

**Коррекция данных спутникового
СВЧ-радиометрического зондирования влаго- и
водозапаса облачной атмосферы с учетом результатов
наземных микроволновых измерений**

Егоров Д.П., Кутуза Б.Г.

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

ИКИ РАН, Москва, 12 ноября 2024 г.

Введение

Размеры полей зрения антенн современных спутниковых СВЧ-радиометров составляют от 5x5 до 60x60 км в зависимости от длины волны. При решении обратных задач, в том числе при восстановлении интегральных параметров влаго- и водосодержания атмосферы из космоса, в расчетах используется средняя по полю зрения величина радиояростной температуры, что в отсутствие дополнительной корректировки этой величины равносильно предположению о равномерном распределении жидкокапельной влаги (водности) облаков по горизонтали.

Такое предположение справедливо, однако, лишь в случаях слоистой облачности.

В работе [1] авторы путем прямого моделирования полей распределения разрывной облачности и последующего расчета уходящего излучения К-диапазона над гладкой водной поверхностью показывают, что это предположение может приводить к относительным ошибкам восстановления средних по полю зрения величин влаго- и водозапава на уровне 15% и более.

[1] Dobroslav P. Egorov, Yaroslav A. Ilyushin, Boris G. Kutuza. The Influence of Cumuli Distribution in Satellite Microwave Radiometer FOV on the Accuracy of Atmospheric Moisture Content Retrieval // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2024. Vol. 62 (4103410). P. 1-10. URL: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3383315>

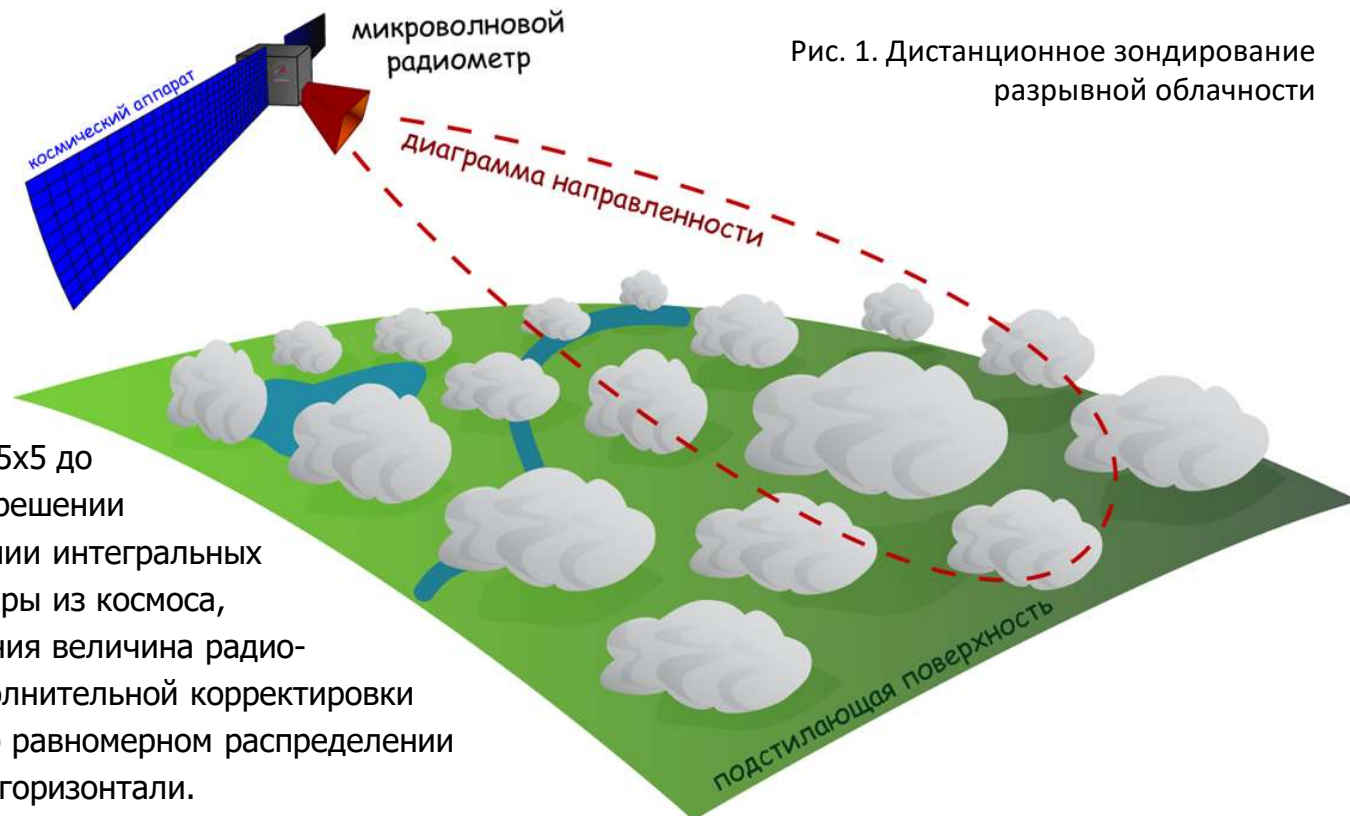


Рис. 1. Дистанционное зондирование разрывной облачности

Высотный профиль водности облака

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

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

где $\xi = h/H$ – приведенная высота внутри облака, H – мощность облака (км), W – (интегральный) водозапас облака (кг/м²), $w(\xi)$ – водность облака (кг/м³), $w(\xi_0)$ – максимальная водность, ξ_0 – приведенная высота максимальной водности, μ_0 и ψ_0 – безразмерные параметры. Согласно [3], значения параметров равны $\mu_0 = 3.27$, $\psi_0 = 0.67$, $\xi_0 = 0.83$.

