

**Пространственные неоднородности атмосферы
и учет их влияния при СВЧ-радиометрическом
зондировании Земли из космоса**

Егоров Д.П.

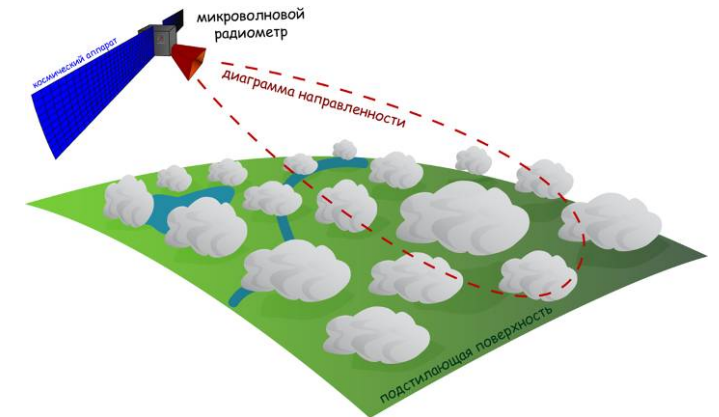
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

руководитель: д.ф.-м.н., профессор Кутуза Борис Георгиевич

Введение

- Флуктуации радиоизлучения атмосферы, обусловленные неоднородностью полей распределения ее метеорологических параметров, необходимо учитывать при создании систем дистанционного зондирования Земли, космической навигации; они оказывают влияние на качество СВЧ-радиометрических измерений и радиоастрономических наблюдений. Остаются нерешенными вопросы, связанные с характером флуктуаций излучения на различных длинах волн, их интенсивностью при больших пространственно-временных интервалах, а также ролью отдельных метеорологических факторов.
- Важнейшим направлением исследований является развитие существующих и разработка новых методов и алгоритмов восстановления температурно-влажностных профилей атмосферы, определения интегральных параметров ее влаго- и водосодержания. Эти параметры играют ключевую роль в прогнозировании различных атмосферных процессов, погоды и климата, осадков, опасных метеоявлений.

$$= * +$$



Цель и задачи диссертационной работы

Цель – развитие исследований пространственно-временных неоднородностей радиоизлучения атмосферы и их влияния на точность решения обратных задач СВЧ-радиометрического зондирования.

Задачи:

1. Моделирование прямой задачи и проведение расчета яркостной температуры нисходящего излучения облачной атмосферы и уходящего излучения системы «облачная атмосфера – подстилающая поверхность» с учетом заданной динамики трехмерных полей распределения метеорологических параметров.
2. Проведение экспериментальных исследований временных флуктуаций собственного нисходящего излучения атмосферы – длительных (от 2 до 5 часов) сеансов непрерывных измерений спектра яркостной температуры вблизи линии резонансного поглощения водяного пара 22.235 ± 5 ГГц (К-диапазон).
3. Оценка точности двух- и многочастотного методов решения обратной задачи восстановления интегральных параметров влаго- и водосодержания атмосферы, в том числе по данным проведенных измерений.
4. Исследование систематических ошибок восстановления влаго- и водосодержания атмосферы, возникающих из-за неучета пространственного распределения кучевых облаков в элементе разрешения антенны спутникового микроволнового радиометра.

Положения, выносимые на защиту

1. Монотонный рост структурной функции яркостной температуры на временных интервалах более 600 сек (без насыщения) свидетельствует о наличии в безоблачной атмосфере крупных горизонтально-вытянутых неоднородностей размером, превышающим 6 км. Частотный спектр интенсивности временных флуктуаций яркостной температуры нисходящего излучения ясного неба в К-диапазоне подобен частотному спектру поглощения в водяном паре приземного слоя атмосферы.
2. Анализ частотных спектров яркостной температуры и ее пространственно-временной изменчивости позволяет определить тип наблюдаемой в поле зрения наземного радиометра облачности. Зависимость структурной функции от временного интервала позволяет оценить средний горизонтальный размер облака в ансамбле.
3. Яркостная температура уходящего излучения разрывной облачности, регистрируемая в элементе разрешения антенны спутникового микроволнового радиометра, меньше яркостной температуры эквивалентного по водозапасу сплошного облачного слоя. В случае мощных, развитых по вертикали кучевых облаков такое различие становится существенным и достигает 10 К.
4. На ошибки восстановления влагозапаса и водозапаса, связанные с нелинейностью зависимости яркостной температуры от водности и термодинамической температуры облака, оказывает влияние характер пространственного распределения облаков в элементе разрешения антенны спутникового микроволнового радиометра. Для случая кучевых облаков при размере элемента разрешения от 10x10 км относительная ошибка восстановления интегральных параметров может превышать 10-15%.

Влияние высотных распределений метеорологических параметров на радиоизлучение облачной атмосферы

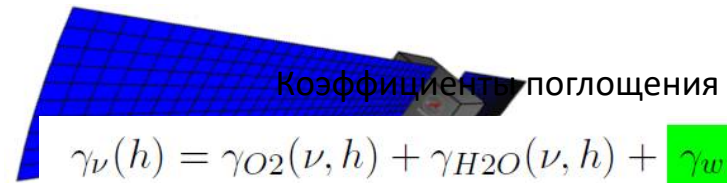
Глава 1

Прямая задача

Яркостная температура ($Tя$) радиотеплового излучения системы «атмосфера – подстилающая поверхность», уходящего в направлении зенитного угла

$$T_b^\nu(\theta) = T_s \cdot \kappa_\nu(\theta) \cdot \exp(-\tau_\nu \sec \theta) + \int_0^\infty T(h) \gamma_\nu(h) \sec \theta \cdot \exp\left(-\int_h^\infty \gamma_\nu(z) \sec \theta dz\right) dh + R_\nu(\theta) \cdot \exp(-\tau_\nu \sec \theta) \cdot \int_0^\infty T(h) \gamma_\nu(h) \sec \theta \cdot \exp\left(-\int_0^h \gamma_\nu(z) \sec \theta dz\right) dh + R(\theta) \cdot T_C(\phi, \theta) \cdot \exp(-2\tau_\nu \sec \theta), \quad (1.1)$$

$$\tau_\nu = \int_0^\infty \gamma_\nu(h) dh. \quad (1.2)$$

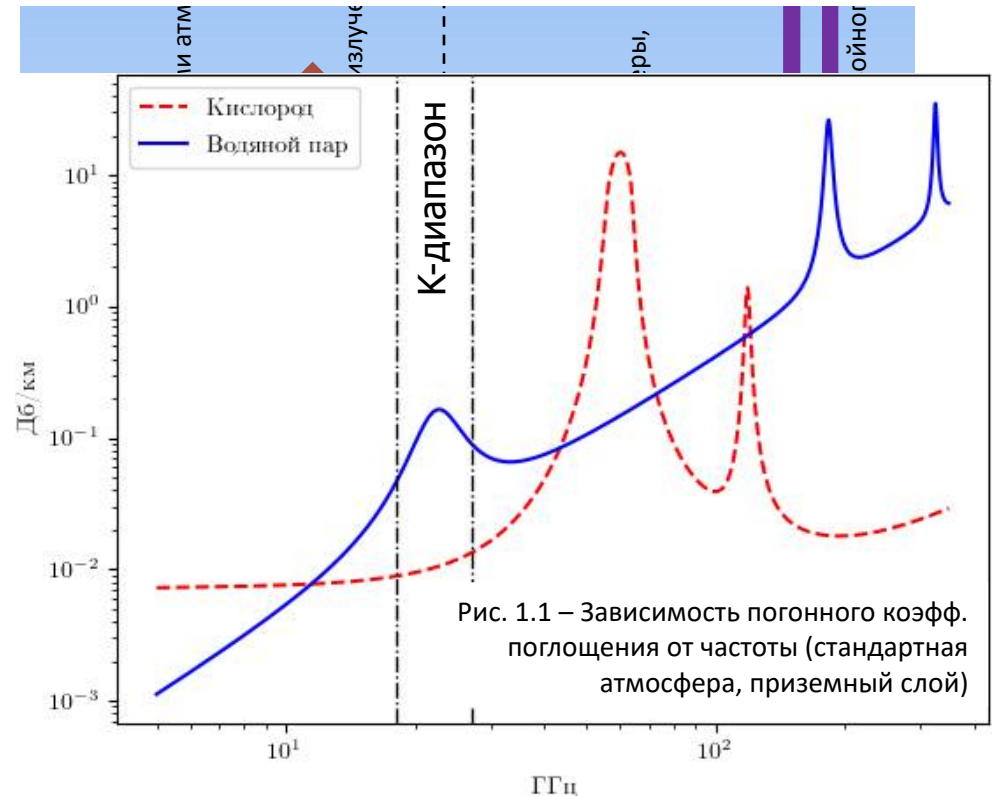


где

$$\gamma_{O_2}(\nu, h) = \gamma_{O_2}(\nu, T(h), P(h)) \quad (\text{Rec. ITU-R P.676}),$$

$$\gamma_{H_2O}(\nu, h) = \gamma_{H_2O}(\nu, T(h), P(h), \rho(h)) \quad (\text{Rec. ITU-R P.676}),$$

$$\gamma_w(\nu, h) \approx \frac{60\pi \cdot \nu}{c} \text{Im} \left(\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right) \cdot w(h) \quad \text{or Rec. ITU-R P.840.}$$



Высотный профиль водности облака

Высотный профиль водности кучевого облака может быть рассчитан как (Мазин, 1972)

$$w(\xi) = w(\xi_0) \frac{\xi^{\mu_0} (1 - \xi)^{\psi_0}}{\xi_0^{\mu_0} (1 - \xi_0)^{\psi_0}} = \frac{W}{H} \cdot \frac{\Gamma(2 + \mu_0 + \psi_0)}{\Gamma(1 + \mu_0)\Gamma(1 + \psi_0)} \xi^{\mu_0} (1 - \xi)^{\psi_0}, \quad (1.4)$$

где ξ – приведенная высота внутри облака, H – мощность облака (км), W – (интегральный) водозапас облака (кг/м²), w – водность облака (кг/м³), w_0 – максимальная водность, ξ_0 – приведенная высота максимальной водности, μ_0 и ψ_0 – безразмерные параметры. Согласно [3], значения параметров равны $\mu_0 = 0.5$, $\psi_0 = 0.5$.

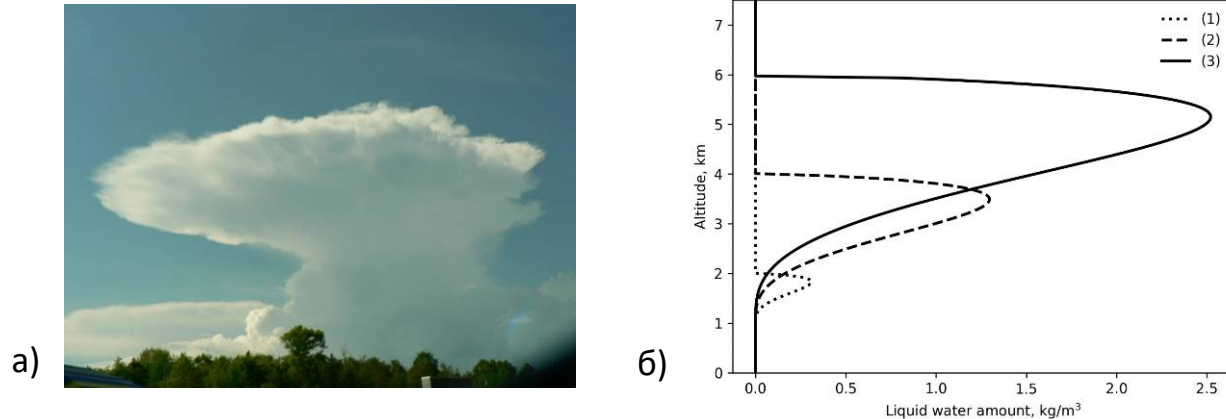


Рис. 1.3 – а) облако типа Cu cong, имеющее характерный вид наковальни; б) модель высотного профиля водности внутри облака мощностью (1) км, (2) км, (3) км. Высота основания облаков принята равной 1 км.

Зависимость водозапаса от мощности облака приближенно аппроксимируется формулой

$$W = 0.132574 \cdot H^{2.30215} \quad (1.5)$$

Нелинейность взаимосвязи T_b и влажности облака

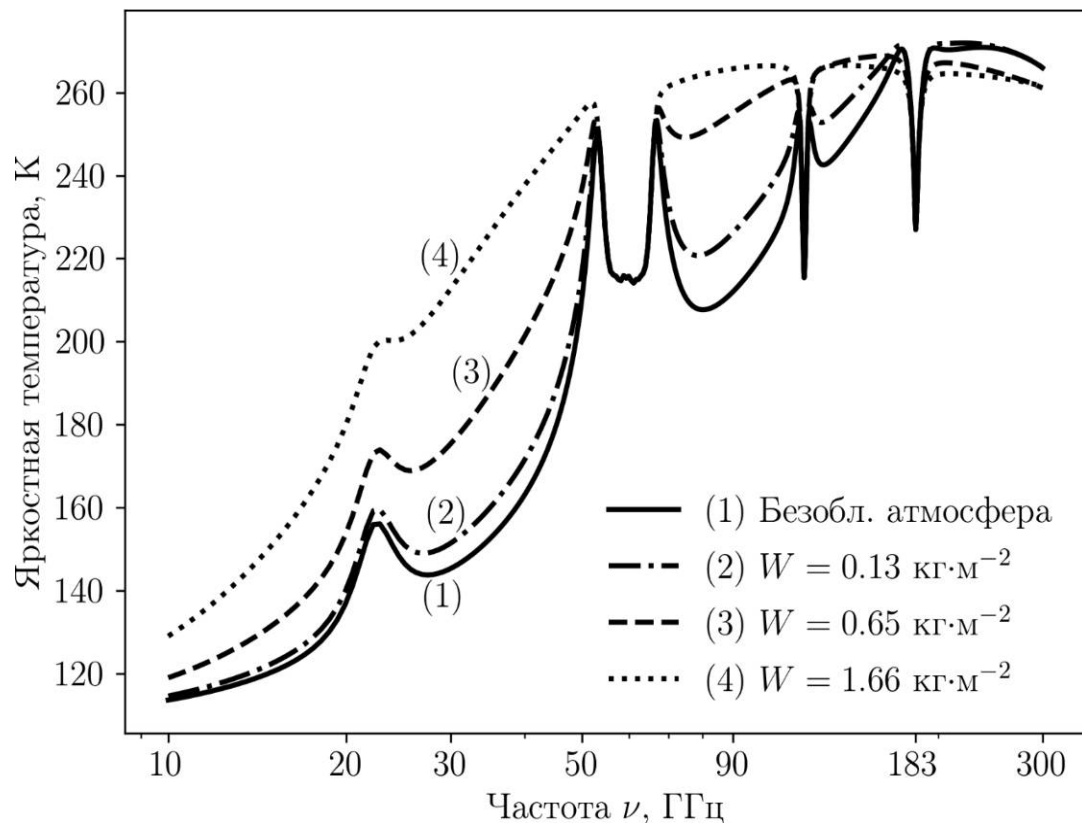


Рис. 1.4 – Яркостная температура уходящего в направлении зенита излучения системы «атмосфера – гладкая водная поверхность». Кривая 1 – безоблачная атмосфера (км), кривая 2 – км, кривая 3 – км, кривая 4 – км. Логарифмический масштаб по оси абсцисс

