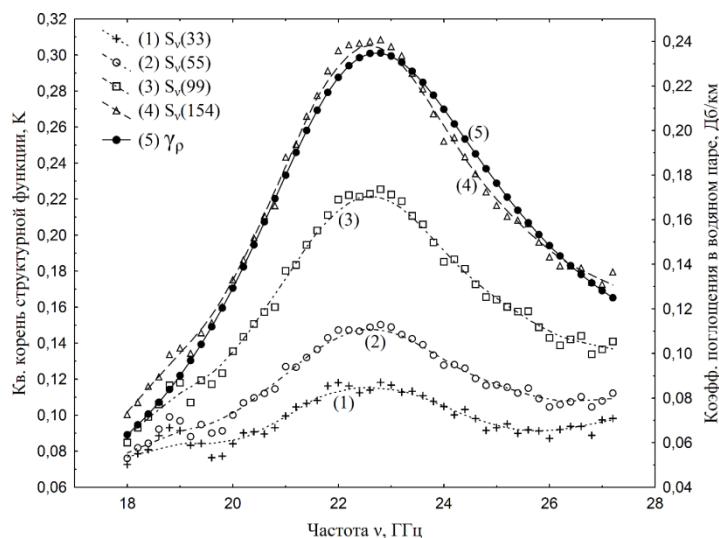
где  $\nu$  – частота излучения,  $l$  – пространственный интервал,  $\tau$  – временной интервал,  $T_b(\nu, t)$  – яркостная температура излучения частоты  $\nu$  в момент времени  $t$ .

Квадратный корень из структурной функции (1) обеспечит естественную меру интенсивности флуктуаций радиоизлучения [7]

$$S_\nu(\tau) = \sqrt{D_{T_b}(\nu, \tau)}. \quad (2)$$

### Безоблачная атмосфера

Рассмотрим сеанс измерений, в ходе которого сохранялась стабильная летняя безоблачная погода в отсутствие осадков. По данным яркостных температур за 23 августа 2019 г., 18:30 – 20:30 по Москве (измеренные в приземном слое атмосферы средняя температура воздуха  $T_0 = 19.65$  °С, атмосферное давление  $P_0 = 755.66$  мм.рт.ст., абсолютная влажность  $\rho_0 = 10.57$  г/м<sup>3</sup>), произведём расчёт значений квадратного корня структурных функций  $S_\nu(\tau)$  для временных интервалов  $\tau = 33, 55, 99, 154$  сек. (значения  $\tau$  кратны времени получения полного спектра 11 сек). На рис. 1 приведены частотные спектры  $S_\nu(\tau)$  (кривые 1–4) и, для сравнения, спектр погонного коэффициента поглощения в водяном паре  $\gamma_\rho$  (кривая 5). Коэффициент  $\gamma_\rho = \gamma_\rho(T_0, P_0, \rho_0)$  рассчитан в соответствии с рекомендациями МСЭ Р.676 [8].

