

Спектральные свойства флуктуаций яркостной температуры атмосферы по результатам СВЧ радиометрических измерений в К-диапазоне

Д.П. Егоров¹, Б.Г. Кутуза¹

¹ *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
125009, г. Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7.
E-mail: e-mail@lab329.ru*

Обсуждаются возможности дистанционных микроволновых методов по восстановлению характеристик тропосферной турбулентности. Рассмотрены два сеанса СВЧ радиометрического зондирования ясного неба и облачной атмосферы в диапазоне 18–27.2 ГГц с поверхности Земли. По данным сеансов выполнен расчет спектров быстрого преобразования Фурье и скалограмм непрерывного вейвлет-преобразования яркостных температур, а также спектров и скалограмм восстановленных величин влагосодержания и водозапаса. Ключевые слова: атмосфера, яркостная температура, частотный спектр, турбулентность, флуктуации, преобразование Фурье, вейвлет-преобразование

Spectral features of atmospheric brightness temperature fluctuations by results of K-band radiometric measurements

D.P. Egorov¹, B.G. Kutuza¹

¹ *Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS.*

The possibilities of remote microwave methods for the retrieval of tropospheric turbulence characteristics are discussed. Two sessions of microwave radiometric sensing of the clear sky and cloudy atmosphere in 18–27.2 GHz band from the Earth's surface are considered. Based on the data of the sessions, the fast Fourier transform spectra and continuous wavelet transform scalograms of brightness temperature timeseries are shown and compared to spectra and scalograms of the retrieved total water vapor and liquid water content values. Keywords: atmosphere, brightness temperature, frequency spectrum, turbulence, fluctuations, Fourier transform, wavelet transform

Введение

Пространственно-временные флуктуации микроволнового излучения атмосферы напрямую связаны с явлением турбулентности [1, 2]. Учет флуктуаций излучения атмосферы, как основного мешающего фактора, является обязательным условием для проектирования и эксплуатации высокоточных систем ДЗЗ, космической навигации, связи, а также проведения радиоастрономических наблюдений. В свою очередь, для физики атмосферы эти же флуктуации выступают в качестве источника ценной информации о характеристиках протекающих в атмосфере процессов. Так, например, метод радиозатменного зондирования [3] позволяет дистанционно оценить высотное распределение структурной постоянной показателя преломления C_n^2 по сцинтилляциям сигналов при их прохождении через атмосферу по касательной траектории между навигационными спутниками глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) или низкоорбитальными аппаратами.

Обеспечивая эффективный всепогодный мониторинг турбулентности в глобальном масштабе, метод радиозатменного зондирования оказывается непригодным для локальной оценки характеристик турбулентности ввиду эпизодичности измерений в

заданной точке. Необходимо отметить, что метод напрямую восстанавливает только профиль C_n^2 , тогда как переход к структурным постоянным температуры C_T^2 и водяного пара C_q^2 требует последующих шагов с привлечением дополнительных данных радиозондирования [4] или априорных физических моделей [5] для разделения вкладов температуры и влажности. Также отметим, что сильные градиенты влажности могут приводить к эффектам аномальной рефракции [6], что непосредственно сказывается на точности восстановления как самого показателя преломления, так и C_n^2 . Кроме того, на больших вертикальных масштабах основной вклад в сцинтилляции сигналов могут вносить внутренние гравитационные волны (ВГВ) [7], что затрудняет интерпретацию C_n^2 .

Оптимальным инструментом для непрерывного мониторинга эволюции турбулентности в приземном и пограничном слое с высоким пространственно-временным разрешением, но в ограниченной точке, является наземная СВЧ радиометрия [1]. Многоканальные СВЧ радиометры измеряют спектры нисходящего теплового излучения атмосферы на частотах вблизи резонансных линий кислорода ~60 ГГц и водяного пара 22.235 ГГц (К-диапазон), чувствительных к изменениям температуры и влажности, что позволяет эффективно восстанавливать вертикальные профили этих метеорологических параметров с использованием как традиционных методов вариационной ассимиляции [8], так и нейронных сетей [9]. Таким образом, значения структурных постоянных C_T^2 и C_q^2 могут быть получены непосредственно из восстановленных профилей путем расчета соответствующих временных структурных функций [10-12]. При этом переход от пространственных интервалов к временным и обратно осуществляется в предположении гипотезы о «замороженной» турбулентности Тейлора. Основным недостатком этого подхода является необходимость привлечения дополнительных сведений о профиле средней горизонтальной составляющей скорости ветра. В качестве первого приближения, однако, можно использовать величину в 10 м/с.