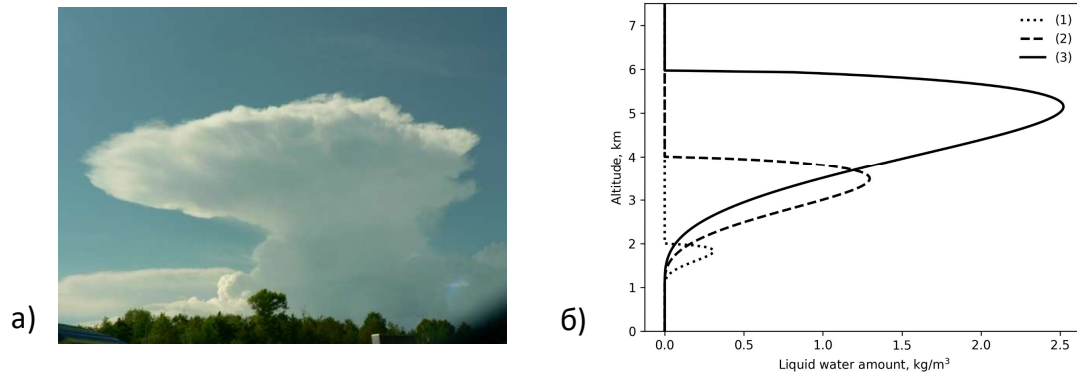


Рис. 2 – а) облако типа Cu cong, имеющее характерный вид наковальни; б) модель высотного профиля водности внутри облака мощностью (1) $H = 1$ км, (2) 3 км, (3) 5 км. Высота основания облаков принята равной 1 км.

Зависимость водозапаса W от мощности H облака приближенно аппроксимируется формулой

$$W = 0.132574 \cdot H^{2.30215}. \quad (2)$$

Нелинейность взаимосвязи T_b и влажности облака

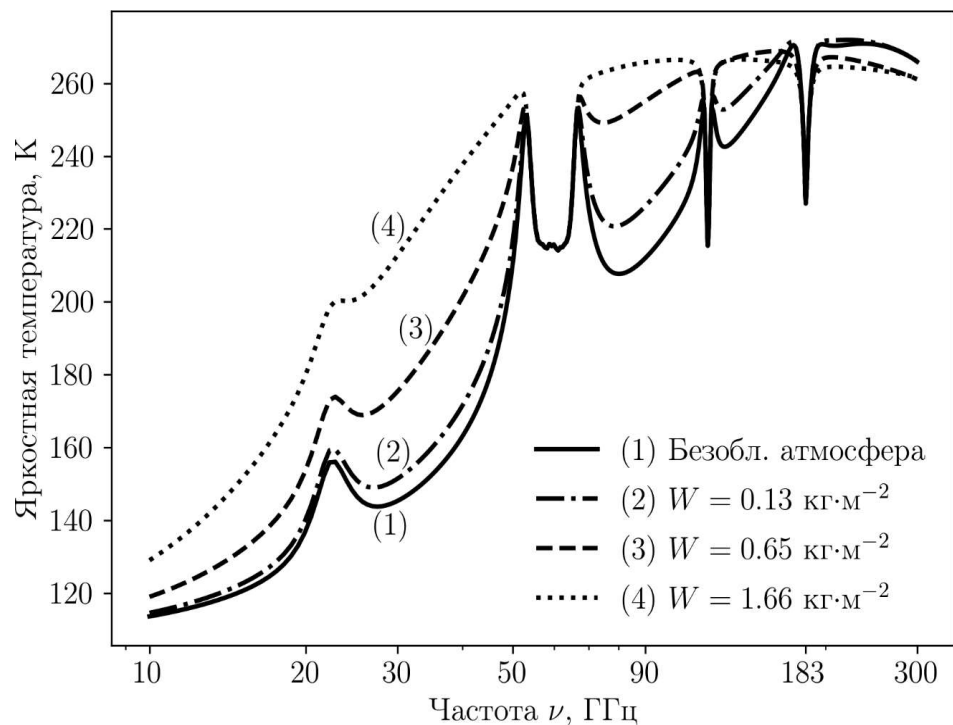


Рис. 3 – Яркая температура уходящего в направлении зенита излучения системы «атмосфера – гладкая водная поверхность». Кривая 1 – безоблачная атмосфера ($H = 0$ км), кривая 2 – $H = 1$ км, кривая 3 – $H = 2$ км, кривая 4 – $H = 3$ км. Логарифмический масштаб по оси абсцисс