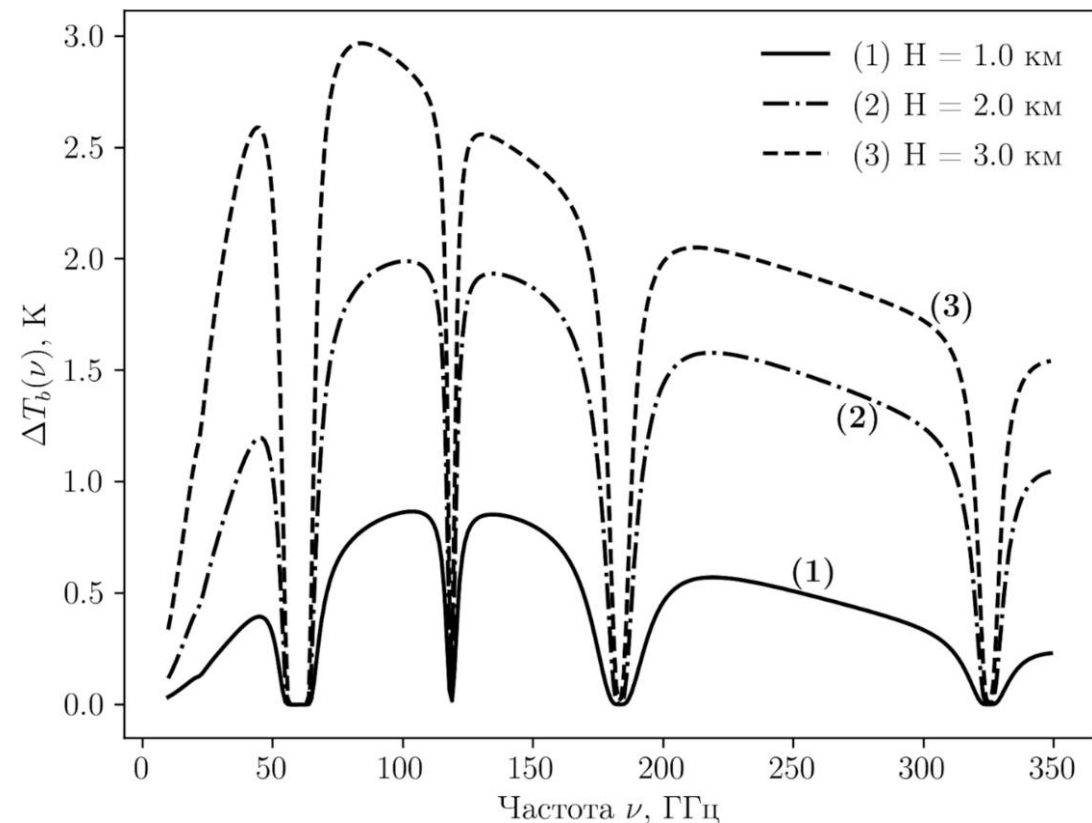


Рис. 1.5 – Разность в яркостных температурах, обусловленная особенностями распределения влажности по высоте

Основные выводы к главе 1

Разработаны программные инструменты для решения прямой задачи расчета яркостной температуры нисходящего излучения облачной атмосферы и уходящего излучения системы «облачная атмосфера – гладкая водная поверхность» в заданной подспутниковой точке с учетом известных высотных распределений метеорологических параметров. Результаты моделирования отражают нелинейность взаимосвязи уровня яркостной температуры с водностью облака и его термодинамической температурой.

Пространственно-временная изменчивость собственного нисходящего излучения атмосферы

Глава 2

Эксперимент. Измерительная аппаратура



Рис. 2.1 – Радиометр-спектрометр «P22M»

Измерения проводились в г. Фрязино Московской области (ФИРЭ РАН).

Таблица 2.1. Характеристики радиометра-спектрометра.

Характеристика	Значение
Рабочий диапазон частот	18 – 27.2 ГГц
Разрешение по частоте	200 МГц
Количество спектральных каналов	47
Флуктуационная чувствительность	0.02 К
Время получения полного спектра	около 11 сек.
Угловое разрешение*	5-7°

*пространственное разрешение на высоте 2.1 км – от 183 до 256 м в зависимости от частоты.

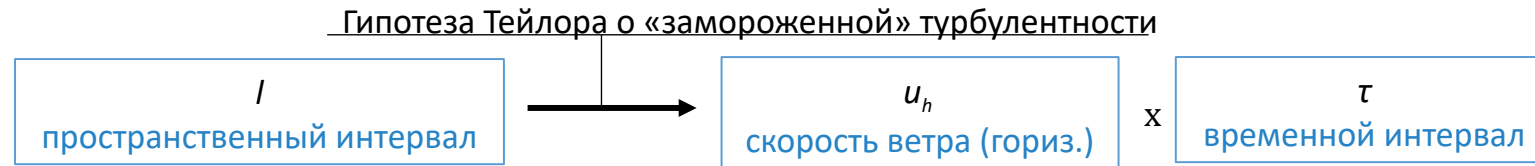
Структурная функция (СФ)

Структурные функции были введены А.Н. Колмогоровым в 1941 г. для статистического описания локально однородной и изотропной турбулентности в средах.

В самом общем виде структурную функцию можно записать как

(2.1)

где δu – флуктуационная компонента поля в точке \mathbf{r} , u – средняя величина поля в данной точке.



Гипотеза Тейлора – скорость сноса отдельных неоднородностей много больше скорости изменения их формы.

Пусть антенна радиометра занимает фикс. положение в течение всего времени наблюдений, тогда структурную функцию яркостной температуры можно записать как

$$D_{T_b}(\nu, \tau) = \left\langle \left| T_b(\nu, t + \tau) - T_b(\nu, t) \right|^2 \right\rangle \left(\nu S_\nu^2(\tau) \right) \quad (2.2)$$

где ν – частота излучения, l – пространственный интервал, τ – временной интервал, T_b – яркостная температура излучения частоты ν в момент времени t .

Безоблачная атмосфера

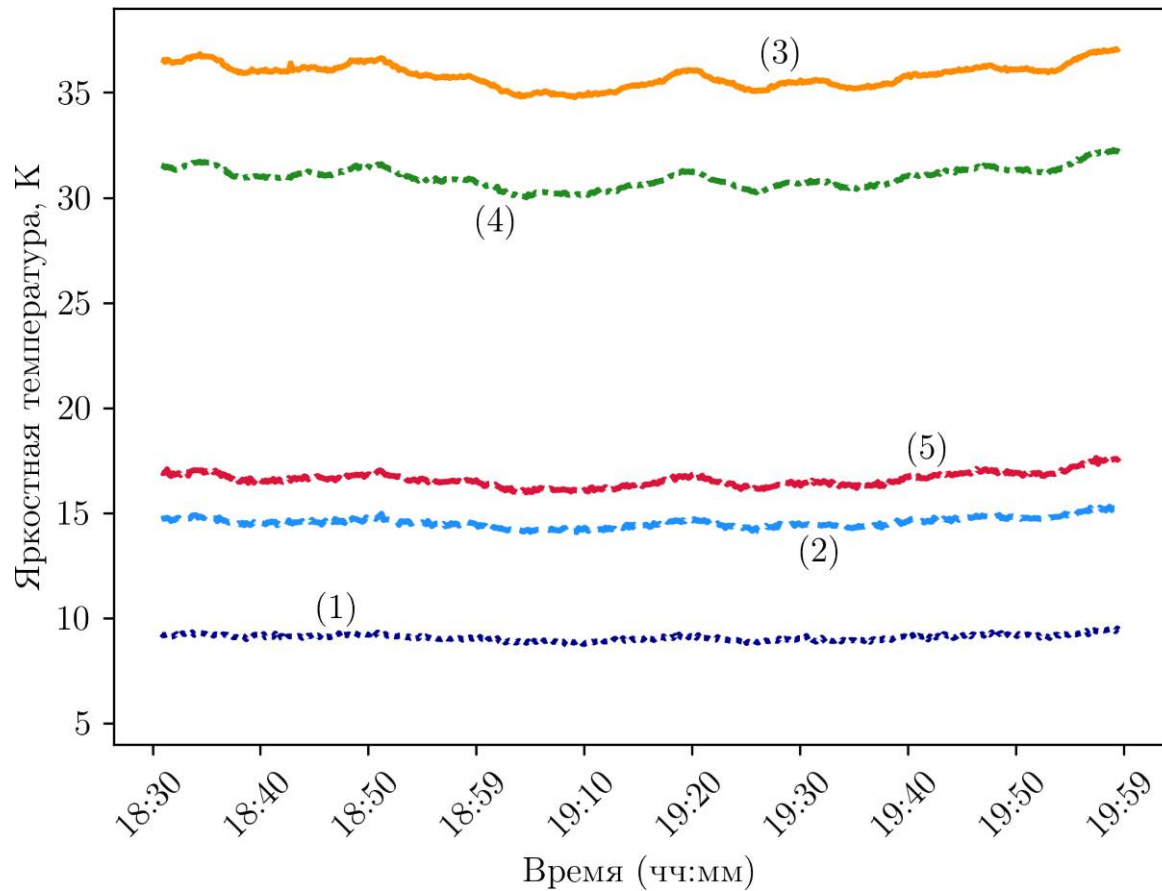


Рис. 2.3 – Временной ход яркостных температур;
(1) 18 ГГц, (2) 19.4 ГГц, (3) 22.2 ГГц,
(4) 23.6 ГГц, (5) 25.8 ГГц

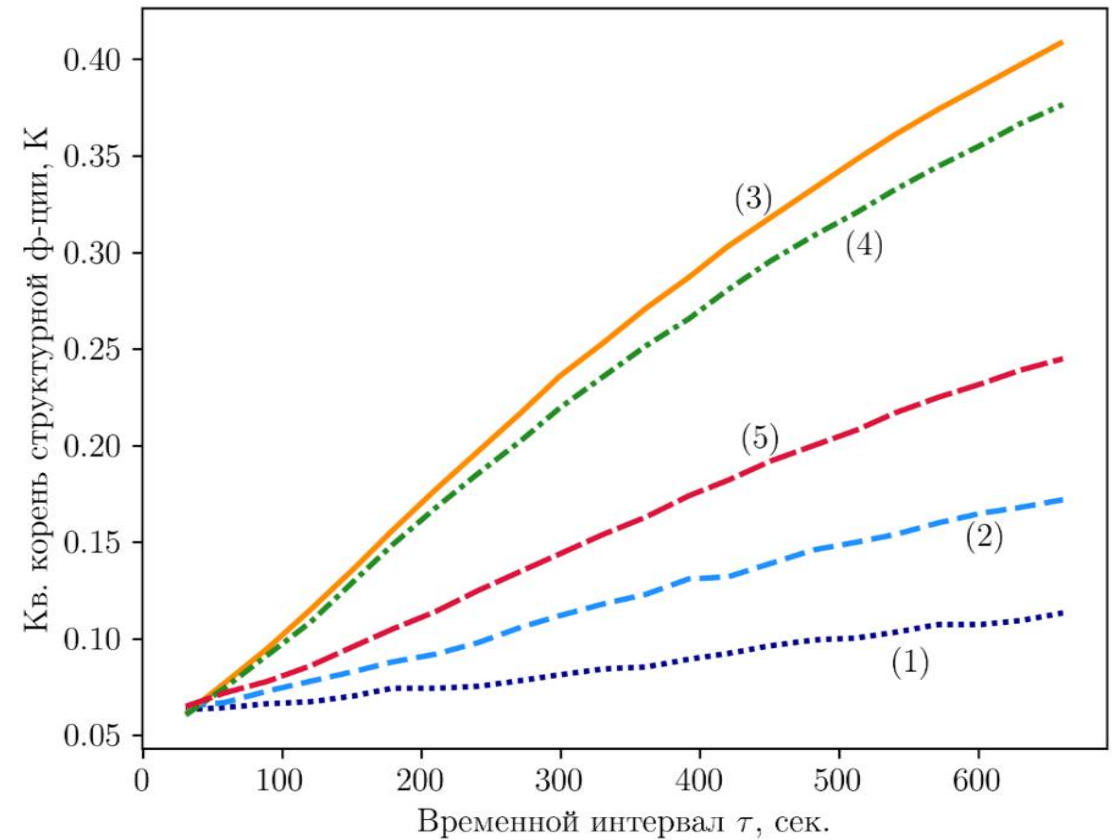


Рис. 2.4 – Зависимость интенсивности флуктуаций яркостной температуры от величины временного интервала

Безоблачная атмосфера

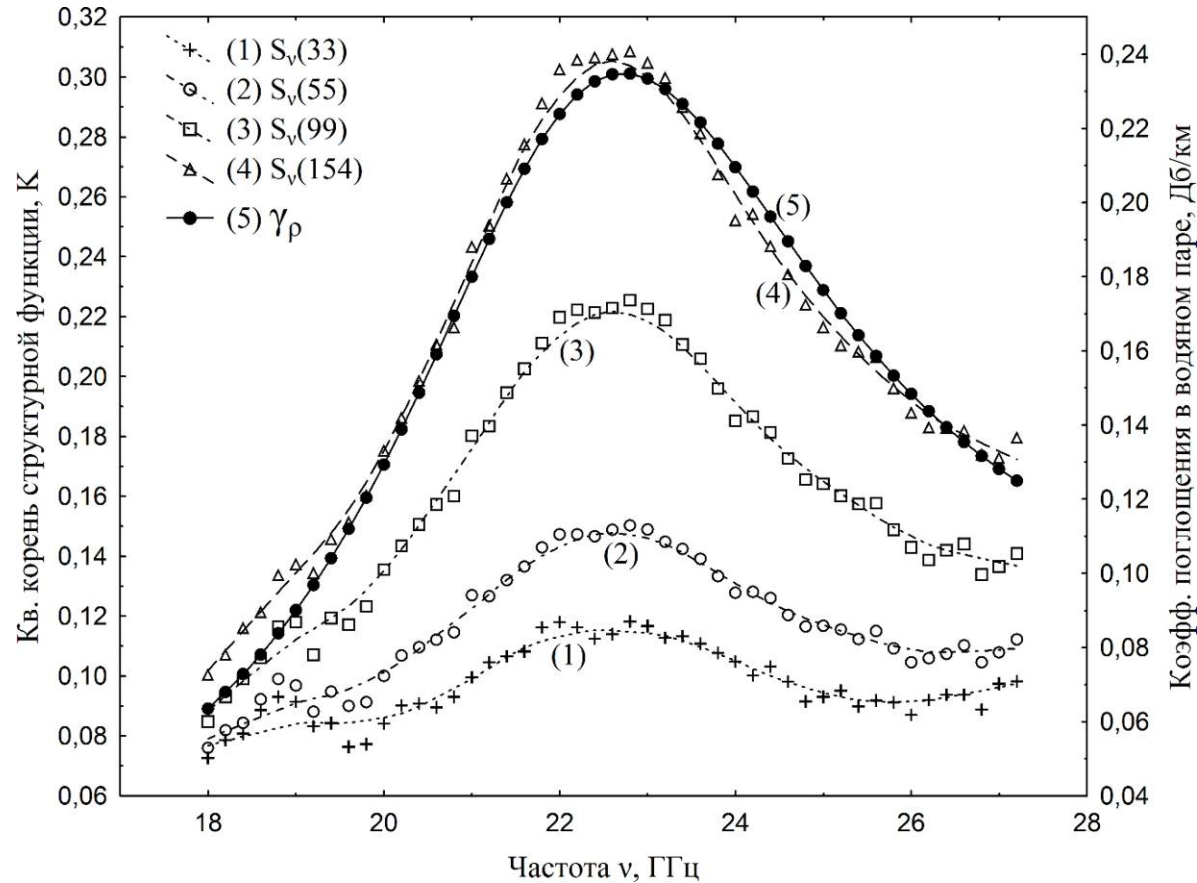


Рис. 2.5 – Спектры флуктуаций яркостной температуры на временных интервалах 33, 55, 99, 154 сек. (шкала слева) и спектр погонного коэффициента поглощения в водяном паре (шкала справа).