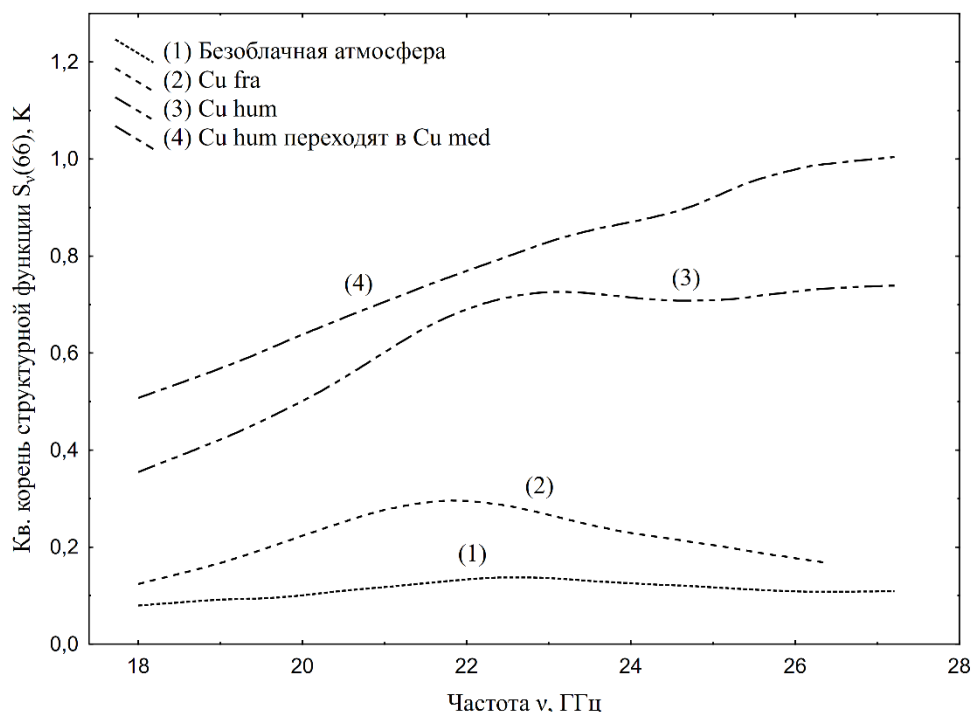


**Рис. 1. Спектры флуктуаций яркостной температуры на временных интервалах  $\tau = 33, 55, 99, 154$  сек. (шкала слева) и спектр погонного коэффициента поглощения в водяном паре  $\gamma_\rho$  (шкала справа). Сеанс от 23 августа 2019 г., ясное небо, 18 – 27.2 ГГц**

Из рис. 1 можно видеть, что значения  $S_\nu(\tau)$ , как и самой структурной функции, увеличиваются с ростом величины временного интервала  $\tau$ . Для любого  $\tau$  максимум  $S_\nu(\tau)$  наблюдается в диапазоне частот от 22 до 24 ГГц, т.е. вблизи резонанса водяного пара. С ростом или падением  $\nu$  относительно частоты резонансной линии значения  $S_\nu(\tau)$  заметно уменьшаются. Заметим, что спектральные кривые  $S_\nu(\tau)$  повторяют форму частотного спектра  $\gamma_\rho$ . Это подтверждает тот факт, что пространственно-временная изменчивость поля водяного пара ответственна за флуктуации радиоизлучения безоблачной атмосферы в миллиметровом диапазоне длин волн.

### Кучевая облачность

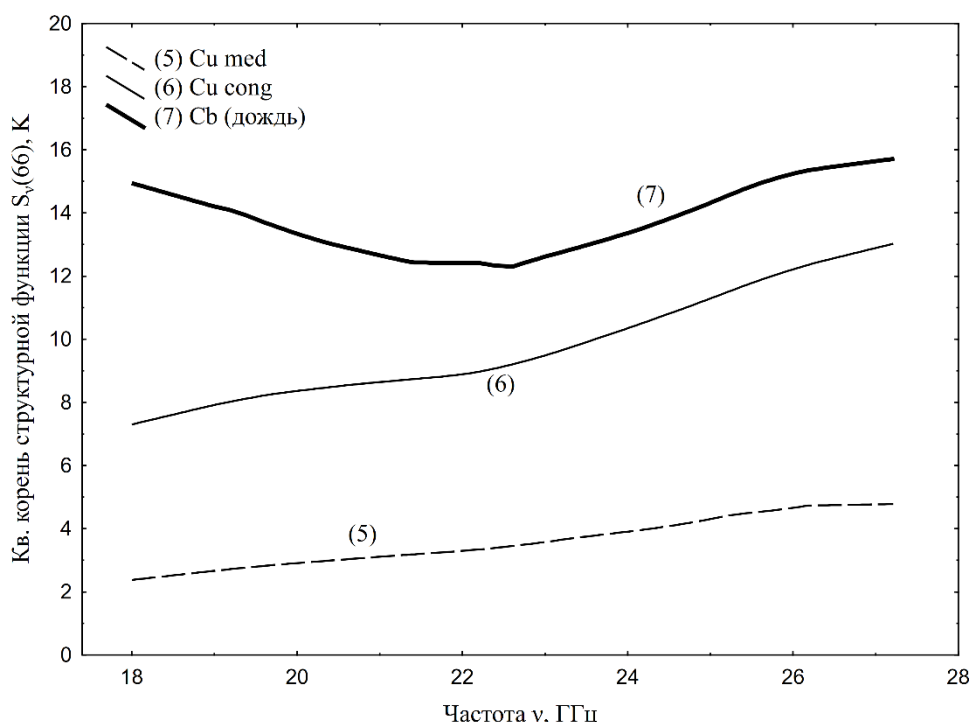
При наличии облачности наинтенсивность флуктуаций яркостной температуры оказывает влияние не только водяной пар, но и содержание в облаках воды в её жидко-капельной фазе [9]. Поскольку природа поглощения в водяном паре и мелких каплях воды сильно различна, постольку спектры как самой яркостной температуры, так и её структурных функций претерпевают значительные изменения (относительно случая безоблачной атмосферы). Наибольший интерес здесь представляют облака вертикального развития или кучевые облака, в которых присутствуют мощные потоки воздушных масс [10, 11]. На рис. 2, 3 приведены частотные спектры квадратного корня структурной функции  $S_\nu(\tau)$  (кривые 1–7) для временного интервала  $\tau = 66$  сек., рассчитанные по данным измерительных сеансов, в ходе которых наблюдалась облачность одного из следующих типов: cumulusfractus (Cufra), cumulushumulis (Cuhum), mediocris (Cumed), congestus (Cucong) и cumulonimbus (Cb). Для сравнения приведён спектр  $S_\nu(\tau)$  при безоблачной погоде (кривая 1). При наблюдении cumulonimbus, или кучево-дождевой облачности, имели место дождевые осадки интенсивностью 8.25 мм в час.