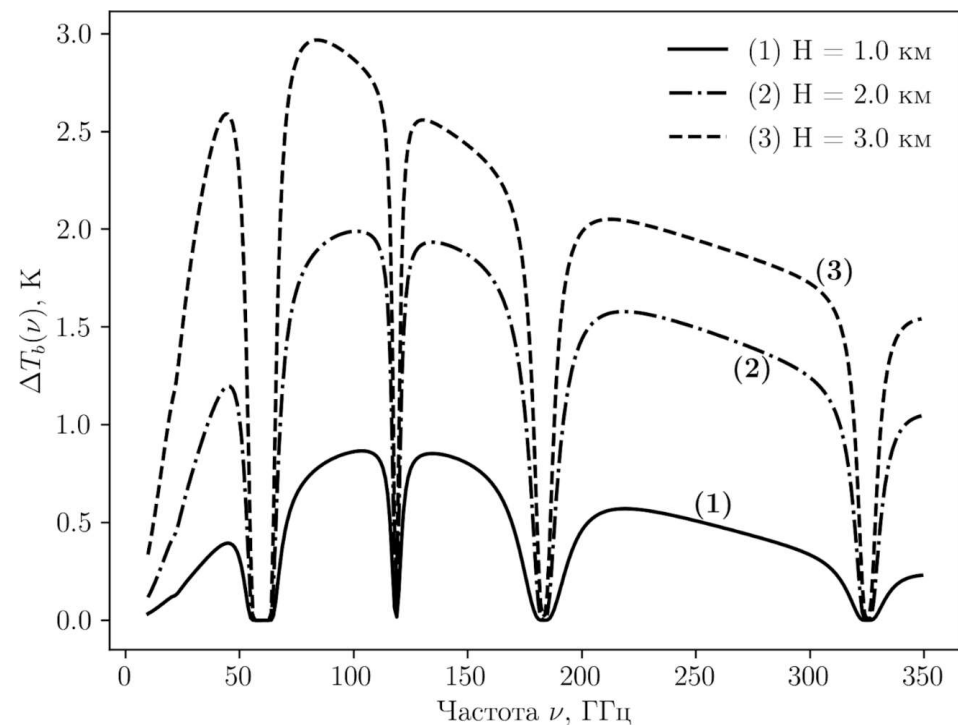


Рис. 4 – Разность в ярких температурах, обусловленная особенностями распределения влажности по высоте

Модель Планка

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

$$N = Ke^{-\alpha D}, \quad D_{\min} < D < D_{\max}, \quad (3)$$

где D – эквивалентный диаметр облака (км), N – количество облаков с диаметрами в интервале от D до 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 N_t 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 S_t , 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 D выбирается из отрезка $[D_{\min}, D_{\max}]$ с некоторым установленным шагом ϵ .

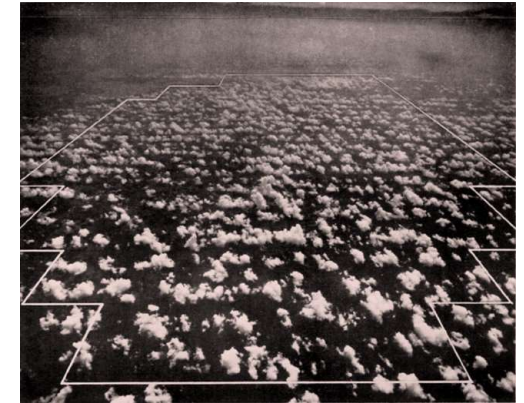


Рис. 5. Снимок от 12 августа 1957 г., 09:44 EST. Флорида, США. Выделенная область составляет 580 кв. миль

Параметры модели Планка

Можно показать, что

$$S_t = \frac{\pi K \chi}{2\alpha^3}, \quad (4)$$

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, а $S_t = p \cdot A$, где p – доля неба, покрытого облаками, причем $0 \leq p \leq 1$. Тогда

$$K = \frac{2\alpha^3 p \cdot A}{\pi \chi}. \quad (5)$$

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

$$H = \eta D \left(\frac{D}{D_{\max}} \right)^\beta, \quad (6)$$

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

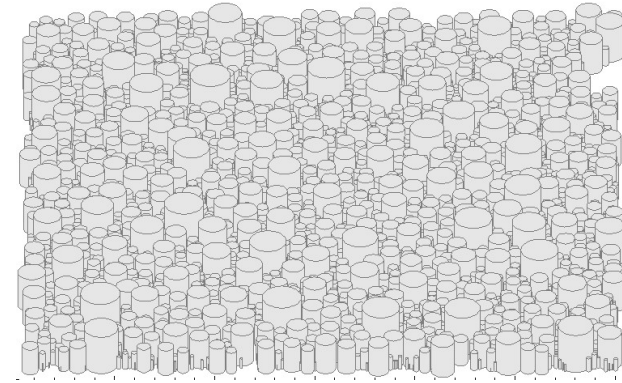


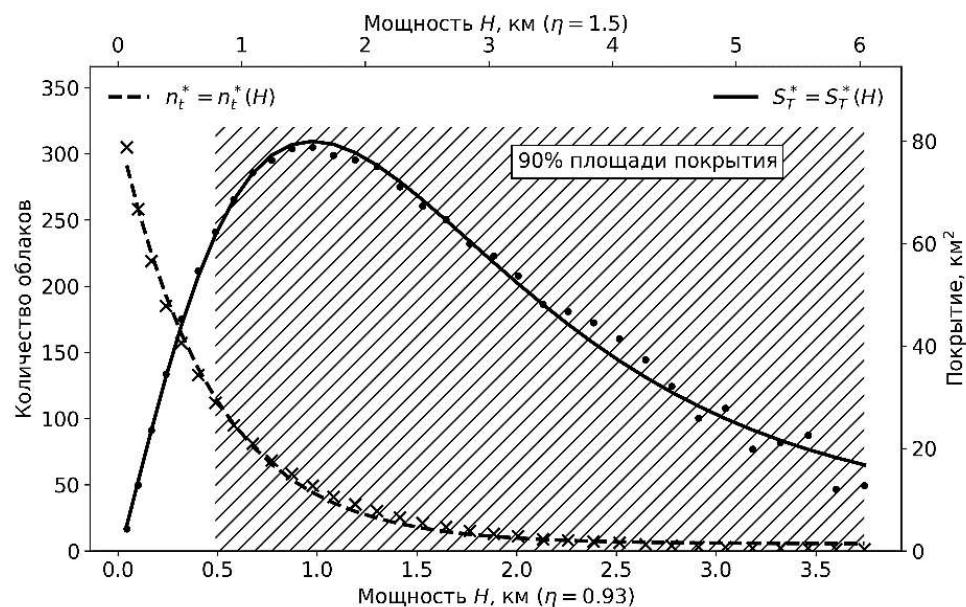
Рис. 6 – Пример пространственной реализации облачного поля, соответствующего статистической модели Планка