Для сравнения:

Rec. ITU-R P.676

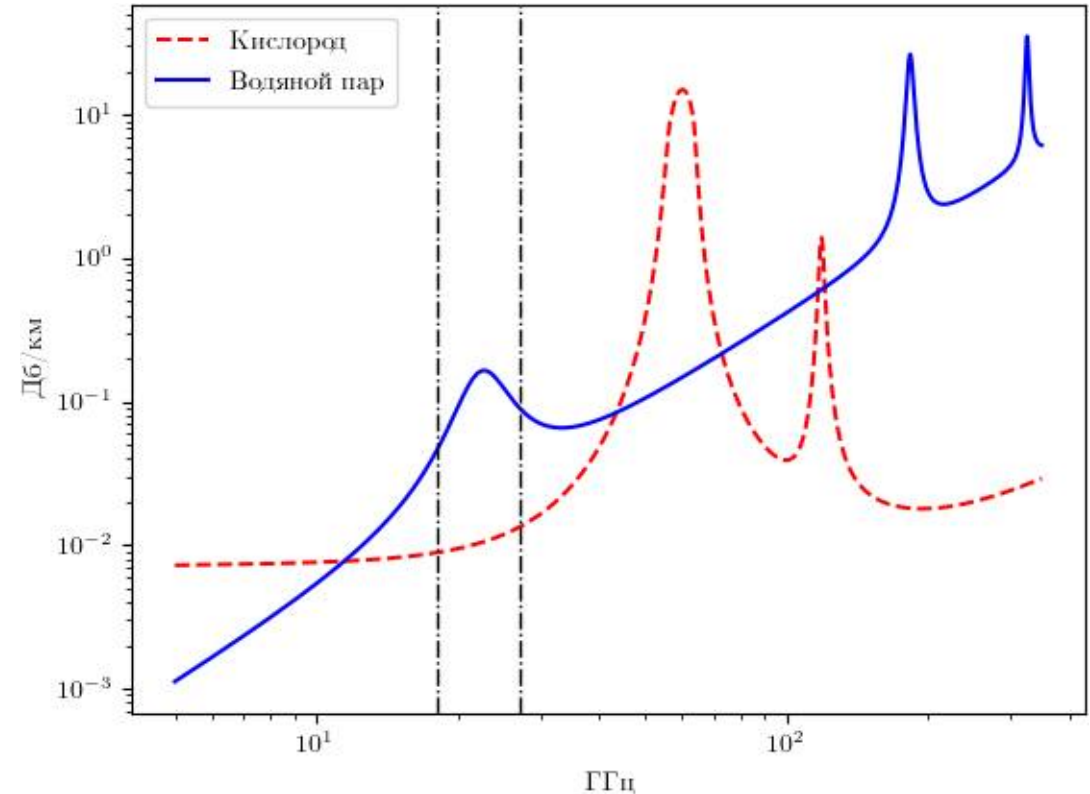


Рис. 1.1. – Зависимость погонного коэфф. поглощения от частоты (стандартная атмосфера)

Cu hum/med

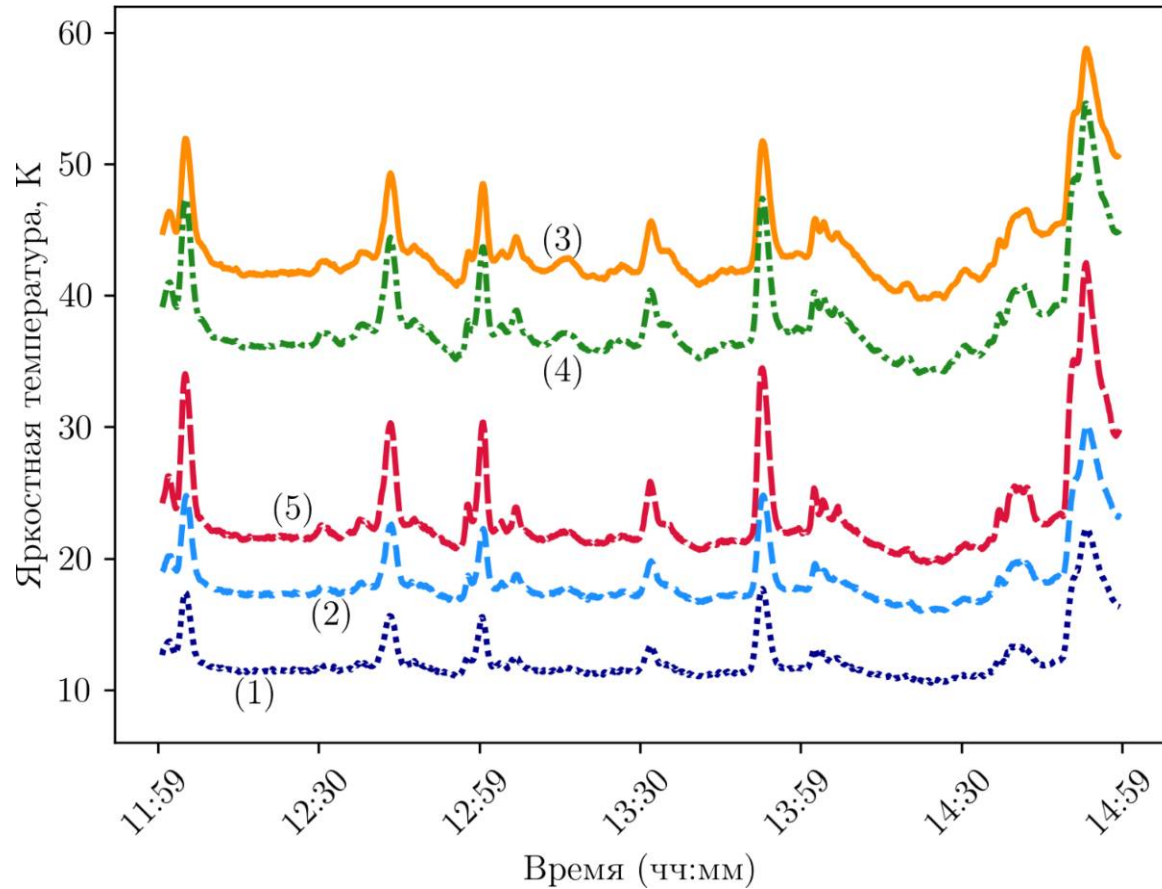


Рис. 2.6 – Временной ход яркостных температур;
(1) 18 ГГц, (2) 19.4 ГГц, (3) 22.2 ГГц,
(4) 23.6 ГГц, (5) 25.8 ГГц

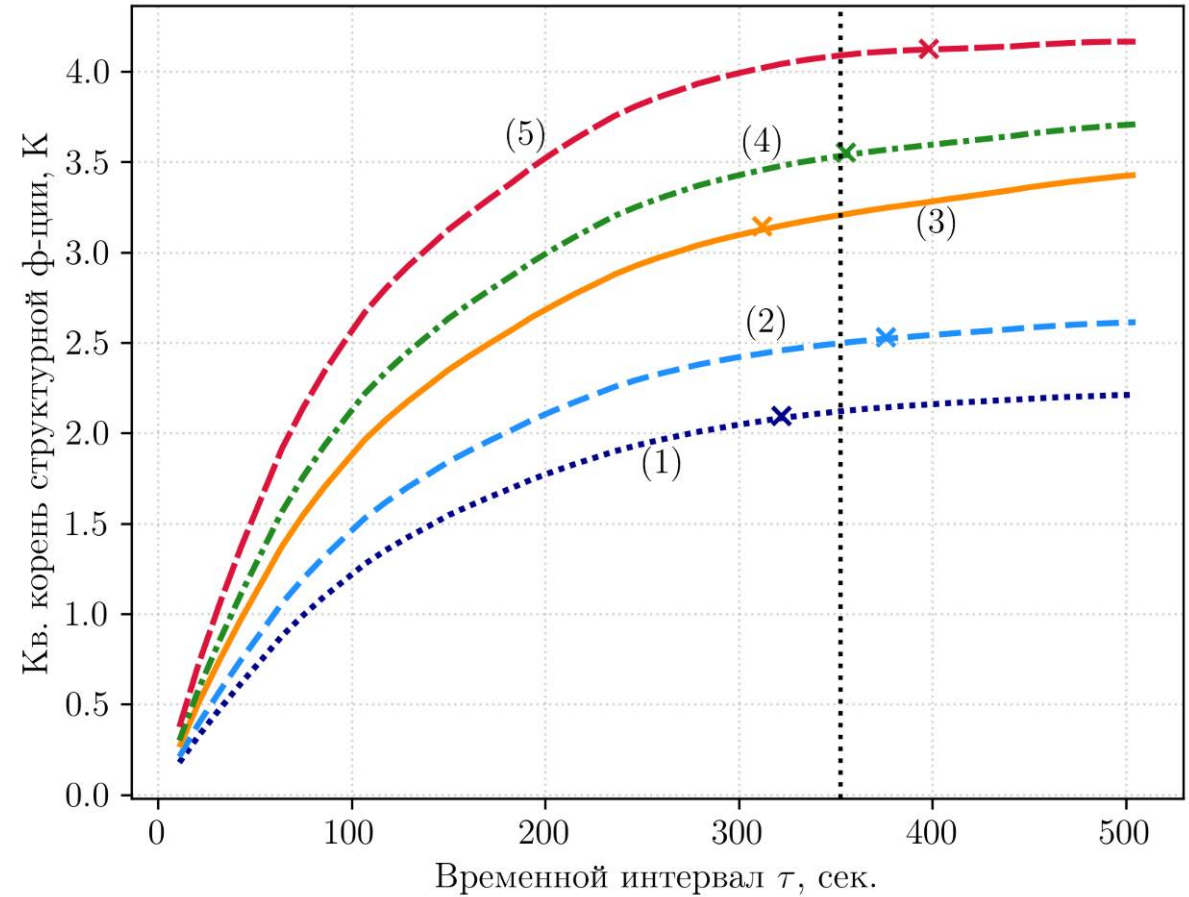


Рис. 2.7 – Зависимость интенсивности флуктуаций яркостной температуры от величины временного интервала

Cu hum/med – спектры Тя

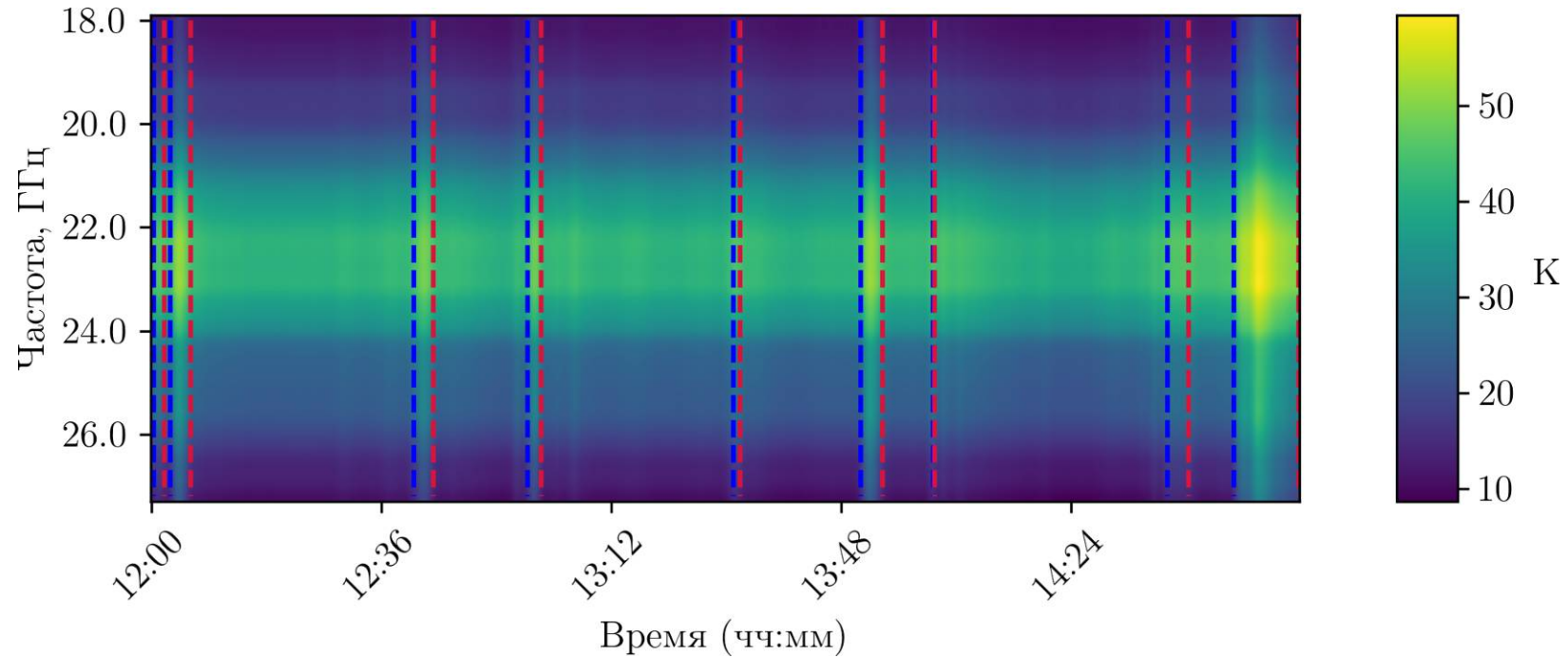


Рис. 2.8 – Временной ход яркостной температуры (спектры).
Облака Cu hum/med. Сеанс от 03 августа 2019 г., 12:00-15:00 UTC+3.