**Рис. 2. Спектры флуктуаций яркостной температуры на временном интервале  $\tau = 66$  сек. Кривая 1 – безоблачная атмосфера, кривая 2 – Cufra, кривая 3–Cuhum (кучевые облака хорошей погоды), кривая 4 – Cuhum переходят в Cumed**

Заметно, что облака большего вертикального развития оказывают большее влияние на интенсивность флуктуаций яркостной температуры. Это верно для любой величины

временного интервала  $\tau$ . Линия резонансного поглощения просматривается при безоблачной атмосфере и в случае облачности cumulus fractus, либо cumulus humilis. Для cumulus mediocris и далее максимум структурной функции смещается в сторону наиболее высокой частоты 27.2 ГГц. Частотный спектр кучево-дождевой облачности требует отдельного рассмотрения из-за эффектов, связанных с осадками.



**Рис. 3. Спектры флуктуаций яркостной температуры. Кривая 5 – Cumed, кривая 6 – Cusong, кривая 7 – Cb. Временной интервал  $\tau = 66$  сек**

### Структурные функции и водозапас облаков

Двухчастотный СВЧ-радиометрический метод определения интегральных параметров влагосодержания атмосферы представлен в [2]. Данный метод позволяет по яркостной температуре атмосферы, измеренной на двух частотах, определить значения полной массы водяного пара  $Q$  и водозапаса облаков  $W$ . Метод заключается в решении системы линейных уравнений относительно неизвестных  $Q$  и  $W$

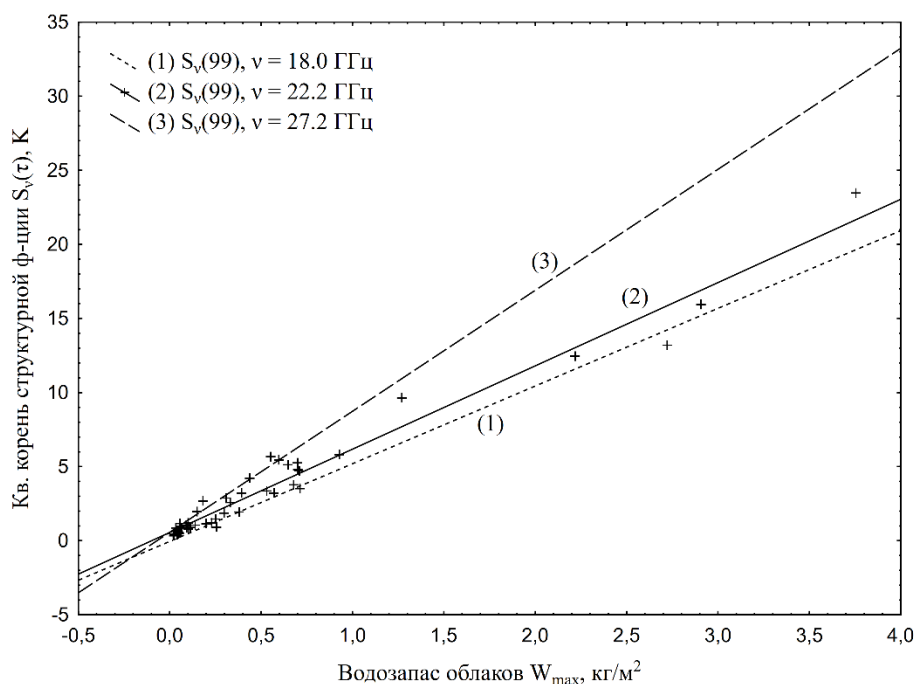
$$\tilde{\gamma}(\nu_i) = \tilde{\gamma}_{O_2}(\nu_i) + k_\rho(\nu_i) \cdot Q + k_w(\nu_i, t_w) \cdot W, \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