Математический аппарат структурных функций для анализа флуктуаций яркостной температуры нисходящего излучения атмосферы опирается на теорию локально-однородной и изотропной турбулентности Колмогорова-Обухова, которая также имеет свои ограничения [13]. В рамках данной теории вводится понятие инерционного интервала масштабов неоднородностей – от 0.5 м до 500 м, в пределах которого выполняются все ключевые закономерности. Однако при появлении облаков эти закономерности нарушаются. Кроме того, даже в отсутствие облачности экспериментальные данные указывают, что в приземном слое турбулентность часто носит прерывистый характер. Периоды интенсивного вихреобразования чередуются с относительно спокойными, ламинарными фазами. Это явление не описывается в рамках классической теории, предполагающей стационарность приращений, и требует учета пространственно-временной локализации турбулентных всплесков.

Диапазон рабочих частот ГНСС в основном лежит в пределах 1-2 ГГц. На этих частотах вклад водности облаков в формирование излучения минимален. С ростом частоты выше 10 ГГц влияние водности становится более выраженным [12]. Спектр яркостной температуры в К-диапазоне претерпевает уже существенные изменения при появлении в поле зрения радиометра жидкокапельного облака [10]. Действительно, необходимость учета облачной составляющей является дополнительным фактором неопределенности при восстановлении C_T^2 и C_q^2 радиометрическим методом, однако, цельное описание картины турбулентности представляется невозможным без рассмотрения эффектов, связанных с облаками, в особенности облаками вертикального развития, являющихся областями активной конвекции.

В связи с ограничениями классической теории существует необходимость разработки усовершенствованных неколмогоровских моделей турбулентности, позволяющих количественно оценивать наблюдаемые прерывистость и анизотропию, а

также классифицировать различные режимы турбулентности. В качестве основы для построения новых моделей может выступить непрерывное вейвлет-преобразование (НВП). Благодаря известному свойству частотно-временной локализации особенностей в исследуемом сигнале, НВП представляется наиболее предпочтительным инструментом для анализа нестационарных, прерывистых и многомасштабных процессов, характерных для реальной атмосферы. Целью настоящей работы является демонстрация возможностей СВЧ радиометрического метода и НВП для временной локализации неоднородностей излучения T_b^v , влагосодержания Q и водозапаса W , а также быстрого преобразования Фурье (БПФ) для оценки представленности различных масштабов неоднородностей в общей картине флуктуаций.

Эксперимент и результаты обработки

Во Фрязинском филиале Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН был оборудован специализированный пункт для круглосуточного и непрерывного мониторинга флуктуаций атмосферного излучения в диапазоне резонансного поглощения водяного пара 18–27.2 ГГц (К-диапазон). Измерения проводятся с 2017 г. при помощи 47-канального СВЧ радиометра-спектрометра «P22m» [14]. Прибор обладает улучшенной флуктуационной чувствительностью 0.02 К при постоянной времени 0.3 с. Угловое разрешение варьируется в пределах 5° – 7° в зависимости от частоты. Таким образом, на характеристической высоте распределения водяного пара 2.1 км элемент пространственного разрешения составляет порядка 200 м. Это позволяет исследовать тонкую структуру полей распределения метеорологических параметров, в том числе влажности и водности. Данные СВЧ радиометрии подкрепляются радиозондовыми измерениями, данными с ближайшей метеостанции, а также видеофиксацией текущих погодных условий наблюдения с использованием видеокамеры HI3516C.