Кучевая облачность – спектры СФ

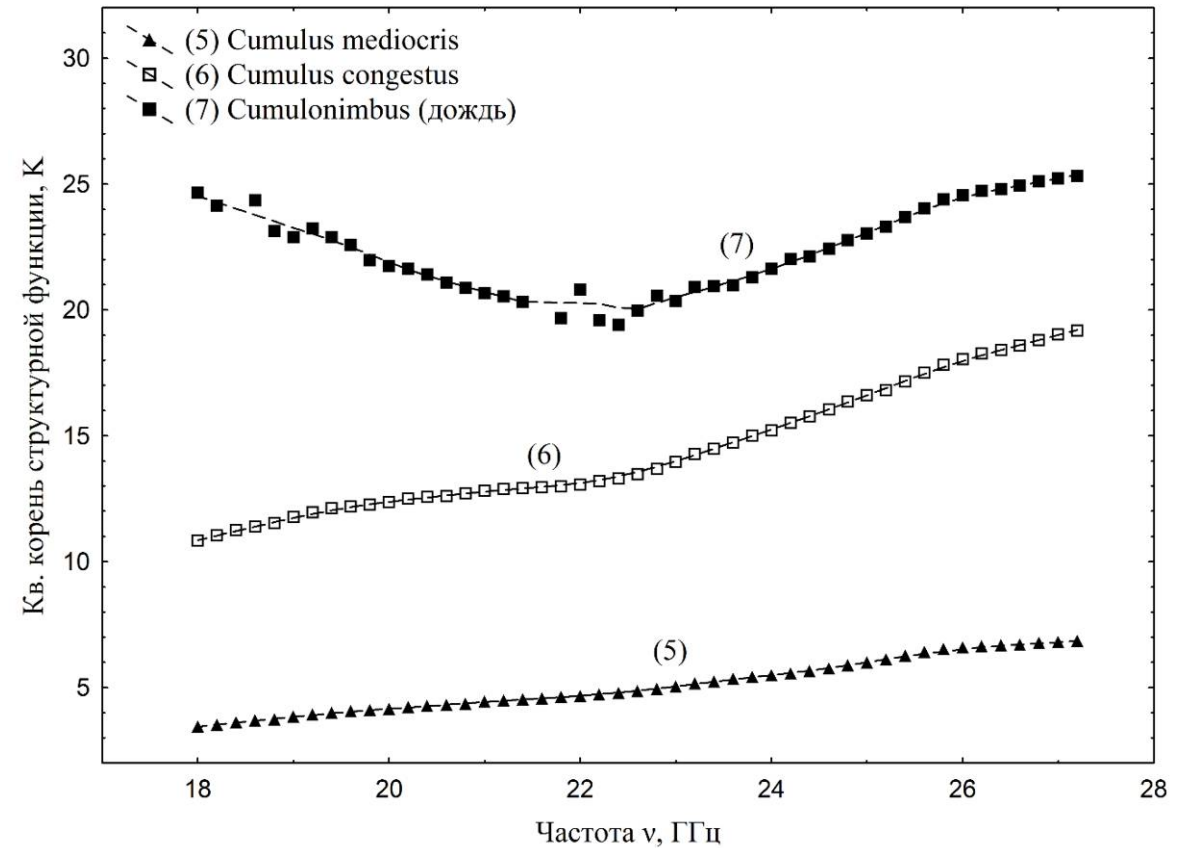
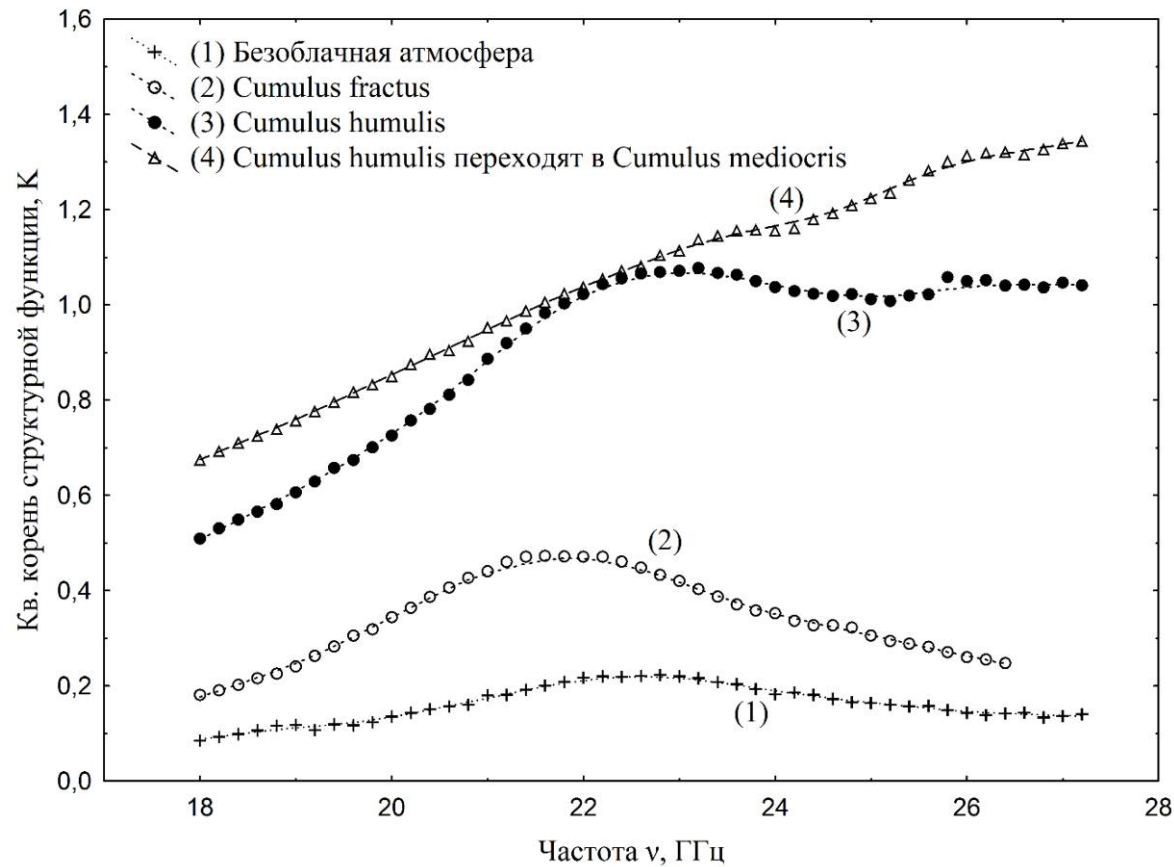


Рис. 2.9 и 2.10 – Спектры флуктуаций яркостной температуры на временном интервале сек.;
 (1) ясное небо, (2) слабо развитые по вертикали Cu fra, (3) облака «хорошей погоды» Cu hum,
 (4) Cu hum/med, (5) облака среднего вертикального развития Cu med,
 (6) мощные кучевые облака Cu cong, (7) кучево-дождевая облачность Сb

Кучевая облачность – спектры СФ

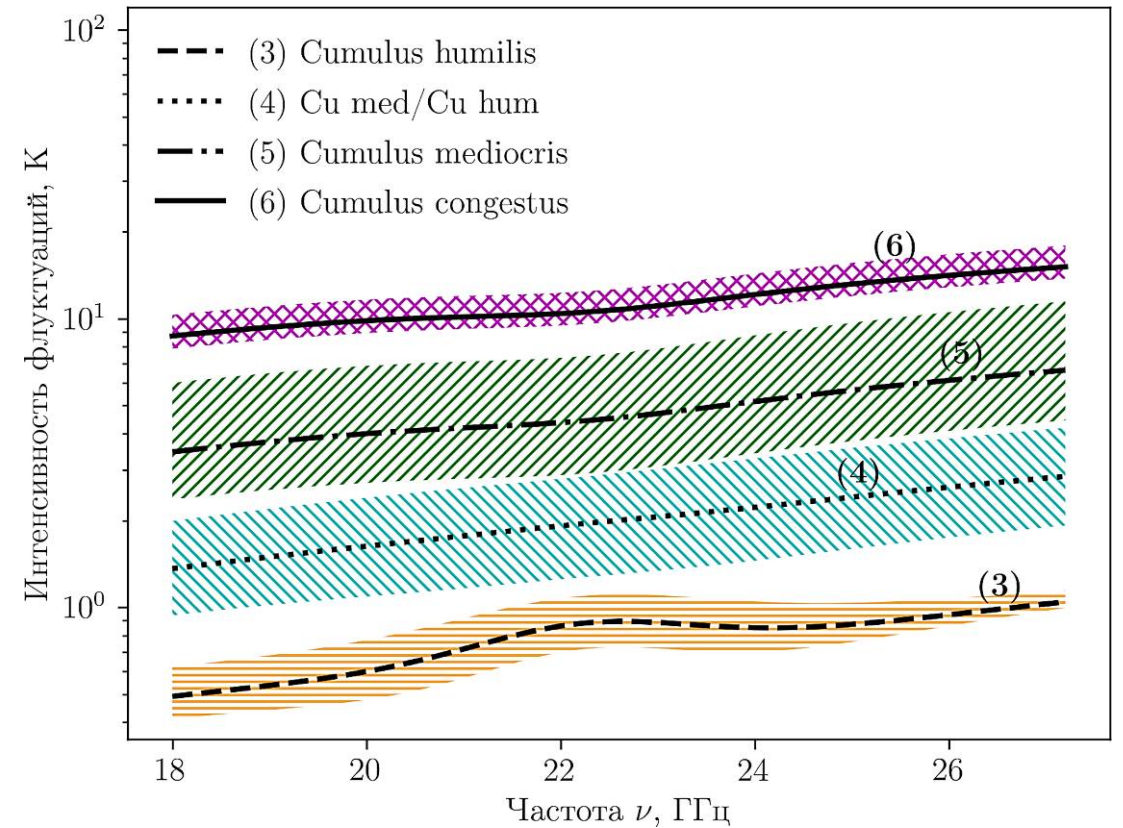
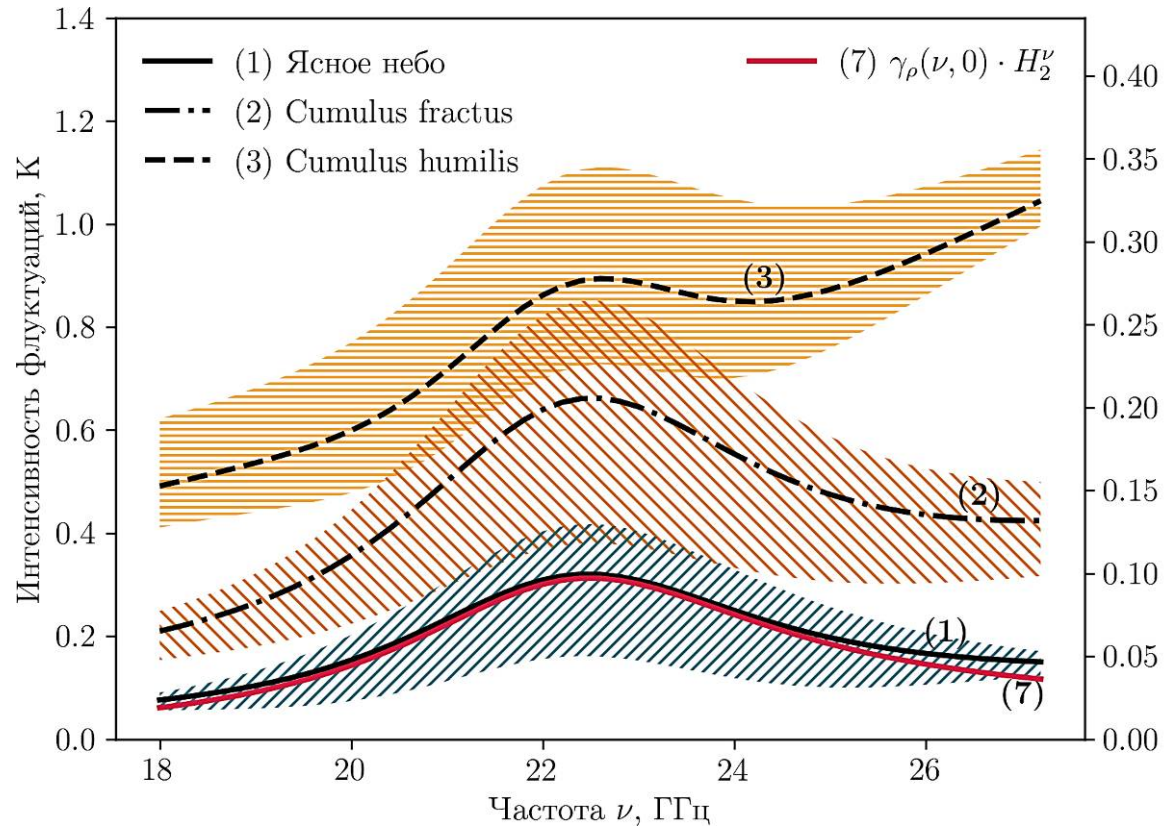


Рис. 2.11 и 2.12 – Результаты автоматической кластеризации спектров структурных функций, рассчитанных для фикс. временного интервала сек. (алгоритм иерархической агломеративной кластеризации, использующий метод Уорда для оценки расстояний между кластерами)

Основные выводы по главе 2

Положение 1. Монотонный рост структурной функции яркостной температуры на временных интервалах более 600 сек (без насыщения) свидетельствует о наличии в безоблачной атмосфере крупных горизонтально-вытянутых неоднородностей размером, превышающим 6 км. Частотный спектр интенсивности временных флуктуаций яркостной температуры нисходящего излучения ясного неба в К-диапазоне подобен частотному спектру поглощения в водяном паре приземного слоя атмосферы.

Положение 2. Анализ частотных спектров яркостной температуры и ее пространственно-временной изменчивости позволяет определить тип наблюдаемой в поле зрения наземного радиометра облачности. Зависимость структурной функции от временного интервала позволяет оценить средний горизонтальный размер облака в ансамбле.

Решение обратных задач

Глава 3

Двухчастотный метод определения Q и W

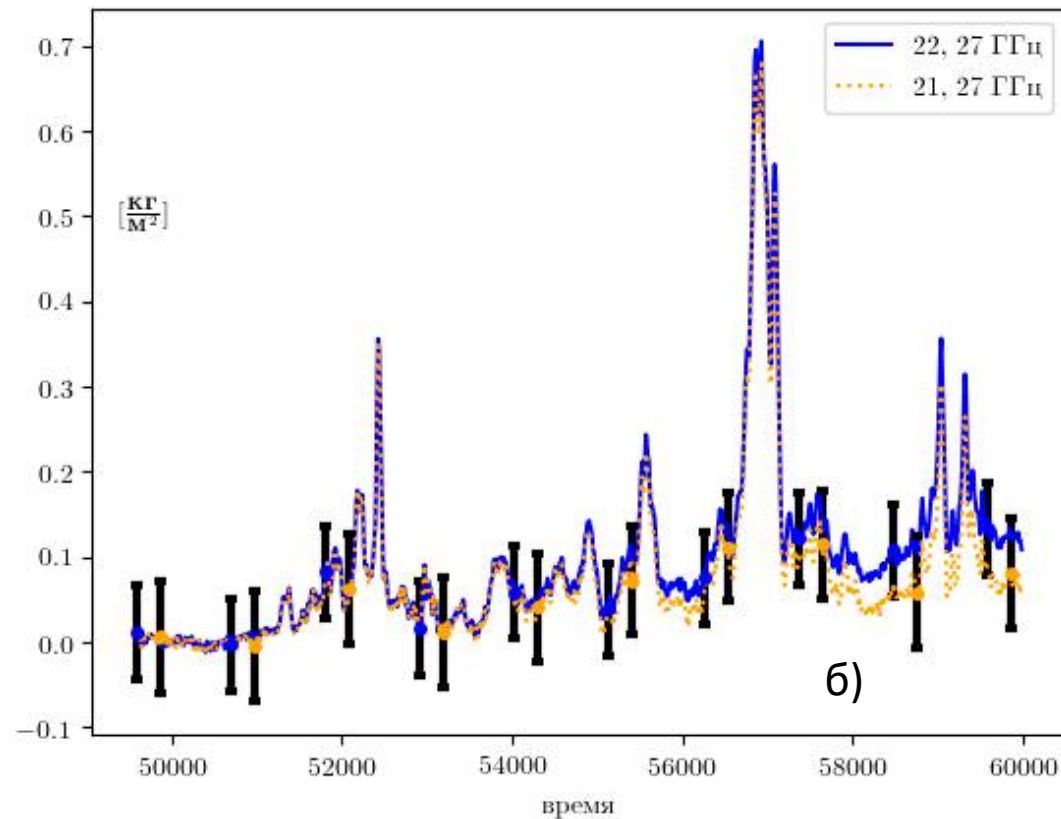
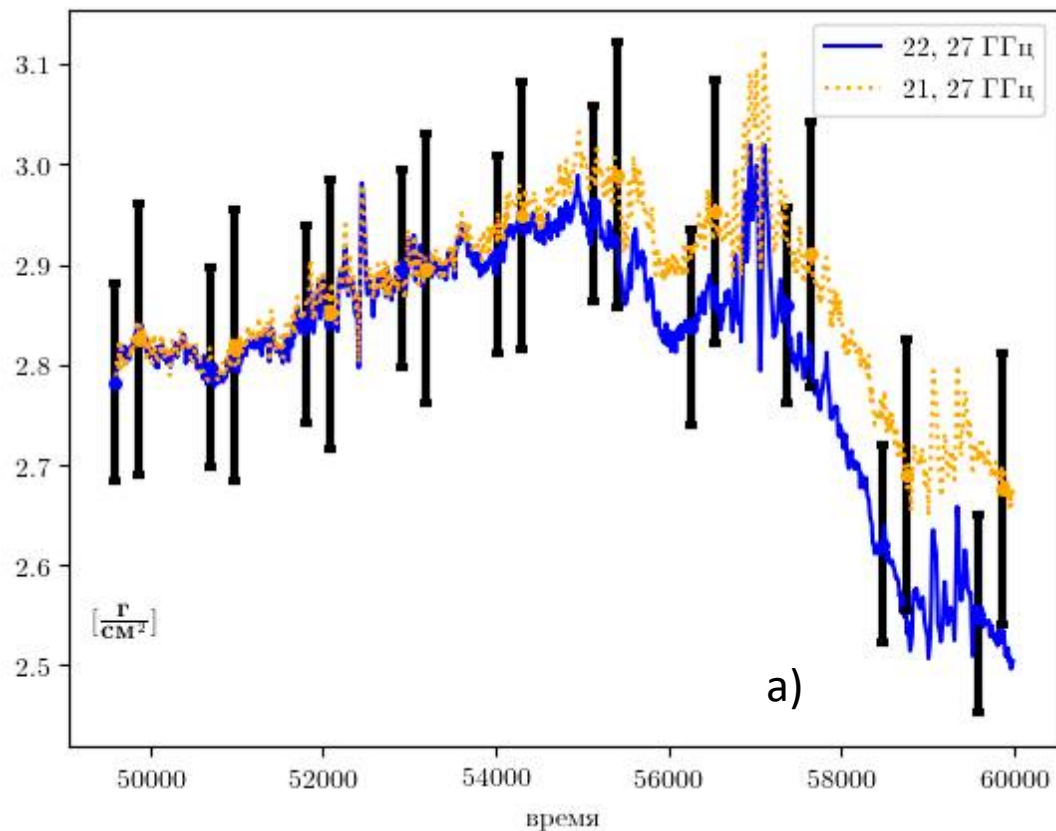


Рис. 3.1 – Расчет значений интегральных параметров влаго- и водосодержания атмосферы двухчастотным методом (21/22 и 27 ГГц); а) полная масса водяного пара, б) водозапас облаков.