где  $\nu_i$  – частота излучения,  $\tilde{\gamma}(\nu_i)$  – полное поглощение в толще атмосферы,  $\tilde{\gamma}_{O_2}(\nu_i)$  – полное поглощение в кислороде,  $k_\rho(\nu_i)$  и  $k_w(\nu_i, t_w)$  – некоторые весовые функции (см. [2, 12]),  $t_w$  – средняя эффективная температура облака. Полное поглощение  $\tilde{\gamma}(\nu_i)$  можно оценить по значению яркостной температуры  $T_{\nu_i}$  при условии, что  $\tilde{\gamma}(\nu_i) \lesssim 1$  нп для  $i = 1, 2$ . Величины  $\tilde{\gamma}_{O_2}(\nu_i)$  и  $k_\rho(\nu_i)$  могут быть определены модельным расчётом (к примеру, по рекомендациям МСЭ Р.676 [8]).

Для всех измерительных сеансов с кучевой облачностью при помощи двухчастотного метода произведён расчёт временного хода значений полной массы водяного пара  $Q$ , водозапаса облаков  $W$ , а также средних, минимальных и максимальных за время сеанса значений этих параметров. Выбрано множество пар частот  $[21.4 \dots 23.6] \times [26.4 \dots 27.2]$  (всего 60 комбинаций) [13]. Искомые интегральные параметры были вычислены для каждой пары частот, после чего с целью достижения

лучшей точности для каждого момента времени проведено усреднение полученных значений.

На рис. 4. представлена регрессионная зависимость квадратного корня структурной функции  $S_\nu(\tau)$  для  $\nu = 18.0, 22.2$  и  $27.2$  ГГц,  $\tau = 99$  сек., от величины максимального за сеанс интегрального водозапаса  $\langle W \rangle_{\max}$  при следующих ограничениях:  $0.33 \text{ К} < S_{22.2}(99) < 25 \text{ К}$ ;  $\langle W \rangle_{\max} > 0.022 \text{ кг/м}^2$ . Видна относительно устойчивая взаимосвязь  $\langle W \rangle_{\max}$  и  $S_\nu(99)$ , как для  $\nu = 22.2$  ГГц, так и для других частотных каналов. Так, например,  $S_{22.2}(99) \cong 0.5591 + 5.6224 \cdot \langle W \rangle_{\max}$ . При рассмотрении временных интервалов  $\tau = 66$  и  $110$  сек. картина сохраняется. В то же время похожей взаимосвязи для  $\langle W \rangle_{\max}$  и  $T_b(\nu)$  обнаружить не удаётся.