Типовые случаи

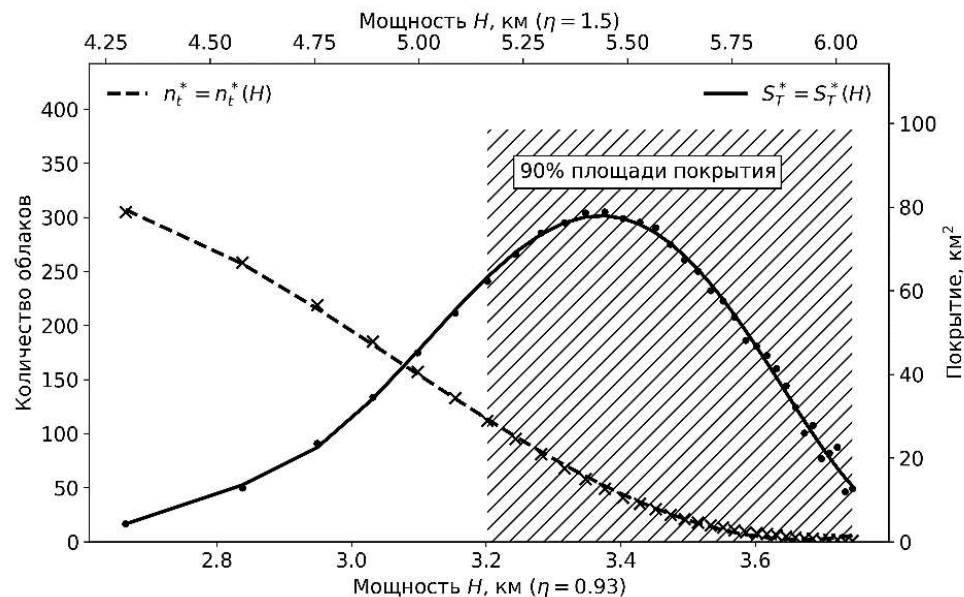
Таблица 1. Параметры облачных полей

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. 7 – 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 и β – параметры модели Планка