Средняя эффективная температура облаков принята равной $^{\circ}\text{C}$. Значения максимальных погрешностей приведены из расчета, что ошибка определения яркостных температур составляет 1 К, а ошибка определения средней абсолютной температуры атмосферы составляет 3 К

Двухчастотный метод определения Q и W

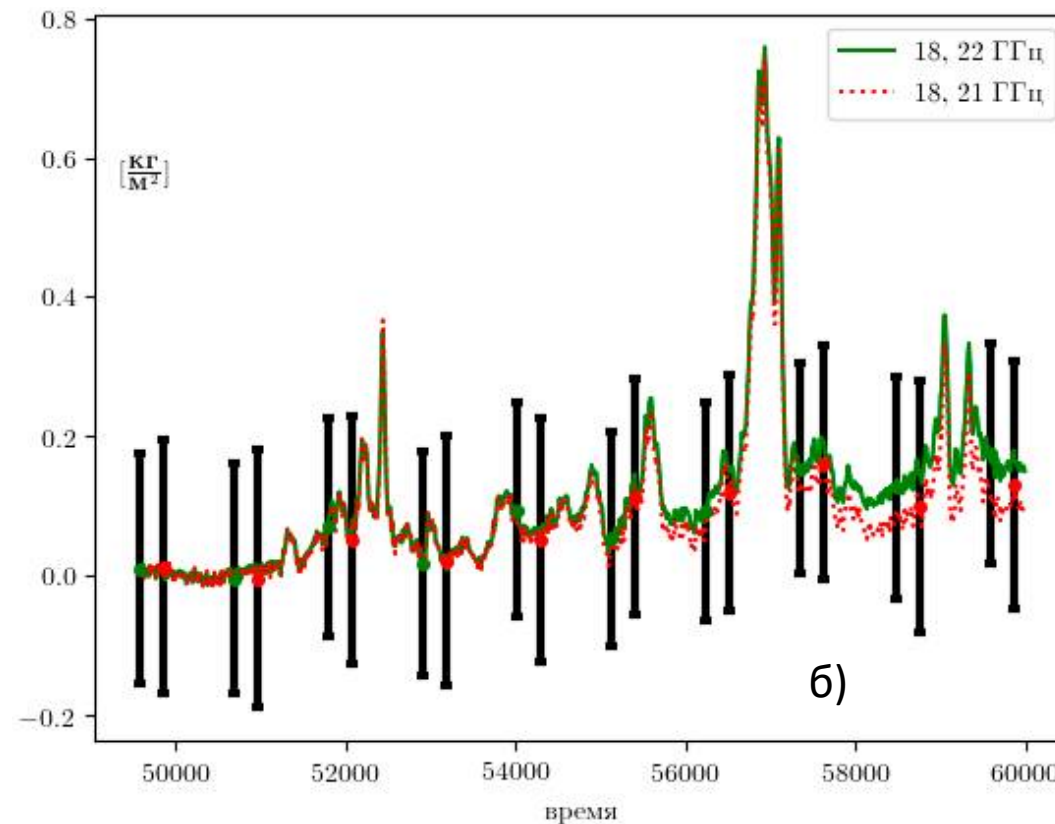
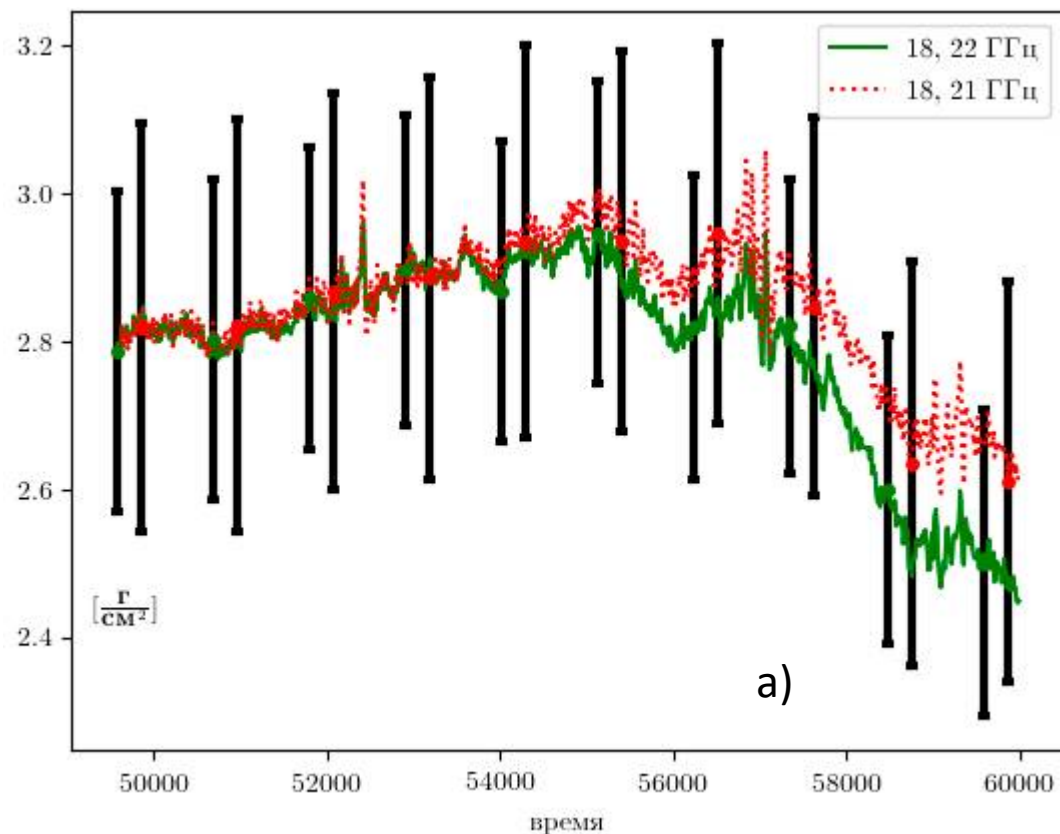


Рис. 3.2 – Расчет значений интегральных параметров влаго- и водосодержания атмосферы двухчастотным методом (18 и 21/22 ГГц); а) полная масса водяного пара, б) водозапас облаков.

Средняя эффективная температура облаков принята равной $^{\circ}\text{C}$. Значения максимальных погрешностей приведены из расчета, что ошибка определения яркостных температур составляет 1 К, а ошибка определения средней абсолютной температуры атмосферы составляет 3 К

Многочастотный метод

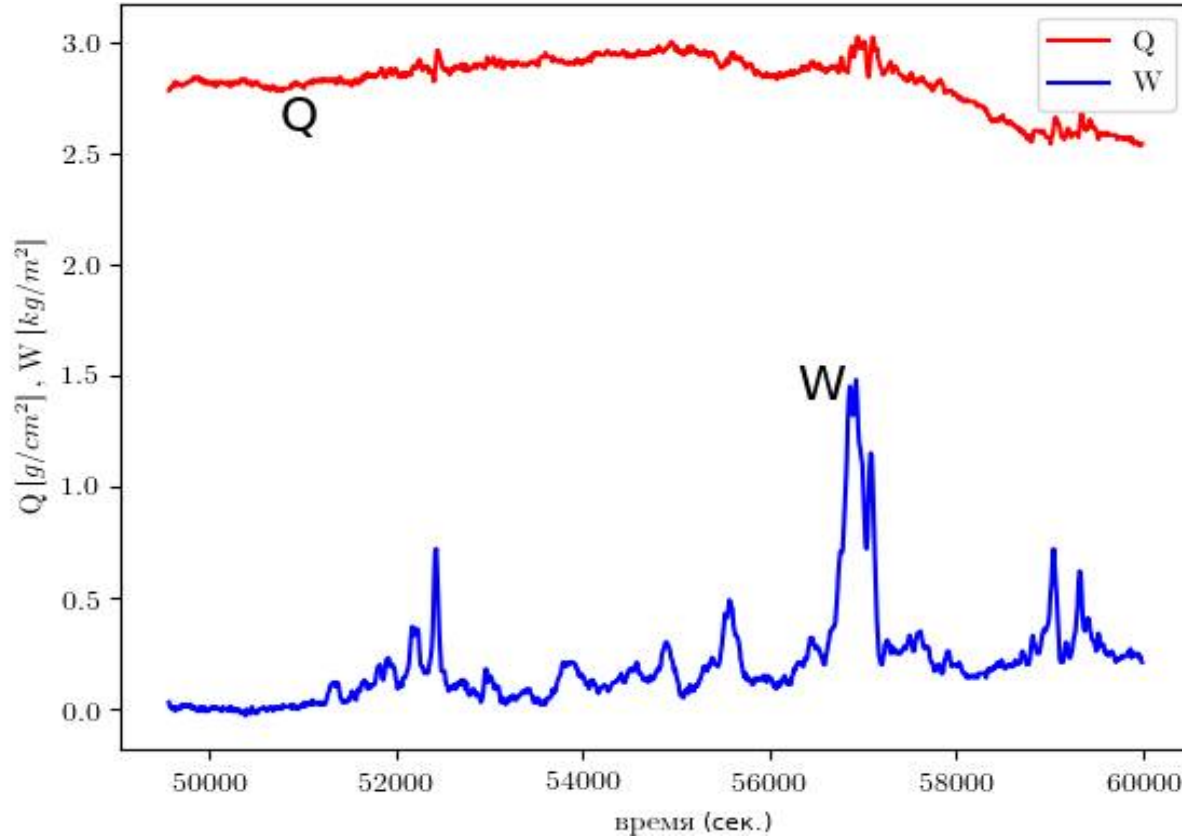


Рис. 3.3 – Результаты восстановления интегральных параметров влаго- и водосодержания многочастотным методом на основе МНК. Сеанс от 01 августа 2017 г.

$$R(Q, W) = \sum_{j=1}^N \left(\tau_e(v_j) - f(v_j, Q, W) \right)^2 \rightarrow \min_{Q, W} \quad (3.1)$$

Где

$$f(v_j, Q, W) = \tau_o^*(v_j) + k_\rho(v_j) \cdot Q + k_\omega(v_j, t_\omega) \cdot W.$$

Стационарные точки функции :

$$\sum_{j=1}^N \left(\tau_e(v_j) - f(v_j, Q, W) \right) \frac{\partial f(v_j, Q, W)}{\partial Q} = 0,$$

$$\sum_{j=1}^N \left(\tau_e(v_j) - f(v_j, Q, W) \right) \frac{\partial f(v_j, Q, W)}{\partial W} = 0,$$

Оценка максимальных погрешностей

Рассмотрим искомые интегральные параметры и как косвенно измеряемые величины, на погрешность измерения которых оказывают влияние ошибки в оценках на средние эффективные температуры и , а также ошибки при измерении (и калибровке) спектров . Таким образом, например, , где – среднее значение, а – случайная ошибка. Аналогично можем записать для искомых параметров и . Если известны средние значения и , то максимально возможные и найдем по методу оценки максимальных погрешностей

$$\Delta Q = \pm \bar{Q} \cdot \sqrt{A+B+C}, \quad (3.2)$$

$$A = \sum_{j=1}^{\Gamma} \left[\frac{\partial \ln Q}{\partial T_m^\downarrow(\nu_j)} \bigg|_{\Gamma} \Delta T_m^\downarrow(\nu_j) \right]^2, \quad B = \sum_{j=1}^N \left[\frac{\partial \ln Q}{\partial T_{av}^*(\nu_j)} \bigg|_{\Gamma} \Delta T_{av}^*(\nu_j) \right] \left[\frac{\partial \ln Q}{\partial t_\omega} \bigg|_{\Gamma} \Delta t_\omega \right]^2.$$

Для W аналогично (3.2). Здесь Q, W – общее решение задачи (3.1) относительно параметров , и , а также , и . Символом обозначается список конкретных числовых значений этих параметров.

Оценка максимальных погрешностей

Таблица 3.1. Модули величин максимальных погрешностей ρ и σ при ± 3 К, $T = 0 \pm 5^\circ\text{C}$ и $T = -2 \pm 5^\circ\text{C}$ в различных условиях облачности

Условия	ρ , г/см ²	σ , кг/м ²	(22.2), нп	(27.2), нп	ρ , г/см ²	σ , кг/м ²
(1)	1.58	0.01	0.14	0.07	0.08	0.03
(2)	1.71	0.15	0.17	0.10	0.09	0.04
(3)	1.99	0.52	0.23	0.17	0.10	0.08
(4)	2.28	4.70	0.73	0.87	0.17	0.71

В таблице 1 представлен анализ максимальных погрешностей ρ и σ в диапазоне частот от 18 до 27.2 ГГц (шаг по ν составляет 0.2 ГГц) при $T = 15^\circ\text{C}$, $p = 1013$ мбар и $\rho = 7.5$ г/м³ для различных условий облачности: 1 – отсутствие облачности; 2 – облака cumulus fractus/humilis, слабо развитые по вертикали; 3 – кучевые облака cumulus humilis/mediocris; 4 – мощные кучевые облака cumulus congestus, сильно развитые по вертикали. Для восстановления используется многочастотный метод.

Основные выводы по главе 3

1. В настоящее время границы применимости двухчастотного метода при решении обратной задачи восстановления интегральных параметров влаго- и водосодержания атмосферы в заданной подспутниковой точке определяются преимущественно выбором пары частот и оптической толщиной τ наблюдаемой атмосферы, которая, по довольно грубой оценке, должна быть не более чем ~ 1.5 нп (при больших значениях поглощения точность двухчастотного метода значительно ухудшается). Погрешность измерения яркостной температуры излучения при этом должна быть минимальной, что, однако, не является проблемой для современной аппаратуры с уровнем флуктуационной чувствительности меньше десятых долей градуса.
2. При использовании комбинации частотных каналов 22.2 и 36 ГГц, на уровне атмосферного поглощения $\tau(36) = 0.7$ нп (около 3 дБ) в последнем, даже при значительных ошибках, допущенных в таких модельных параметрах как средняя абсолютная температура атмосферы ($\pm 10^\circ\text{C}$) и эффективная температура слоя облачности ($\pm 5^\circ\text{C}$), двухчастотный метод позволяет оценить и в пределах 15% точности, если яркостная температура в этих каналах измерена с минимальной погрешностью.