В рамках текущего доклада ограничимся рассмотрением двух показательных для летнего периода сеансов СВЧ радиометрического зондирования безоблачной атмосферы (рис. 1–3), а также ясного неба, чередующегося в поле зрения радиометра с облаками малой и средней степени вертикального развития (рис. 4–6). На рис. 1а приведен временной ход яркостной температуры $T_b(v)$ в К, измеренной радиометром в различных частотных каналах v в ходе сеанса от 22 июля 2019 г., 05:00–08:00 по Московскому времени (безоблачная атмосфера). На рис. 1б показан временной ход восстановленных многочастотным методом [15] интегральных параметров влагосодержания (полной массы водяного пара) атмосферы Q в г/см² (синяя кривая) и водозапаса W в кг/м² (красная кривая). Поскольку облака отсутствуют, интегральный водозапас W не превышает по уровню 0.05 кг/м². Временной ход $T_b(v)$, Q и W при появлении облаков Cu hum/med (данные сеанса от 03 августа 2019 г., 12:30–15:30 по Московскому времени) приведен на рис. 4а (яркостные температуры) и 4б (влагосодержание и водозапас). Проходящие в поле зрения жидкокапельные облака отражаются в скачках измеренной яркостной температуры T_b на 5–15 К и восстановленного интегрального водозапаса W до 0.55 кг/м². Длительность обоих сеансов составляет 3 часа.

На рис. 2а и 5а показаны спектры быстрого преобразования Фурье для $T_b(v)$ при $v = 22.2$ ГГц (оранжевая кривая), Q (синяя кривая) и W (красная кривая) для соответствующих сеансов. Здесь частоты в Гц, отложенные по оси абсцисс, отражают рассматриваемый диапазон временных масштабов неоднородностей (а не диапазон частот излучения). Для исключения низкочастотных составляющих высокой амплитуды, которые не связаны с турбулентностью и соответствуют временным интервалам более 30 минут (менее 0.00055 Гц), показания T_b , Q и W предварительно подвергаются фильтрации с применением 5-го порядка фильтра Баттерворта.

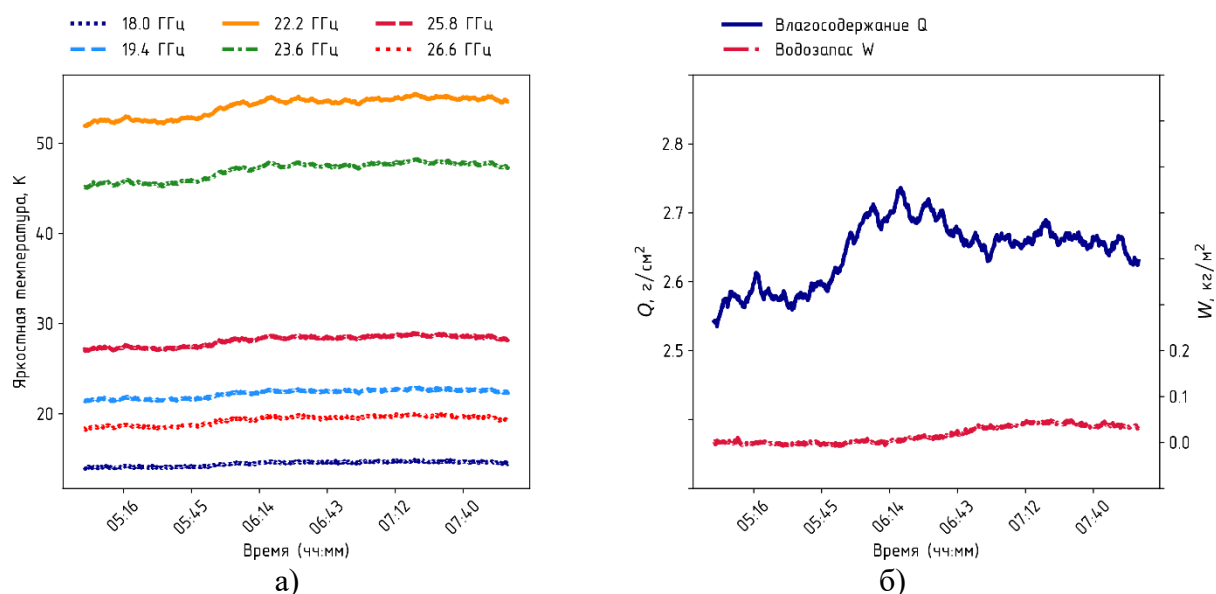


Рис. 1. а) Временной ход яркостной температуры $T_b(\nu)$ при различных ν ; б) восстановленные величины влагосодержания Q и водозапаса W . Безоблачная атмосфера, сеанс от 22 июля 2019 г., 05:00–08:00 МСК