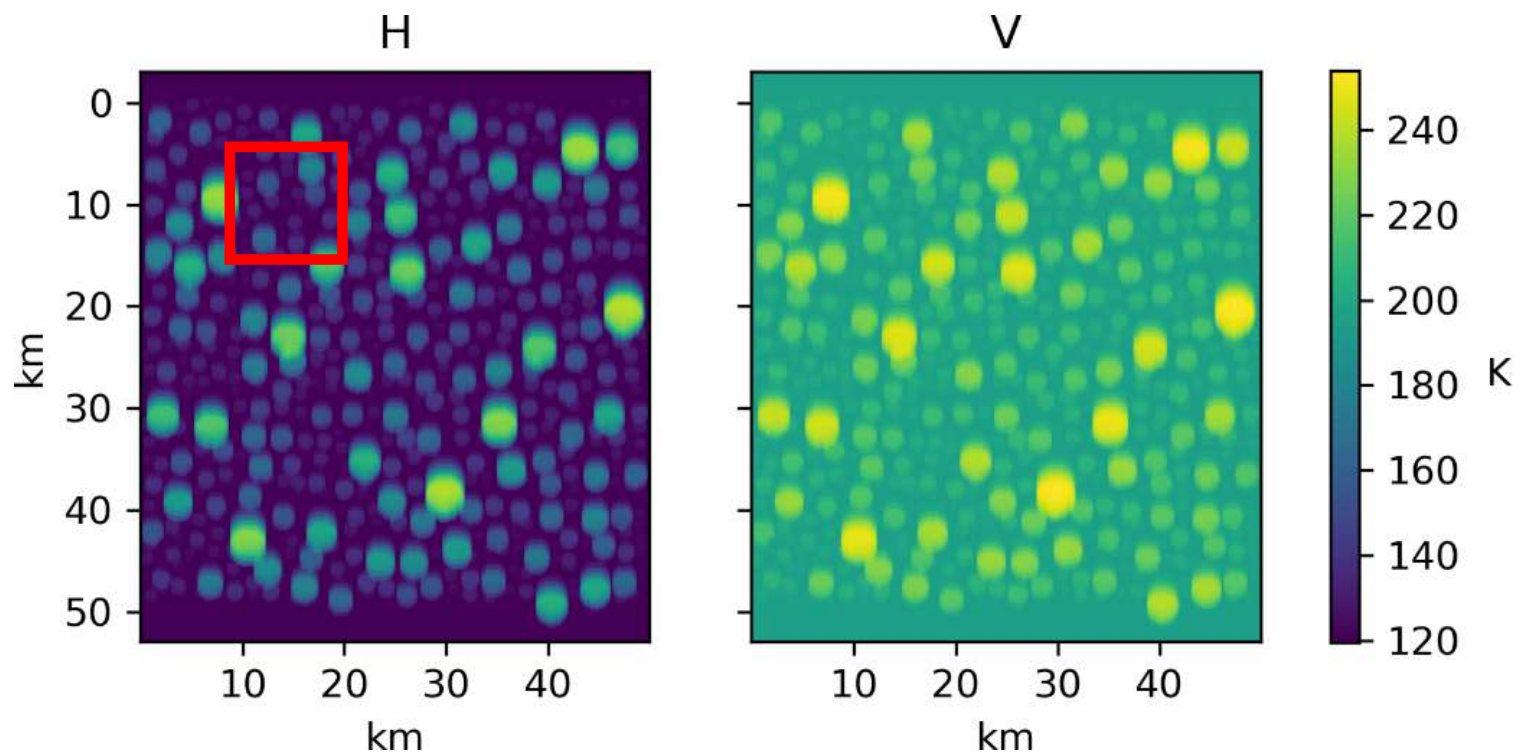
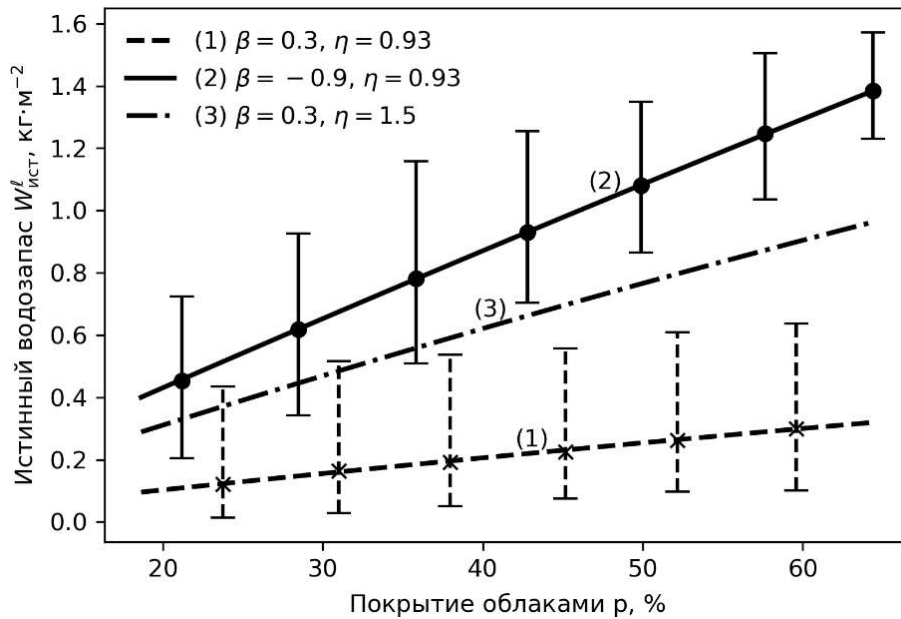
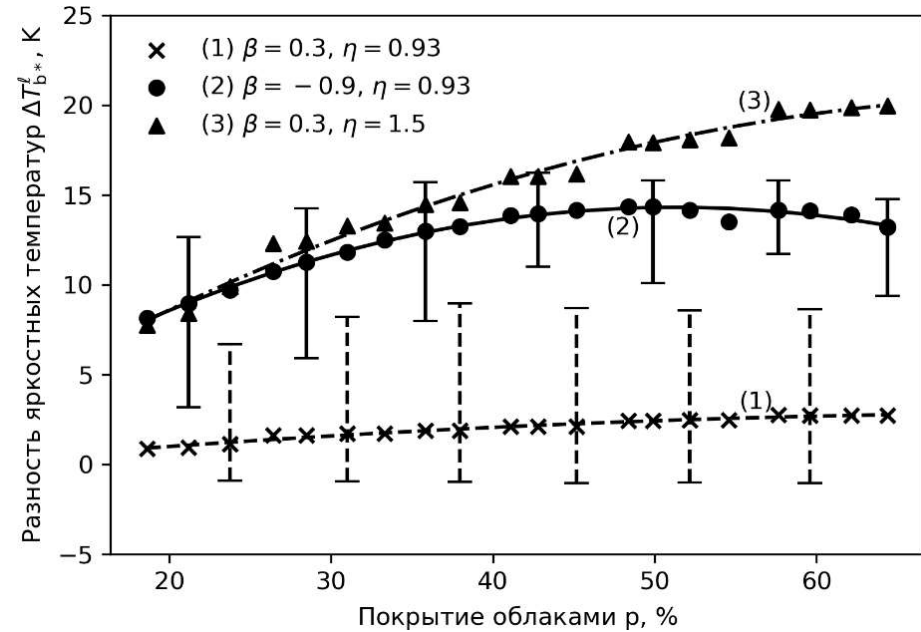


Рис. 8 – Яркостная температура уходящего в направлении зенитного угла $\theta = 51^\circ$ излучения атмосферной ячейки 50x50 км с гладкой водной поверхностью при температуре 15°C в качестве подстилающей, стандартными высотными профилями метеопараметров и добавленной разорванной облачности среднего вертикального развития типа «L2». Частота $\nu = 36$ ГГц; (H) – горизонтальная поляризация, (V) – вертикальная поляризация