СВЧ-радиометрическое зондирование облачной атмосферы из космоса

Глава 4

Модель Планка

По результатам обработки обширной базы стереоскопических фотографий облачности в районе полуострова Флорида, США (V.G. Plank, 1969), была предложена следующая модель

$$N_t = \int_{D_{min}}^{D_{max}} N dD = \frac{K}{\alpha} (e^{-\alpha D_{min}} - e^{-\alpha D_{max}}) \quad (4.1)$$

где D – эквивалентный диаметр облака (км), N – количество облаков с диаметрами в интервале dD от D до $D + dD$ (км⁻¹), D_{min} и D_{max} – минимальный и максимальный диаметры облаков в ансамбле (км), K – нормировочный коэффициент (км⁻¹), α – параметр, зависящий от времени суток и различных локальных климатических условий (км⁻¹).

Общее количество облаков в ансамбле

$$N_t = \int_{D_{min}}^{D_{max}} N dD = \frac{K}{\alpha} (e^{-\alpha D_{min}} - e^{-\alpha D_{max}})$$

или

$$N_t = \sum_{D \geq D_{min}}^{D \leq D_{max}} N_t^*(D, \epsilon)$$

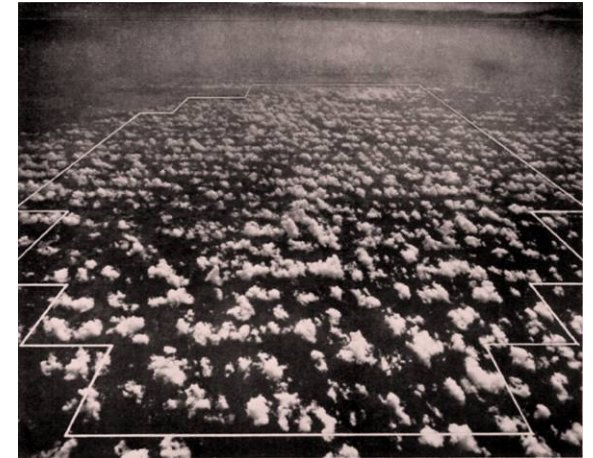
Суммарная площадь, занимаемая облаками

$$S_t = \int_{D_{min}}^{D_{max}} \frac{\pi D^2}{4} N dD = \int_{D_{min}}^{D_{max}} \frac{\pi K D^2}{4} e^{-\alpha D} dD$$

или

$$S_t = \sum_{D \geq D_{min}}^{D \leq D_{max}} S_t^*(D, \epsilon)$$

где ϵ выбирается из отрезка $[0, 1]$ с некоторым установленным шагом



Снимок от 12 августа 1957 г., 09:44 EST. Флорида, США. Выделенная область составляет 580 кв. миль

Параметры модели Планка

Можно показать, что

$$S_t = \frac{\pi K \chi}{2 \alpha^3}, \quad (4.2)$$

где

$$\chi = -e^{-\alpha D_{max}} \left[\frac{(\alpha D_{max})^2}{2} + \alpha D_{max} + 1 \right] + e^{-\alpha D_{min}} \left[\frac{(\alpha D_{min})^2}{2} + \alpha D_{min} + 1 \right].$$

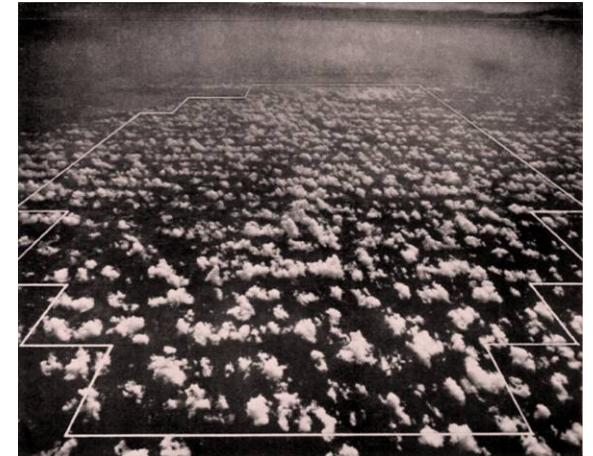
Пусть A – площадь атмосферной ячейки, a , где a – доля неба, покрытого облаками, причем $a = \frac{K}{\pi \chi}$. Тогда

$$K = \frac{2 \alpha^3 p \cdot A}{\pi \chi}. \quad (4.3)$$

Анализ накопленной базы снимков позволил также выявить взаимосвязь между эквивалентным диаметром облака D и его мощностью (вертикальной протяженностью) H

$$H = \eta D \left(\frac{D}{D_{max}} \right)^\beta, \quad (4.4)$$

где η и β – безразмерные параметры, зависящие от текущих погодных условий.



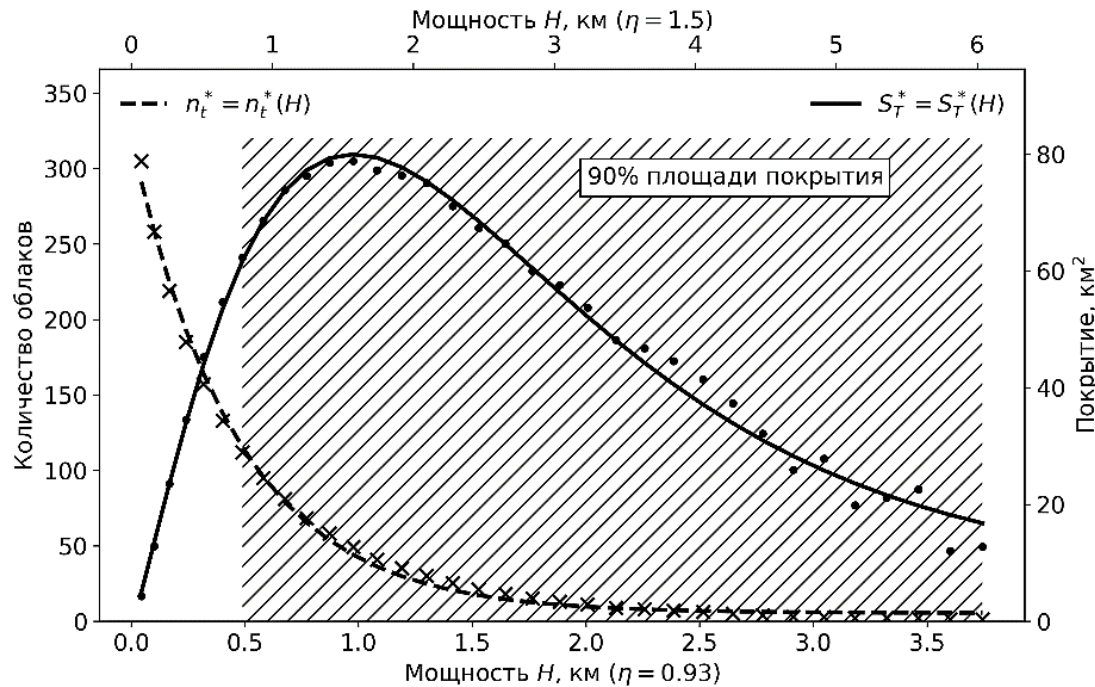
Снимок от 12 августа 1957 г.,
09:44 EST. Флорида, США.
Выделенная область составляет
580 кв. миль

Типовые случаи

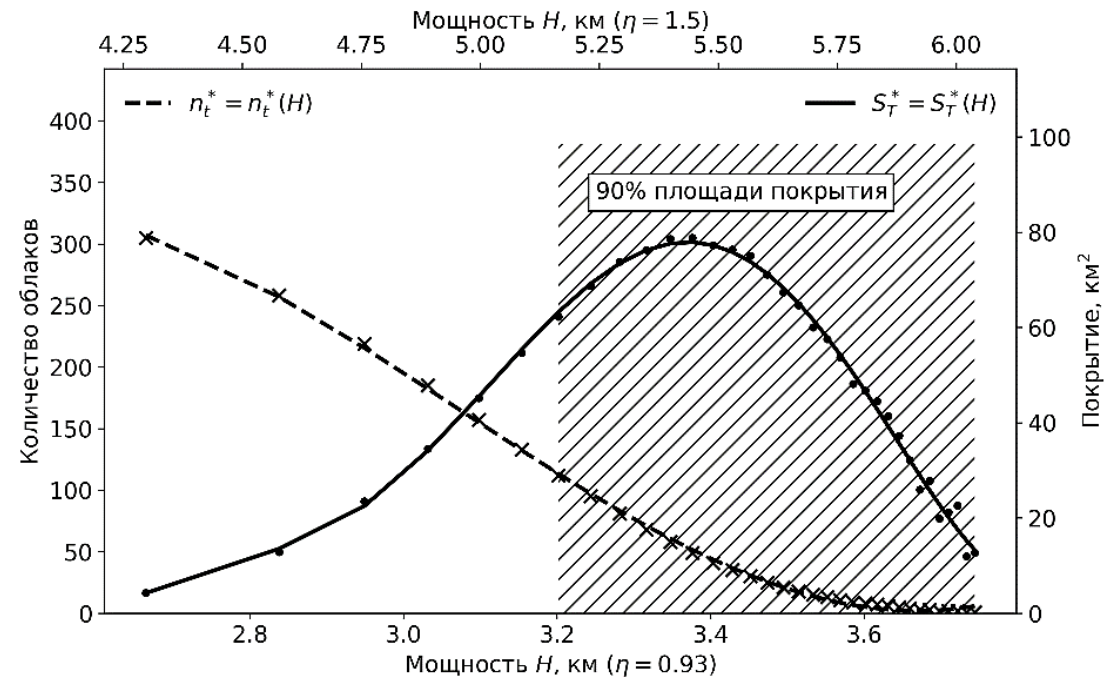
Таблица 4.1. Параметры облачных полей

Код	α , км	D_{\max} , км	D_{\min} , км	η , безразм.	β , безразм.	H_{\min} , км	ρ , %
T1	9.07	0.805	0.015	0.89	0.0	0.671	6.2
T2	4.412	1.126	0.015	0.97	0.0	0.701	18
T3	2.361	2.092	0.015	0.93	-0.1	0.823	26.2
T4	2.703	2.094	0.023	0.8	0.0	0.914	30.9
T5	2.051	2.574	0.023	0.85	-0.13	1.113	34.9
T6	1.398	3.376	0.030	0.93	-0.1	1.067	47.7
T7	1.35	3.733	0.046	1.2	0.0	1.250	30.9
T8	1.485	4.020	0.061	1.2	0.4	1.372	18.5
T9	2.485	2.656	0.046	1.3	0.3	1.402	7.2
L1	3.853	1.448	0.015	0.98	0.0	0.549	42.1
L2	1.411	4.026	0.023	0.93	0.3	1.219	64.2
L3	1.485	4.020	0.030	0.76	-0.3	1.372	29

Моделирование поля разрывной облачности



а) $\beta = 0.3$



б) $\beta = 0.9$

Рис. 4.1 – Модель В.Г. Планка. Случай «L2» и его модификации. Количественное распределение облаков по их вертикальной протяженности (шкала слева) и вклад облаков различной вертикальной протяженности (мощности) в суммарную площадь покрытого облаками неба (шкала справа). Здесь η – параметры модели Планка

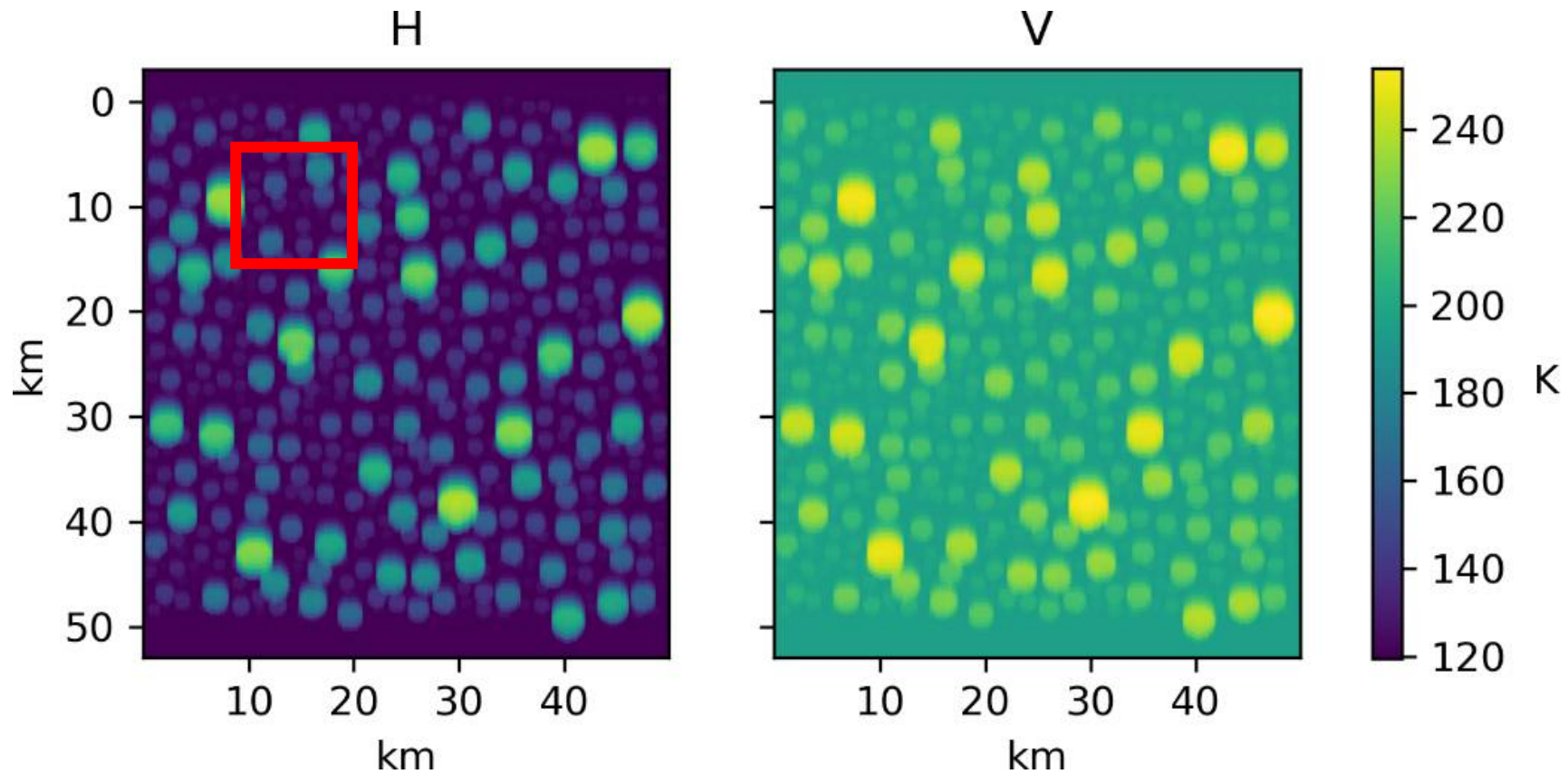
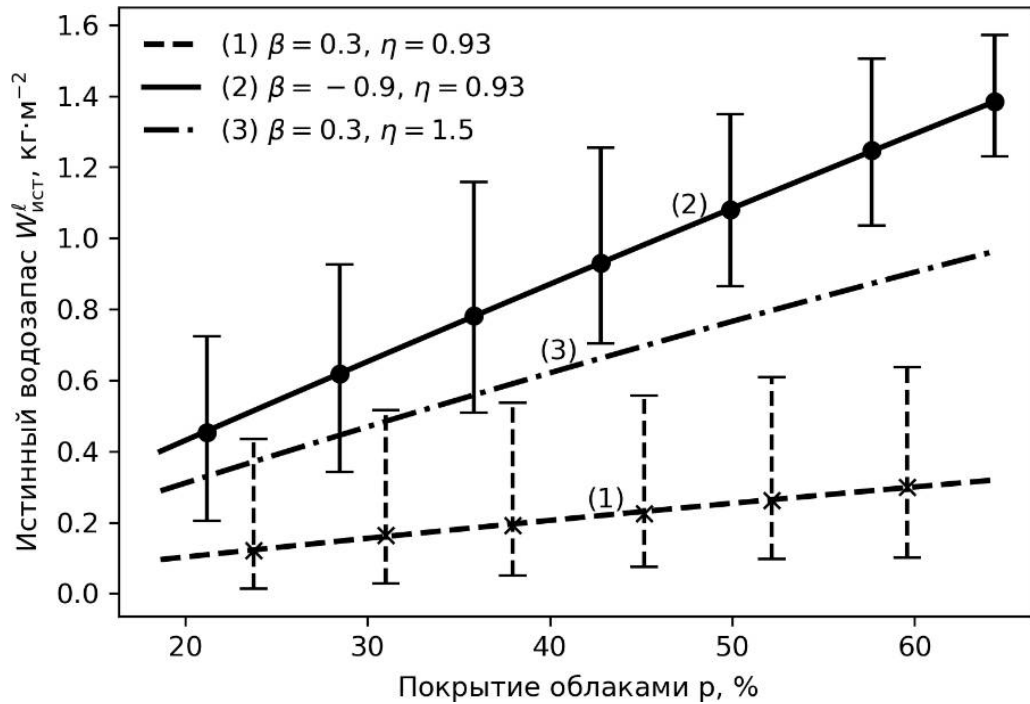
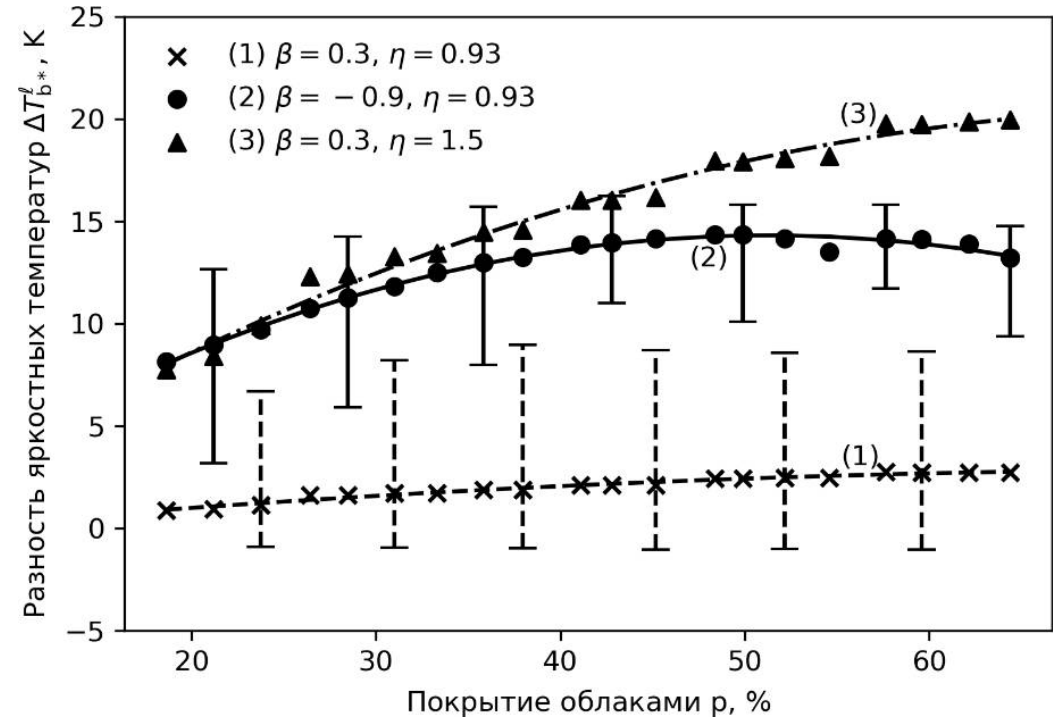