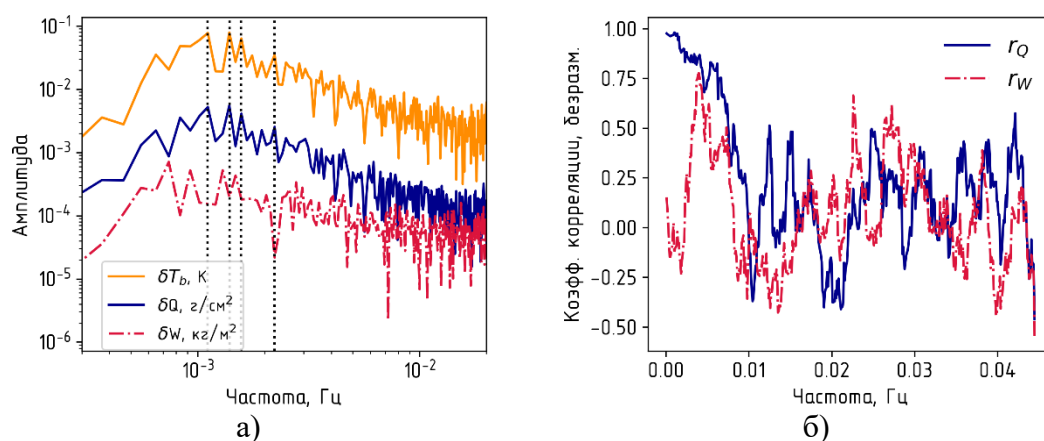


Рис. 2. а) Спектры БПФ яркостной температуры $T_b(\nu)$ при $\nu = 22.2$ ГГц (оранжевая кривая), полной массы водяного пара Q (синяя кривая) и водозапаса W (красная кривая) с применением ФВЧ; б) коэффициент корреляции Пирсона между спектрами БПФ. Безоблачная атмосфера

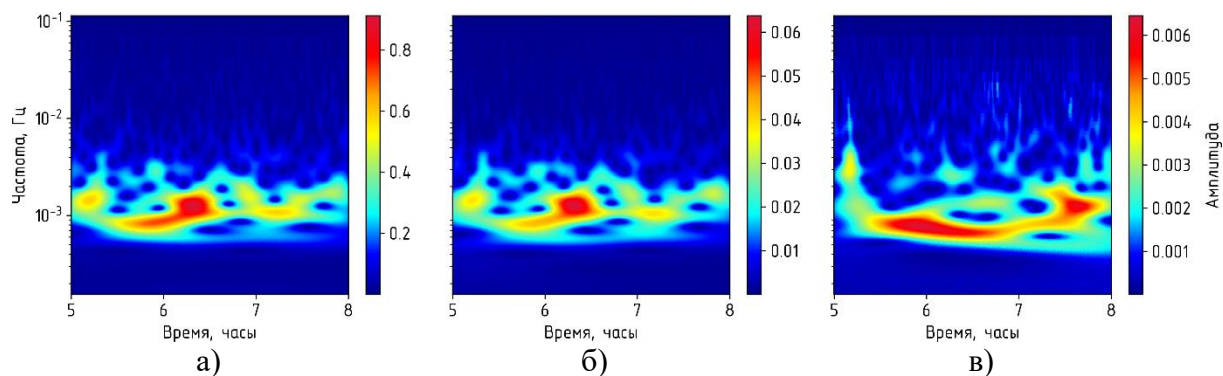


Рис. 3. Результаты НВП яркостной температуры $T_b(\nu)$ при $\nu = 22.2$ ГГц (а), полной массы водяного пара Q (б) и водозапаса W (в) с предварительной обработкой ФВЧ. Безоблачная атмосфера