**Рис. 4. Экспериментальная зависимость интенсивности флуктуаций яркостной температуры  $S_\nu(99)$  от величины максимального за сеанс интегрального водозапаса облаков  $\langle W \rangle_{\max}$ .**

### Заключение

Проведена обработка данных эксперимента по измерению флуктуаций нисходящего излучения атмосферы в диапазоне резонансного поглощения водяного пара 18 – 27.2 ГГц. Рассмотрены длительные сеансы наблюдений (в пределах от 2 до 5 часов). Показано, что флуктуации яркостной температуры связаны с пространственно-временной изменчивостью поля водяного пара. При отсутствии облачности спектральные кривые квадратного корня структурной функции  $S_\nu(\tau)$  повторяют форму спектра поглощения в водяном паре [14]. В случае кучевой облачности интенсивность флуктуаций сильно возрастает, а при наличии облаков мощного вертикального развития форма спектра  $S_\nu(\tau)$  претерпевает значительные изменения: максимум интенсивности флуктуаций смещается в сторону наиболее высокой частоты 27.2 ГГц, что связано с поглощением излучения мелкими водяными каплями. Получены экспериментальные регрессионные зависимости интенсивности флуктуаций  $S_\nu(\tau)$  при  $\tau = 66, 99$  и  $110$  сек. от величины максимального водозапаса облаков  $\langle W \rangle_{\max}$ .

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках госзадания по теме 0030-2019-0008 “Космос” и при поддержке РФФИ (проект № 20-02-00703).

### Литература

1. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука. 1967. 548 с.
2. Кутуза Б.Г., Данилычев М.В., Яковлев О.И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: ЛЕНАНД. 2016. 336 с.
3. Гагарин С.П., Кутуза Б.Г. Влияние флуктуаций радиотеплового излучения атмосферы на чувствительность радиотелескопа. Изв. ВУЗов, Радиофизика. 1976. Т.19. № 11. С.1636-1643.
4. Гагарин С.П., Кутуза Б.Г. Самолетные измерения пространственных характеристик флуктуаций радиоизлучения атмосферы на волнах 0,8 и 1,35 см. Изв. АН СССР, Физика атм. и океана. 1977. Т.13. №12. С.1307-1311.
5. Данилычев М.В., Казарян Р.А., Калинин А.А., Кутуза Б.Г., Турыгин С.Ю. Наземный радиометр для исследования атмосферы и обеспечения подспутниковых экспериментов. Материалы 9-й Международной научно-технической конференции ARMIMP. НТОРЭС им. А.С. Попова. Суздаль, Россия. 2016.
6. Egorov D.P., Kutuza B.G., and M.T. Smirnov, Web Portal for a Databank of Microwave Radiometric Measurements of the Atmosphere in Resonant Band of Water Vapor 18-27 GHz. Proceedings of Photonics & Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS-Spring). Rome, Italy. June 17, 2019. pp.3421-3427.
7. Kutuza B.G., Spatial and Temporal Fluctuations of the Atmospheric Microwave Emission. RadioScience. 2003. Vol.38. No.3. pp.12-1 – 12-7.
8. Recommendation ITU-R P.676. Attenuation by atmospheric gases. International Telecommunication Union. 2005. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.676/en>
9. Аквилонова А.Б., Кутуза Б.Г. Радиотепловое излучение облаков. Радиотехника и электроника. 1978. Т.23. №9. С.1792-1806.
10. Basharinov A.E., Kutuza B.G., Investigation of Radiation and Absorption of Cloudy Atmosphere in Microwave Range. Bulletin of the American Meteorological Society. 1968. Vol.49. No.5. P.2.
11. Башаринов А.Е., Кутуза Б.Г. Исследование радиоизлучения и поглощения облачной атмосферы в миллиметровом и сантиметровом диапазонах волн. Труды ГГО им. А.И. Воейкова. 1968. Перенос микроволнового излучения в атмосфере. Вып. 222, с. 100-110.
12. Kutuza B.G., Spectral and Temperature Dependencies of the Millimeter and Centimeter Wave Absorption in Clouds. Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment, edited by D.Solimini. VSP, Utrecht, Netherlands. 1995. pp.175-184.
13. Егоров Д.П., Кутуза Б.Г. О точности определения влагосодержания при СВЧ-радиометрическом зондировании атмосферы в резонансной области поглощения водяного пара 18-27 ГГц. Материалы XXVI Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн» (РРВ-26). КФУ. Казань. 2019. Т.2. С.254-257.
14. Егоров Д.П., Кутуза Б.Г. Флуктуации яркостной температуры атмосферы в резонансной области поглощения водяного пара 18 - 27.2 ГГц. Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2020 (в печати).