Рис. 4.2 – Яркостная температура уходящего в направлении зенитного угла θ излучения атмосферной ячейки 50x50 км с гладкой водной поверхностью при температуре 15°C в качестве подстилающей, стандартными высотными профилями метеопараметров и добавленной разорванной облачностью среднего вертикального развития типа «L2». Частота = 36 ГГц; (H) – горизонтальная поляризация, (V) – вертикальная поляризация

Случай «L2»



а)



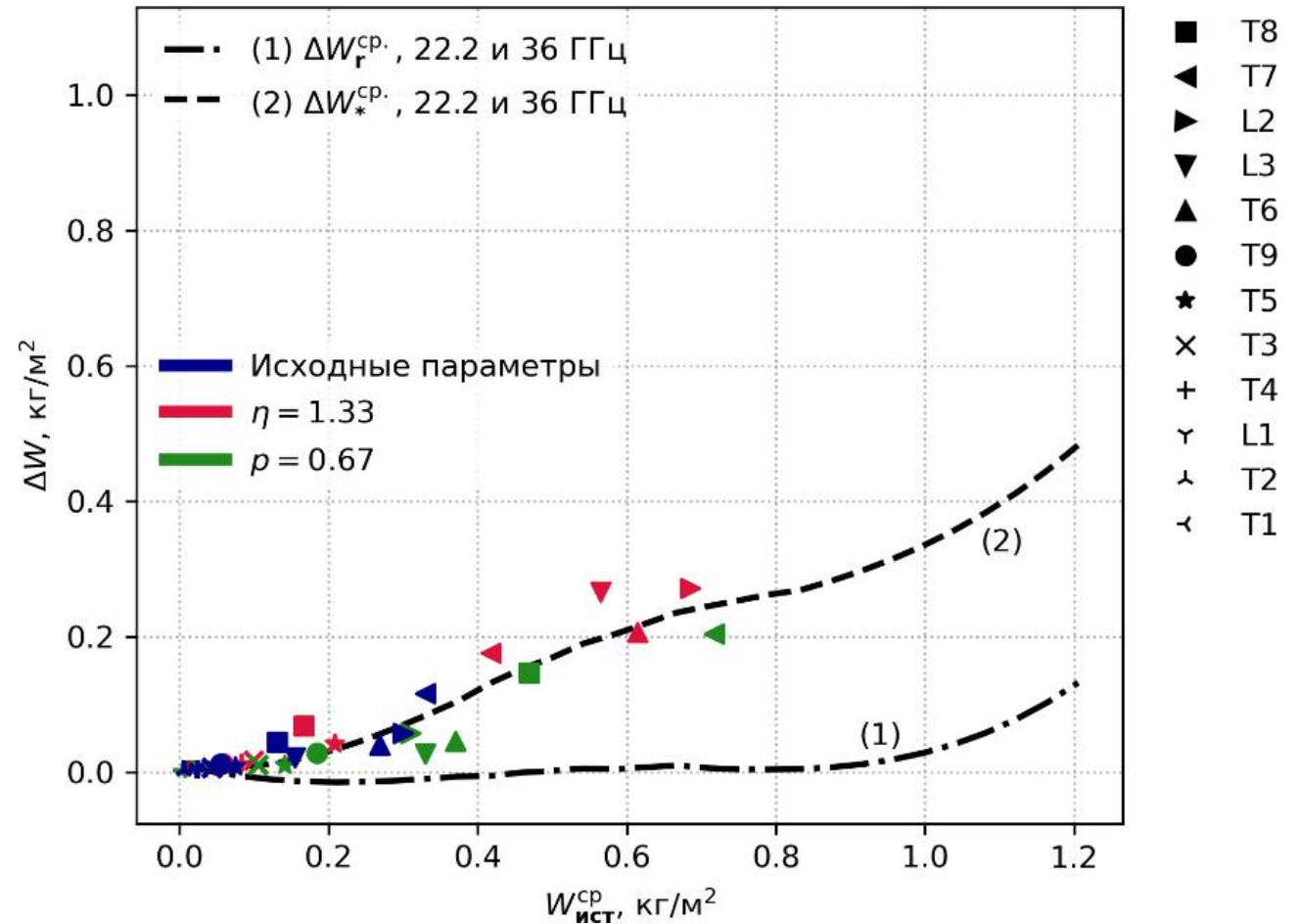
б)

Рис. 4.3 – Случай «L2» и его модификации. Элемент разрешения 10×10 км. При различных β и η в зависимости от покрытия в % : а) колебания истинного водозапаса ; б) разность яркостных температур наблюдение в надир, частота 36 ГГц.

Оценка систематических ошибок

Рис. 4.4 – Зависимость ошибок (кривая 1) и (кривая 2) от величины истинного водозапаса для типов облачности «L1»-«L3», «T1»-«T9» и модифицированных. Элемент разрешения $n \times n = 10 \times 10$ км

Параметр α – доля покрытого облаками неба. Как α , так и β отражают ошибки двухчастотного метода (22.2 и 36 ГГц) при восстановлении среднего по области $n \times n$ водосодержания, однако, β содержит дополнительную величину ошибки, обусловленную потерей информации о пространственной структуре облачности вследствие усреднения поля яркостной температуры в элементе разрешения, в отличие от



Основные выводы по главе 4

Положение 3. Яркостная температура уходящего излучения разрывной облачности, регистрируемая в элементе разрешения антенны спутникового микроволнового радиометра, меньше яркостной температуры эквивалентного по водозапасу сплошного облачного слоя. В случае мощных, развитых по вертикали кучевых облаков такое различие становится существенным и достигает 10 К.

Положение 4. На ошибки восстановления влагозапаса и водозапаса, связанные с нелинейностью зависимости яркостной температуры от влажности и термодинамической температуры облака, оказывает влияние характер пространственного распределения облаков в элементе разрешения антенны спутникового микроволнового радиометра. Для случая кучевых облаков при размере элемента разрешения от 10x10 км относительная ошибка восстановления интегральных параметров может превышать 10-15%.

Новизна

- В процессе проведения 4-х летнего цикла непрерывных наблюдений получены новые данные о сезонной изменчивости спектра яркостной температуры атмосферы и восстановленных значениях интегральных параметров влаго- и водосодержания.
- В широком диапазоне погодных условий впервые получены частотные спектры временных флуктуаций яркостной температуры на интервалах от 100 до 600 сек. Впервые показано, что частотный спектр интенсивности временных флуктуаций яркостной температуры нисходящего излучения ясного неба в К-диапазоне повторяет форму частотного спектра поглощения в водяном паре приземного слоя атмосферы.
- С использованием средств языков C++, Python и программно-аппаратной архитектуры CUDA разработаны программные библиотеки для решения прямой и некоторых обратных задач ДЗА. Разработан алгоритм автоматической классификации сеансов СВЧ-радиометрических измерений по типу наблюдаемой облачности путем анализа частотных спектров структурной функции яркостной температуры на различных временных интервалах.
- Впервые рассмотрено влияние отдельных параметров, характеризующих пространственное распределение кучевых облаков (согласно модели Планка), на ошибки восстановления полной массы водяного пара и водозапаса облаков по усредненному в поле зрения спутникового микроволнового радиометра радиотепловому излучению.

Практическая значимость

- Полученные в рамках проведенного исследования данные о флуктуациях яркостной температуры микроволнового излучения могут быть полезны для оценки пространственно-временных флуктуаций фазового запаздывания сигналов в атмосфере.
- Результаты работы могут найти применение в радиоастрономии для учета влияния атмосферы при радиоинтерферометрических измерениях и при наблюдениях источников излучения в режиме диаграммной модуляции. Полученные данные могут представлять интерес для спутниковых систем связи и навигации, радиолокационной интерферометрии и интерферометрии со сверхдлинной базой.
- Разработанные автором программные инструменты применяются в ИРЭ РАН и ФИРЭ РАН для обработки и анализа данных СВЧ-радиометрических измерений, модельного расчета спектров поглощения и яркостной температуры атмосферы. Разработанные алгоритмы могут быть использованы при создании программного обеспечения для обработки и интерпретации спутниковых данных.
- Полученные в диссертационной работе результаты свидетельствуют о возможности существенного повышения эффективности решения обратных задач восстановления температурно-влажностных профилей, а также влаго- и водозапаса атмосферы по данным СВЧ-радиометрических наблюдений за счет введения в расчетные модели температур на вершине облаков и на уровне подстилающей поверхности, высоты верхней кромки облаков, бинарной маски облачности и пространственного распределения ее фазового состава в поле зрения антенны.

Личный вклад

- Результаты, изложенные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно или на равных правах с соавторами. Автор принимал активное участие в постановке и проведении натурных экспериментов, обработке экспериментальных данных. Автору диссертации принадлежит разработка программных инструментов для калибровки данных измерений, расчета частотных спектров структурных функций яркостной температуры, расчета пространственных полей яркостной температуры излучения облачной атмосферы с учетом заданной динамики 3D распределений ее метеорологических параметров, решения обратной задачи восстановления влаго- и водосодержания атмосферы.
- Диссертационная работа выполнялась в соответствии с научными планами Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН в рамках государственного задания по теме № 0030-2019-0008 «Космос», наименование НИР «Разработка радиофизических методов и средств для исследования и дистанционного зондирования природных объектов, околоземного космического пространства и объектов Солнечной системы». Автор являлся основным исполнителем работ в рамках проекта Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) № 20-02-00703 А «Развитие радиофизических методов дистанционного зондирования Земли».

Основные результаты диссертационной работы

- Проведен 4-х летний цикл непрерывных наблюдений нисходящего излучения атмосферы в области резонанса поглощения водяного пара 18–27.2 ГГц. В широком диапазоне временных интервалов до 15-20 минут и погодных условий, в том числе для условий ясного неба и кучевой облачности различного вертикального развития впервые получены частотные спектры интенсивности временных флуктуаций яркостной температуры. Установлено, что в условиях отсутствия облачности или при появлении кучевых облаков слабого вертикального развития частотная зависимость интенсивности флуктуаций подобна спектру коэффициента поглощения в водяном паре приземного слоя атмосферы. Строго монотонный рост с увеличением временного интервала до 600 сек. (без насыщения), который имеет место при ясной погоде и может быть аппроксимирован, к примеру, степенной зависимостью, свидетельствует о наличии в безоблачной атмосфере крупномасштабных горизонтально вытянутых неоднородностей – «блинов» размером 10 км и более.
- В условиях развитой кучевой облачности поглощение и уровень яркостной температуры за счет жидких капель заметно возрастают. Характер кривых как в зависимости от временного интервала, так и от частоты существенно отличается от случая ясного неба. На всех временных интервалах наблюдается значительное увеличение интенсивности флуктуаций яркостной температуры. При этом вклад облаков увеличивается с ростом частоты, что приводит к смещению максимума по в сторону более высокой частоты 27.2 ГГц. Зависимость от временного интервала демонстрирует быстрый рост интенсивности флуктуаций до величины в среднем 75-100 сек., но затем существенное замедление при 200-300 сек. Принимая гипотезу Тейлора и горизонтальную составляющую скорости ветра в тропосфере равной 10 м/с, имеем неоднородности размером 2-3 км, что соответствует средней протяженности кучевых облаков по горизонтали.
- Подтверждаются результаты ряда теоретических и последующих экспериментальных исследований: пространственно-временная изменчивость полей водяного пара и влажности ответственна за флуктуации микроволнового излучения атмосферы. В то же время близость формы частотных спектров для случая ясной погоды и коэффициента поглощения в водяном паре приземного слоя свидетельствует об отсутствии в безоблачной атмосфере значительного влияния высоты на относительные флуктуации влажности.