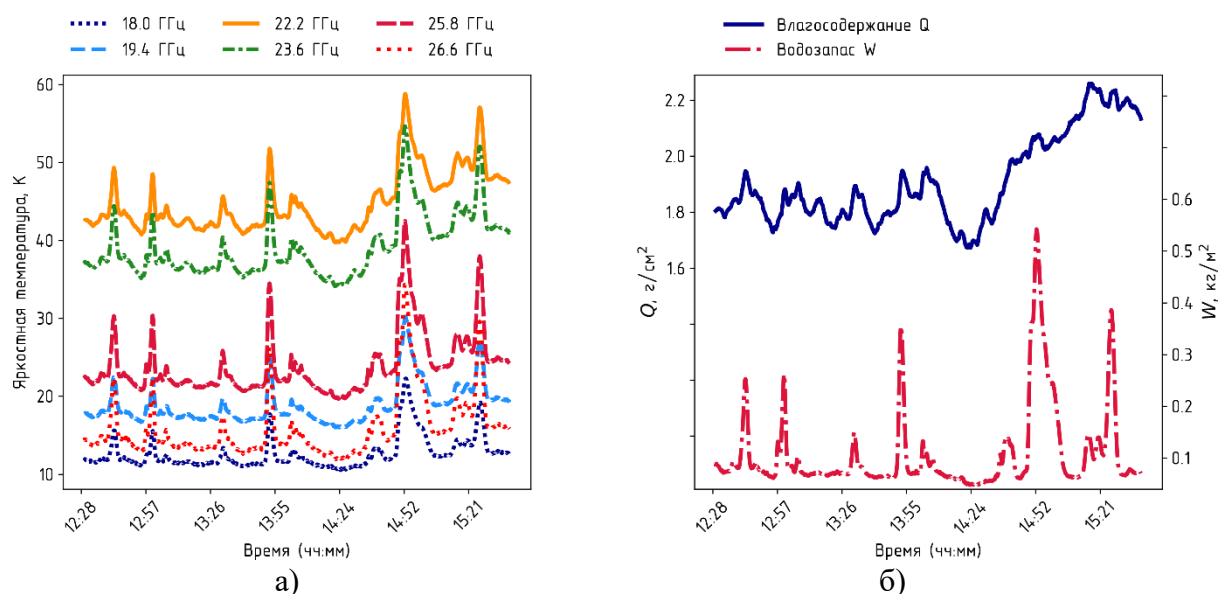


Рис. 4. а) Временной ход яркостной температуры $T_b(\nu)$ при различных ν ; б) восстановленные величины влагосодержания Q и водозапаса W . Облака Cu hum/med, сеанс от 03 августа 2019 г., 12:30–15:30 МСК

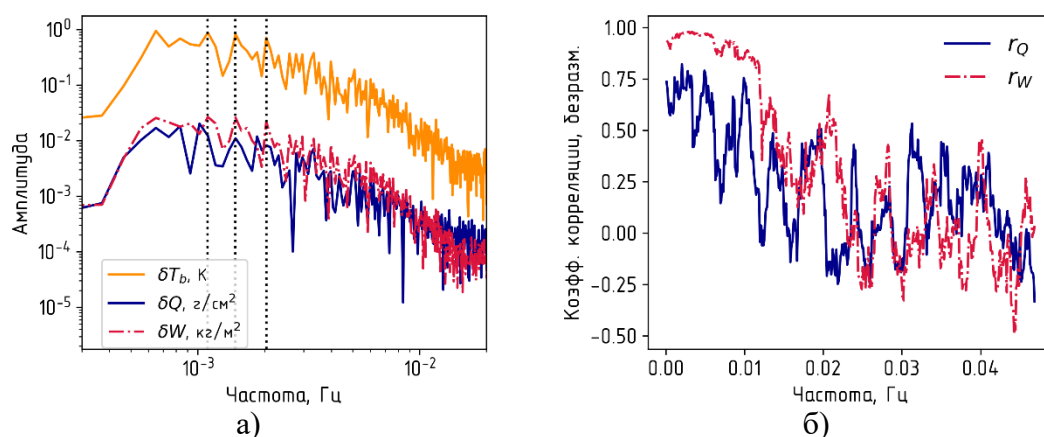


Рис. 5. а) Спектры БПФ яркостной температуры $T_b(\nu)$ при $\nu = 22.2$ ГГц (оранжевая кривая), полной массы водяного пара Q (синяя кривая) и водозапаса W (красная кривая) с применением ФВЧ; б) коэффициент корреляции Пирсона между спектрами БПФ. Облака Cu hum/med.