Случай «L2»



а)



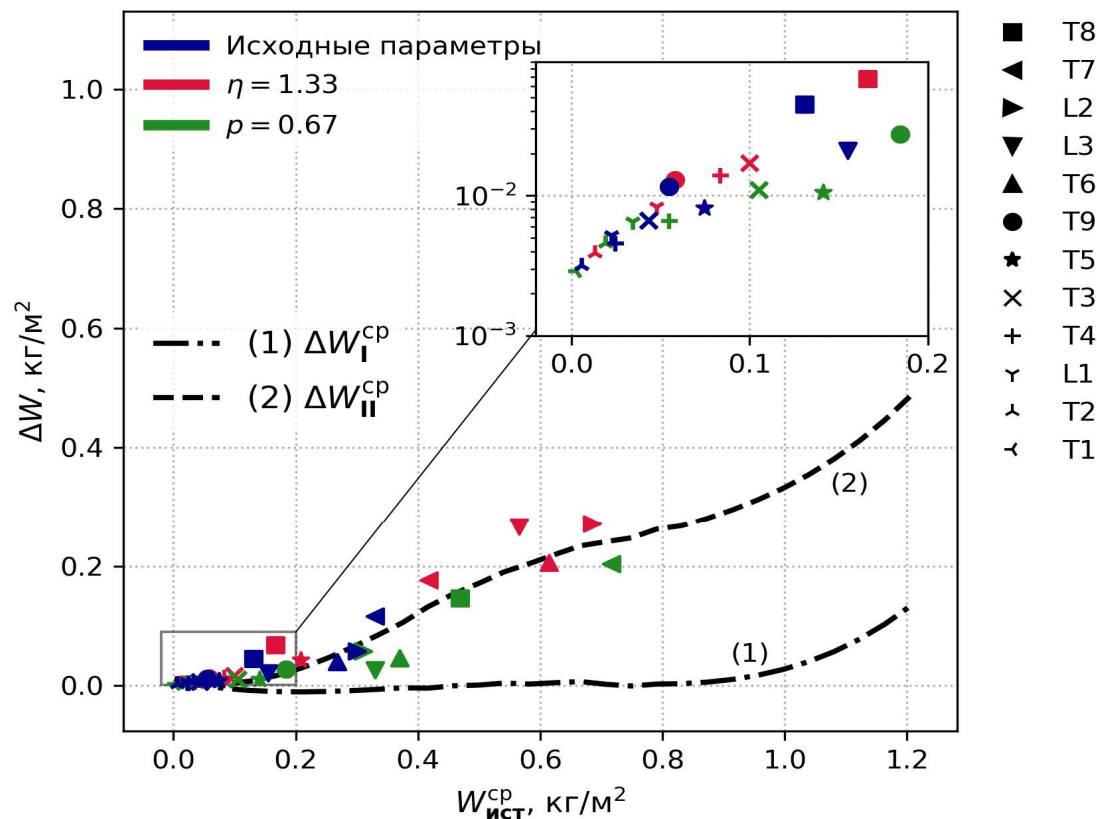
б)

Рис. 9 – Случай «L2» и его модификации. Элемент разрешения 10x10 км. При различных η и β в зависимости от покрытия p в % : а) колебания истинного водозапаса $W_{\text{ист}}^{\ell}$; б) разность яркостных температур $\Delta T_{b*}^{\ell} = T_{b*}^{\ell} - T_b^{\ell}$, наблюдение в надир, частота 36 ГГц.

Оценка систематических ошибок (модель)

Рис. 10 – Зависимость ошибок ΔW_I^{cp} (кривая 1) и $\Delta W_{II}^{\text{cp}}$ (кривая 2) от величины истинного водозапаса $W_{\text{ист}}^{\text{cp}}$ для типов облачности «L1»-«L3», «T1»-«T9» и модифицированных. Элемент разрешения $n \times n = 10 \times 10$ км

Параметр p – доля покрытого облаками неба. Как ΔW_I^{cp} , так и $\Delta W_{II}^{\text{cp}}$ отражают ошибки двухчастотного метода (22.2 и 36 ГГц) при восстановлении среднего по области $n \times n$ водосодержания, однако, $\Delta W_{II}^{\text{cp}}$ содержит дополнительную величину ошибки, обусловленную потерей информации о пространственной структуре облачности вследствие усреднения поля яркостной температуры в элементе разрешения спутникового радиометра, в отличие от ΔW_I^{cp} .



Наземные измерения спектров Тя



Рис. 11 – Радиометр-спектрометр «P22M»

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

Таблица 2. 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.