- Предложен подход к исследованию систематических ошибок восстановления интегральных параметров влагосодержания облачной атмосферы СВЧ-радиометрическим методом, возникающих за счет использования при решении обратной задачи однородной или горизонтально-однородной плоскостройной моделей облачного поля, которые игнорируют структурные особенности реальной облачности. Разработана и программно реализована модель трехмерной структуры случайного разрывного облачного поля и методика расчета его радиационных характеристик.
- Показано, что неучет характера пространственного распределения облаков в элементе разрешения спутникового СВЧ-радиометра от 10x10 км и при использовании комбинации частотных каналов 22.2 и 36 ГГц может приводить к относительным ошибкам восстановления интегрального водозапаса и полной массы водяного пара на уровне атмосферного поглощения лишь 0.15 нп во втором канале. Если бы элемент разрешения имел размеры 1x1 км, относительные ошибки восстановления интегральных параметров в среднем не превышали бы по модулю величины . В то же время для сплошной облачности с оптической толщиной 0.15 нп на частоте 36 ГГц вне зависимости от размеров элемента разрешения относительные ошибки составляют всего $\pm 1-2\%$.
- Полученные оценки свидетельствуют о необходимости учета пространственной структуры облачности при обработке спутниковых микроволновых данных. Дополнительные количественные и качественные данные об облаках при этом могут быть получены с помощью совместных (и согласованных) спутниковых измерений в видимом, инфракрасном и терагерцовом диапазонах. По оптическим приборам наблюдается верхний слой облачности, определяется ее маска и фазовый состав, высота и температура. Введение этих и других данных в имеющиеся расчетные модели могло бы значительно повысить точность СВЧ-радиометрического восстановления интегральных параметров влаго- и водосодержания атмосферы.

Публикации

ВАК:

1. Егоров Д.П., Кутуза Б.Г. Результаты измерений флуктуаций радиоизлучения атмосферы в резонансной области поглощения водяного пара вблизи 22.235 МГц // *Нелинейный мир*. – 2018. - Т. 16. - № 2. - С. 69-71.
2. Егоров Д.П., Кутуза Б.Г. Пространственно-временная структура яркостной температуры атмосферы в К-диапазоне при наличии кучевой облачности // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*. - 2021. - № S680. - С. 236-241.
3. Егоров Д.П., Кутуза Б.Г. Влияние кучевой облачности на флуктуации нисходящего микроволнового излучения атмосферы в области резонанса водяного пара 18-27 ГГц // *Нелинейный мир*. - 2021. - Т. 19. - № 2. - С. 5-9.
4. Егоров Д.П., Кутуза Б.Г. Влияние водяного пара и кучевой облачности на флуктуации яркостной температуры нисходящего излучения атмосферы в К-диапазоне // *Известия высших учебных заведений. Радиофизика*. - 2021. - Т. 64. - № 8-9. - С. 712-721.
5. Егоров Д.П., Илюшин Я.А., Кутуза Б.Г. Сверхвысокочастотное радиометрическое зондирование кучевой облачности при наблюдении из космоса // *Известия высших учебных заведений. Радиофизика*. - 2021. - Т. 64. - № 8-9. - С. 625-634.
6. Данилычев М.В., Егоров Д.П., Кутуза И.Б., Кутуза Б.Г. Учет данных спутникового зондирования в ИК-диапазоне при выборе СВЧ-модели облачной атмосферы // *Физические основы приборостроения*. - 2022. - Т. 11. - № 3 (45). - С. 84-91.
7. Аквилонова 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 18,0-27,2 ГГц // *Метеорология и гидрология*. - 2022. - № 12. - С. 66-77.
8. Илюшин Я.А., Егоров Д.П., Кутуза Б.Г., Копцов Я.В. СВЧ-радиометрическое картирование разорванной кучевой облачности с космического аппарата // *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии*. - 2022. - № 4. - С. 329-330.
9. Егоров Д.П., Кутуза Б.Г., Илюшин Я.А. Учет пространственной структуры облачности при СВЧ-радиометрическом восстановлении интегральных параметров влаго- и водосодержания атмосферы // *Физические основы приборостроения*. - 2023. - Т. 12. - № 1 (47). - С. 10-23.

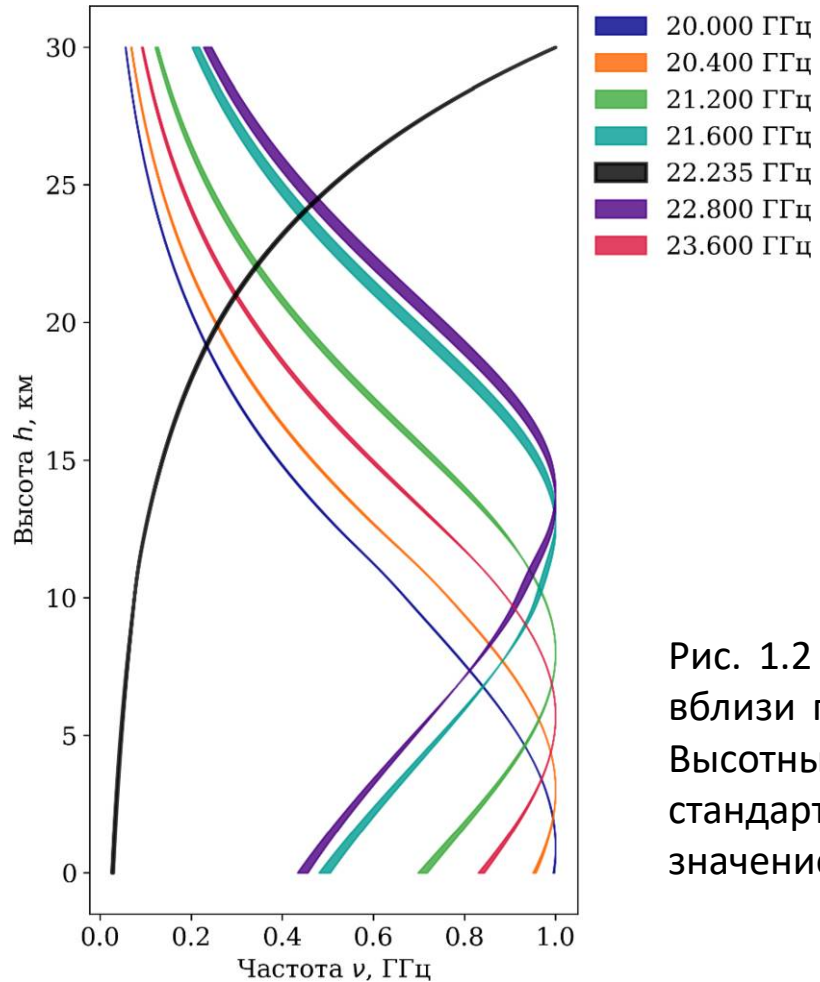
Публикации

WoS, Scopus:

1. 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. - Vol. 59. - Issue 9. - pp. 7627-7634. - DOI: 10.1109/TGRS.2020.3034533
2. Egorov D.P., Kutuza B.G. The Influence of Water Vapor and Cumulus Clouds on the Brightness-Temperature Fluctuations in the Downwelling K-Band Radiation of the Atmosphere // Radiophysics and Quantum Electronics. - 2021. - Vol. 64. - No.8-9. - pp. 641-649. - DOI: 10.1007/s11141-022-10166-3
3. Egorov D.P., Kutuza B.G., Ilyushin Y.A. Microwave Radiometric Sensing of Cumulus Cloudiness from Space // Radiophysics and Quantum Electronics. - 2021. - Vol. 64. - No.8-9. - pp. 564-572. - DOI: 10.1007/s11141-022-10159-2
4. Egorov D.P., Kutuza B.G. The influence of clouds on atmospheric radiation fluctuations in the resonance absorption band of water vapor 18-27.2 GHz // Journal of Physics: Conf. Ser. (JPCS) 1632(1):012010. - 2020. - DOI: 10.1088/1742-6596/1632/1/012010
5. Egorov D.P., Ilyushin Ya.A., Koptsov Ya.V., Kutuza B.G. Simulation of microwave spatial field of atmospheric brightness temperature under discontinuous cumulus cloudiness // Journal of Physics: Conf. Ser. (JPCS) 1991(1):012015. - 2021. - DOI: 10.1088/1742-6596/1991/1/012015
6. Egorov D.P., Kutuza B.G., Akvilonova A.B., Kravchenko O.V. Cloud species classification from video recordings // Journal of Physics: Conf. Ser. (JPCS) 2127(1):012027. - 2021. - DOI: 10.1088/1742-6596/2127/1/012027
7. Koptsov Y., Ilyushin Y., Kutuza B., Egorov D. Microwave Radiometric Mapping of Broken Cumulus Cloud Fields from Space: Numerical Simulations // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). - 2022. - 13708 LNCS. - pp. 185-198. - DOI: 10.1007/978-3-031-22941-1_13
8. Akvilonova A.B., Egorov D.P., Kutuza B.G., Smirnov M.T. Studying Characteristics of the Cloudy Atmosphere Based on Measuring Its Downwelling Microwave Radiation Spectra in the 18.0–27.2 GHz Water Vapor Resonant Absorption Band // Russian Meteorology and Hydrology. - 2022. - 47 (12). - pp. 953-961 - DOI: 10.3103/S106837392212007X
9. Cheremisin G., Egorov D., Kravchenko O., Dev A. Deep Convolutional Neural Network for Reconstructing the Cloud Phase Distribution from Level-1b MODIS Data // AIP Conference Proceedings. - 2023. - Vol. 2819. - P. 030005. - DOI: 10.1063/5.0137386
10. Egorov D.P., Kutuza B.G., Smirnov M.T. Web Portal for a Databank of Microwave Radiometric Measurements of the Atmosphere in Resonant Band of Water Vapor 18–27 GHz // Proceedings of 2019 PhotonIcs & Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS-Spring). University of Rome “La Sapienza”, Italy. 2019. - pp. 3421-3427. - DOI: 10.1109/PIERS-Spring46901.2019.9017620
11. Egorov D.P., Ilyushin Ya.A., Kutuza B.G., Koptsov Ya.V. Cloud Liquid Content Retrieval Errors Related to the Flat-layered Cloudfield Model Usage // Proceedings of 2021 PhotonIcs & Electromagnetics Research Symposium (PIERS). - pp. 1978-1984. - DOI: 10.1109/PIERS53385.2021.9695037
12. Egorov D.P., Kutuza B.G. Spatio-temporal Fluctuations in Downwelling K-band Radiation of Atmosphere in the Presence of Clouds // Proceedings of 2022 PhotonIcs & Electromagnetics Research Symposium (PIERS). - pp. 1014-1017. - DOI: 10.1109/PIERS55526.2022.9792799
13. Danilychev M.V., Egorov D.P., Kutuza B.G., Kutuza I.B. A Note on Joint Satellite Measurements of Cloudy Atmosphere in Microwave and Infrared Ranges // Proceedings of IEEE 8th All-Russian Microwave Conference, RMC. - 2022. - pp. 370-375. - DOI: 10.1109/RMC55984.2022.10079594
14. Ilyushin Ya., Egorov D., Kutuza B., Koptsov Ya. Numerical simulation of microwave radiometry sensing of broken cumulus cloud fields from space // International Radiation Symposium (IRS-2022). Thessaloniki, Greece. 4-8 July 2022.

Спасибо за внимание!

Весовые функции Стилина



$$\tau_{\rho}(v) = \int_0^{\infty} \gamma_{H_2O}(v, h) dh \approx \int_0^{\infty} S(v, h) \cdot \rho(h) dh \quad (1.3)$$

Рис. 1.2 – Весовые функции $s(v) = S(v, h)$ в зависимости от высоты h при различных v вблизи первого вращательного резонанса водяного пара 22.235 ГГц (нормированные). Высотные распределения давления и абсолютной влажности соответствуют стандартным, а профиль температуры воздуха корректируется от стандартного на значение $T_0 = 5 \dots 25 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Разметка данных

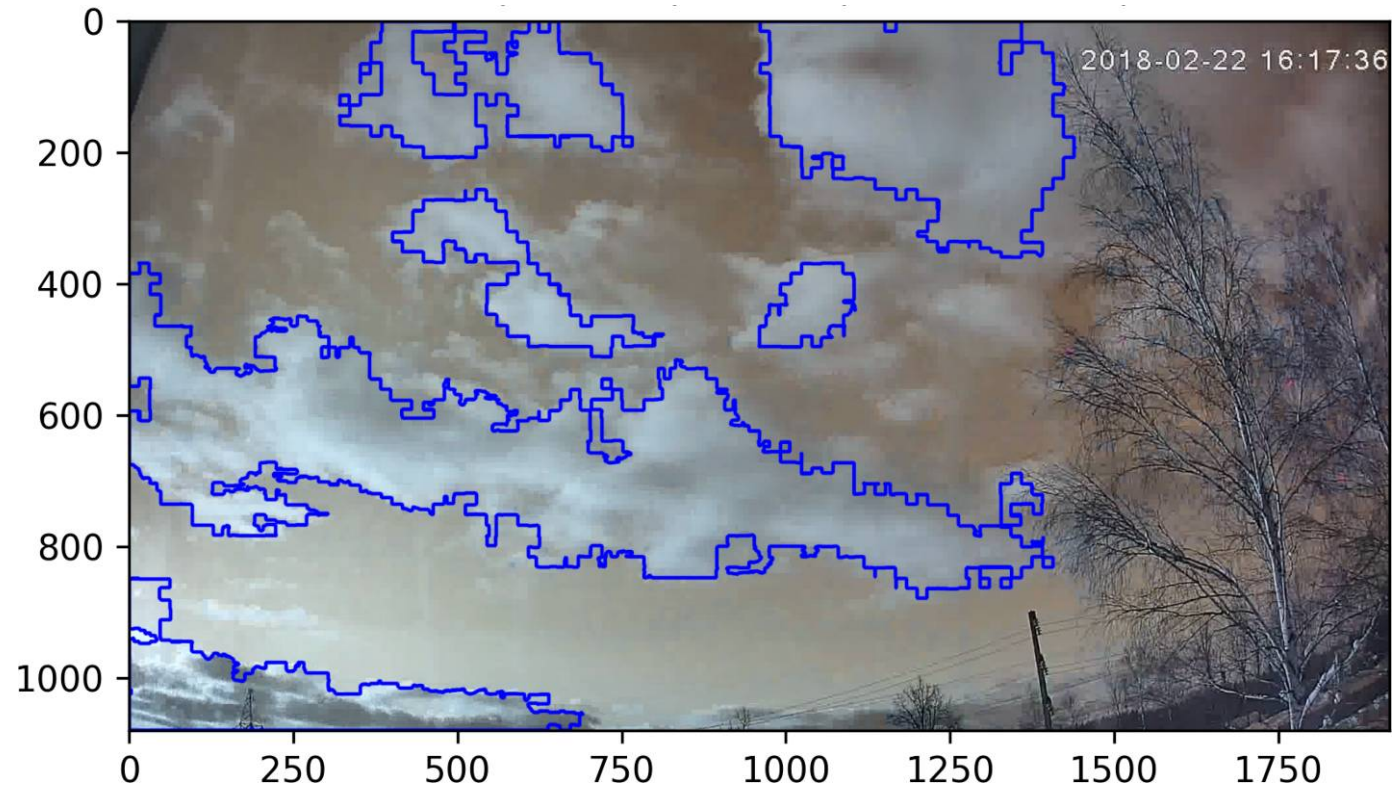


Рис. 2.2 – Анализ связанного видеоряда.

Алгоритм основан на выделении контуров облаков с применением адаптивной фильтрации и определении текстурных признаков отдельного кадра путем расчета матрицы смежности уровня серого (GLCM)