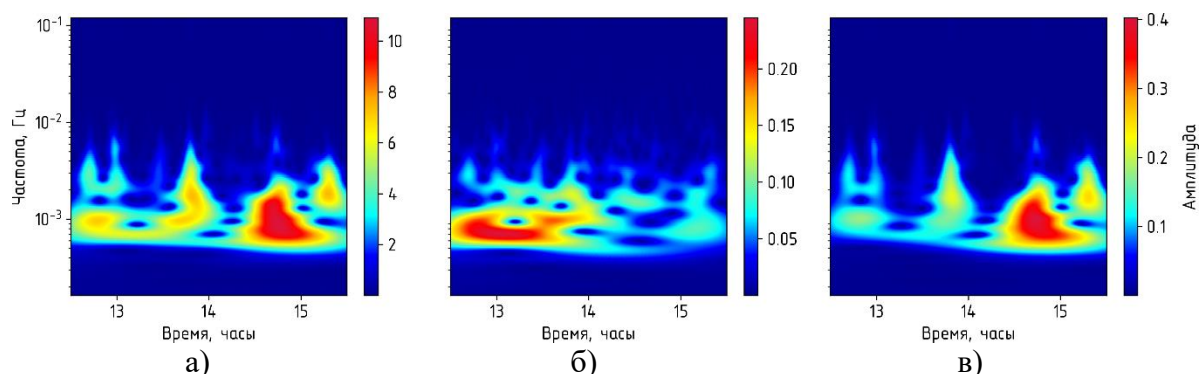


Рис. 6. Результаты НВП яркостной температуры $T_b(\nu)$ при $\nu = 22.2$ ГГц (а), полной массы водяного пара Q (б) и водозапаса W (в) с предварительной обработкой ФВЧ. Облака Cu hum/med.

Из рис. 2а можно видеть, что в условиях ясного неба амплитуда флуктуаций влагосодержания δQ на порядок превосходит амплитуду флуктуаций водозапаса δW в широком диапазоне временных масштабов. На частотах вплоть до 0.01–0.015 Гц (~1–1.5 мин) наблюдается явная корреляция спектров БПФ для T_b и Q , а в диапазоне частот 0.00055–0.005 ГГц (см. рис. 2б), что соответствует временным интервалам от 3 до 30 минут, характер флуктуаций излучения δT_b практически полностью определяется изменчивостью поля влажности δQ . Первые четыре доминирующие частоты в спектре δT_b на рис. 2а (обозначены черными вертикальными линиями) – это 0.00111 Гц (15 минут), 0.00139 Гц (12 минут), 0.00157 Гц (10.6 минут) и 0.00222 Гц (7.5 минут). Отметим, что положения пиков на частотах 0.0011 Гц и 0.0022 Гц согласуются с результатами, полученными в работе [16] на другой аппаратуре в условиях ясного неба в Берне (Швейцария).

При наличии облачности амплитуда флуктуаций водозапаса δW возрастает (рис. 5а). Спектр δT_b на больших и средних временных масштабах в большей степени коррелирует именно с δW , а не влажностной компонентой δQ . Коэффициент корреляции Пирсона r_W между δT_b и δW (рис. 5б) сохраняет уровень выше 0.8 вплоть до 0.012 Гц (83 секунды), после чего резко падает. Согласно гипотезе Тейлора и в предположении горизонтальной составляющей скорости ветра 10 м/с, имеем пространственный интервал 830 метров, что соответствует горизонтальной протяженности *Su hum* и нижней границе горизонтальной протяженности для *Su med*. Примечательно, что в Фурье-спектре δT_b на рис. 5а положение пика 0.00111 Гц (15 минут) сохраняется. Другие доминирующие частоты – 0.00148 Гц (11.3 мин) и 0.00204 Гц (8.2 мин).

Результаты НВП с комплексным вейвлетом Морле (пропускная способность $B = 1.5$, центральная частота $C = 1$) представлены на рис. 3 и 6 для яркостной температуры в канале 22.2 ГГц (а), влагосодержания (б) и водозапаса (в). Здесь также предварительно применялся фильтр Баттерворта для исключения составляющих с частотами менее 0.00055 Гц. Отметим похожую картину НВП для яркостной температуры и влагосодержания в условиях ясного неба на рис. 3а и 3б. В то же время на рис. 6а-в, при наличии облачности, можно видеть сходства между НВП всех трех величин T_b , Q и W . Вейвлет анализ рис. 3 и 6 подтверждает наличие доминирующих частот из рис. 2а и 5а по результатам БПФ, однако, указывает на прерывистый характер турбулентных процессов.

Выводы

Рассмотрены два подхода к анализу флуктуаций яркостной температуры излучения атмосферы. В работах [10, 12] авторы применяли подход на основе временных структурных функций. В данной работе предлагается альтернативный подход с использованием спектральных методов, в частности, непрерывного вейвлет-преобразования (НВП). Частично подтверждаются результаты и положения, изложенные в [16].