Cu med

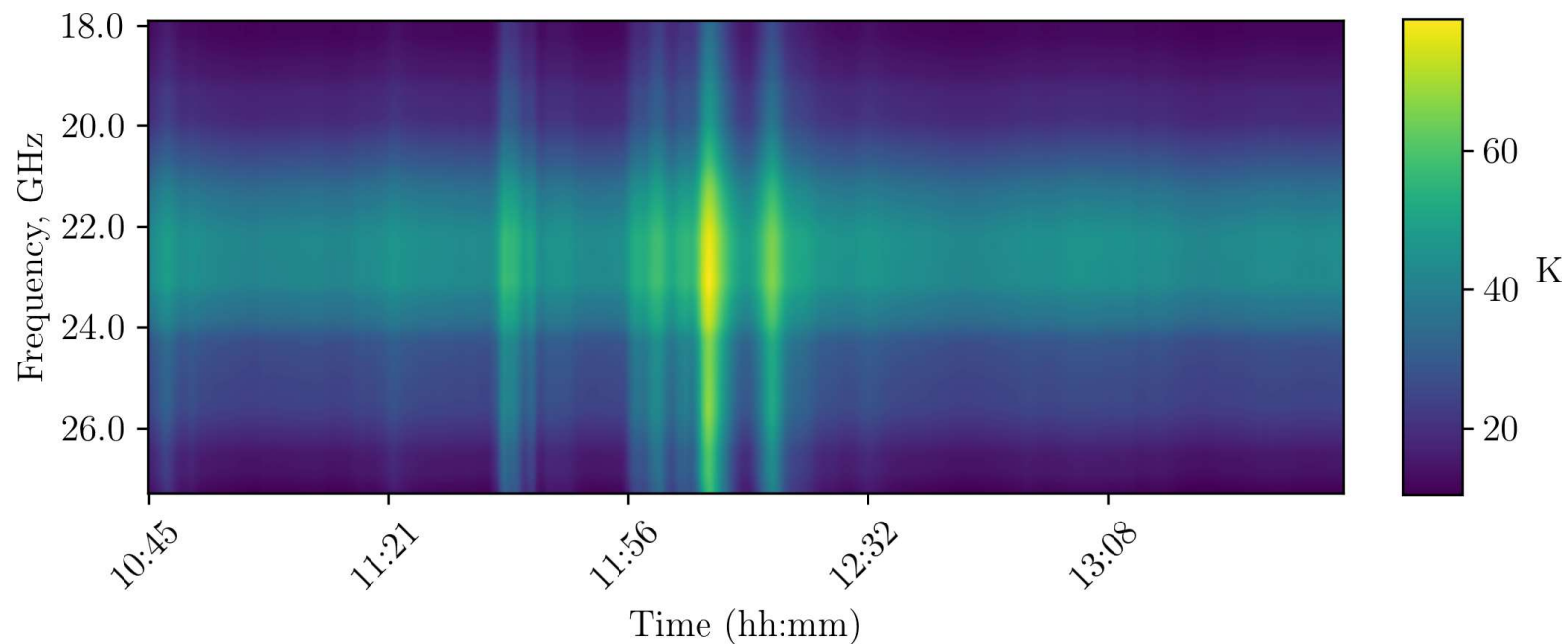


Рис. 12 – Измерительный сеанс от 09 июля 2019 г., 10:45 – 13:45 UTC+3.
Кучевые облака среднего вертикального развития Cu med.
Спектры яркостной температуры, К-диапазон.

Cu med

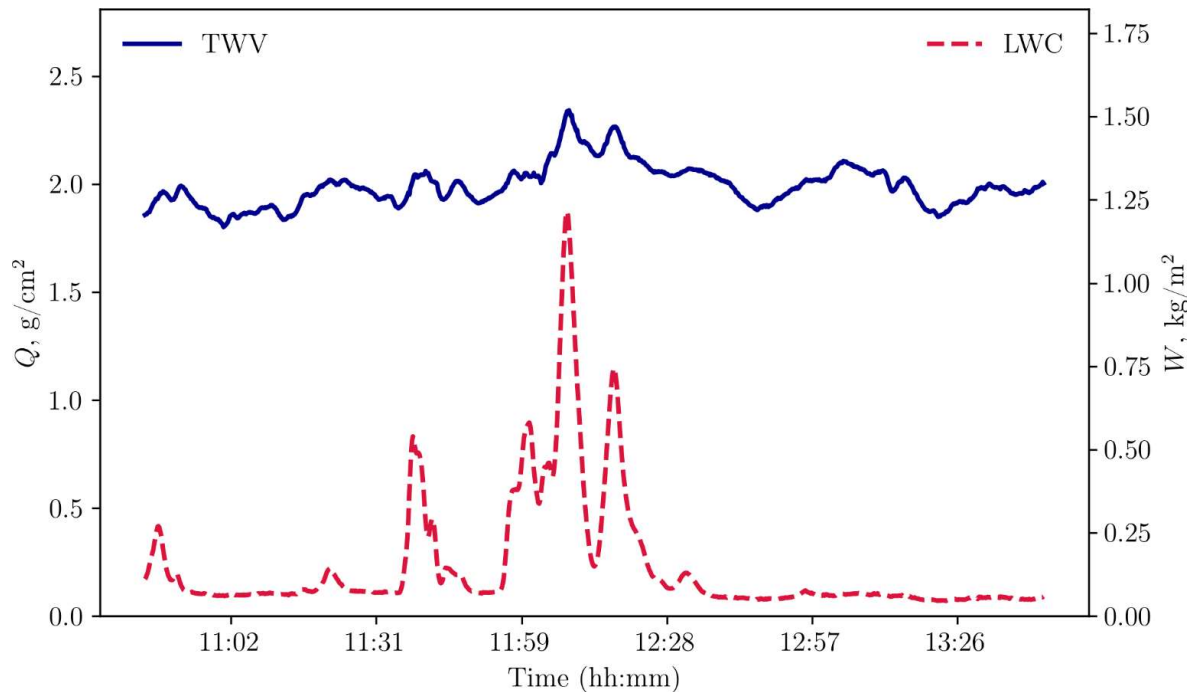


Рис. 13 – Результаты восстановления интегральных параметров влаго- и водосодержания многочастотным методом на основе МНК. Сеанс от 09 июля 2019 г., 10:45 – 13:45 UTC+3, Cu med