Благодаря возможности детальной частотно-временной (масштабной) локализации особенностей яркостной температуры, влагосодержания и водозапаса, НВП может выступить в качестве одного из ключевых инструментов в современных дистанционных исследованиях тропосферной турбулентности, проявляющей свойства нестационарности, интермиттентности (прерывистости) и анизотропии. Результаты этих исследований найдут применение при проектировании систем связи (оценка помех при распространении сложных цифровых сигналов), в развитии методов детектирования турбулентности, а также при ассимиляции данных в моделях прогноза погоды.

Литература

1. Кутуза Б.Г., Данилычев М.В., Яковлев О.И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности // М.: ЛЕНАНД, 2016. – 336 с.
2. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере // М.: Наука, 1967. – 548 с.
3. Esayas Shume, Chi Ao. Remote Sensing of Tropospheric Turbulence using GPS Radio Occultation // Atmos. Meas. Tech. 2016. Vol. 9. P. 3175-3182.
4. Ying Li, et al. A New Algorithm for the Retrieval of Atmospheric Profiles from GNSS Radio Occultation Data in Moist Air and Comparison to 1DVar Retrievals // Remote Sensing. 2019. Vol. 11, 2729.
5. Горбунов М.Е. Нейронно-сетевое восстановление метеопараметров из профилей индекса рефракции: статистический анализ // Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - Муром 2025. С. 156-165.
6. Кузнецов А.Д., Сероухова О.С., Симакина Т.Е., Крюкова С.В. Оценка изменчивости вертикального профиля индекса коэффициента преломления СВЧ-излучения в тропосфере // Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - Муром 2021. С. 138-143.
7. Горбунов М.Е. Исследование внутренних гравитационных волн в атмосфере Земли по данным радиозатменного зондирования // Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - Муром 2024. С. 327-336.
8. Саворский В.П., Кутуза Б.Г., Аквилонova А.Б., Кибардина И.Н., Панова О.Ю., Данилычев М.В., Широков С.В. Повышение эффективности восстановления температурно-влажностных профилей облачной атмосферы по данным спутниковых сверхвысокочастотных спектрометров // Радиотехника и электроника. 2020. Т. 65. № 7. С. 658-666.
9. Егоров Д.П., Верина Я.В., Кравченко О.В. Разработка нейросетевого метода восстановления влажностного профиля атмосферы по данным наземного микроволнового радиометра-спектрометра // Материалы 21-й Международной конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва, 2023. С. 147.
10. Egorov D.P., Kutuza B.G. Atmospheric Brightness Temperature Fluctuations in the Resonance Absorption Band of Water Vapor 18-27.2 GHz // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2021. Т. 59. № 9. С. 7627-7634.
11. Robert M. Manning. Average Path Profile of Atmospheric Temperature and Humidity Structure Parameters from a Microwave Profiling Radiometer // The 1st International Electronic Conference on Atmospheric Sciences (ECAS 2016). Sciforum Electronic Conference Series, Vol. 1, 2016. P. 1-18.
12. Егоров Д.П., Кутуза Б.Г., Аквилонova А.Б. Оценка флуктуаций фазового запаздывания радиоволн в неоднородной атмосфере на основе данных радиометра-спектрометра К-диапазона // Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - Муром 2025. С. 68-77.
13. Лукин В.П., Носов В.В., Носов Е.В., Торгаев А.В. Причины появления неколмогоровской турбулентности в атмосфере // Успехи современного естествознания. 2014. № 12-4. С. 369-377.
14. Аквилонova А.Б., Егоров Д.П., Кутуза Б.Г., Смирнов М.Т. Изучение характеристик облачной атмосферы по результатам измерений спектров ее нисходящего СВЧ-

излучения в области резонансного поглощения водяного пара 18-27,2 ГГц // Метеорология и гидрология. 2022. № 12. С. 66-77.

15. Егоров Д.П., Кутуза Б.Г. Влияние водяного пара и кучевой облачности на флуктуации яркостной температуры нисходящего излучения атмосферы в К-диапазоне // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2021. № 8-9. С. 712-721.

16. Wang W., Murk A., Hervé M., Martucci G., Hocke K. Radiometric Observation of Brightness Temperature Fluctuations on a Clear Summer Day in the Mid-latitudes // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2026. Vol. 19. P. 14626-14636.