Многочастотный метод

$$R(Q, W) = \sum_{j=1}^N (\tau_e(v_j) - f(v_j, Q, W))^2 \rightarrow \min_{Q, W} \quad (7)$$

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

Стационарные точки функции $R(Q, W)$:

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

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

Разметка данных

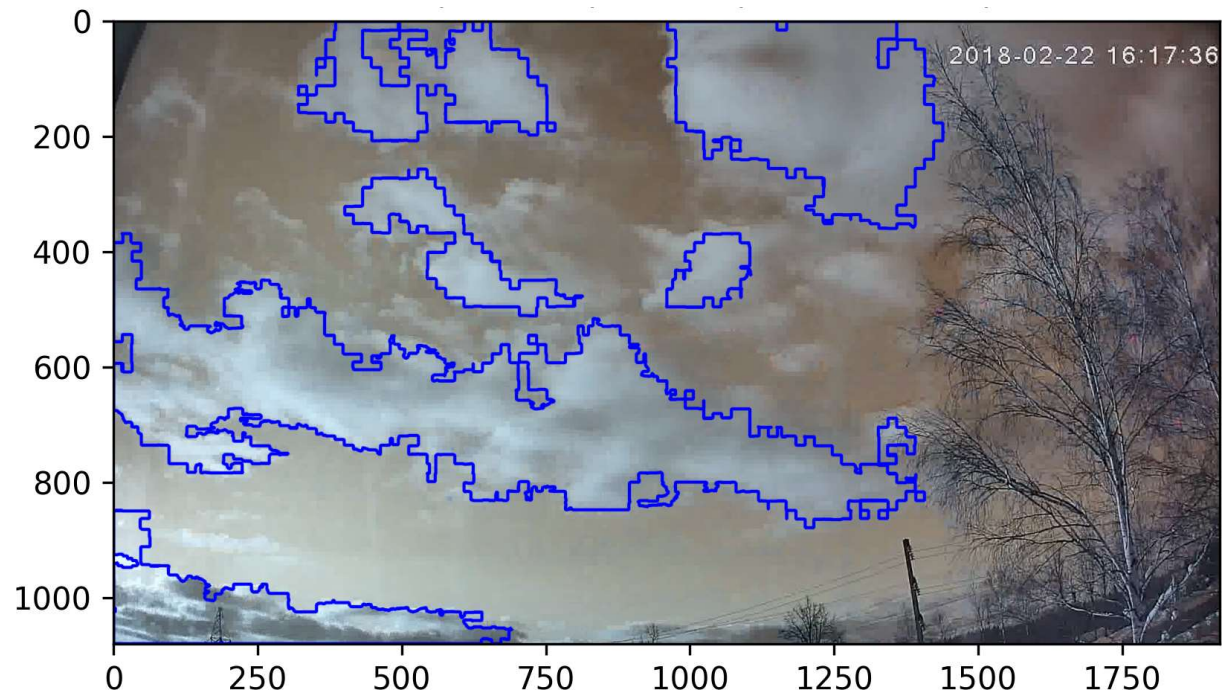


Рис. 14 – Анализ связанного видеоряда.

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

Оценка систематических ошибок (эксперимент)

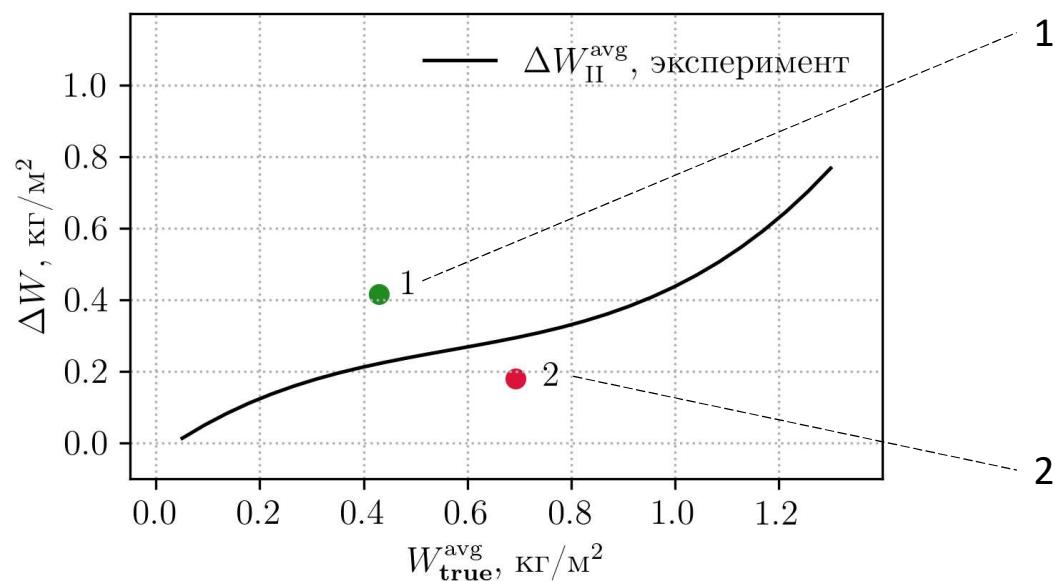
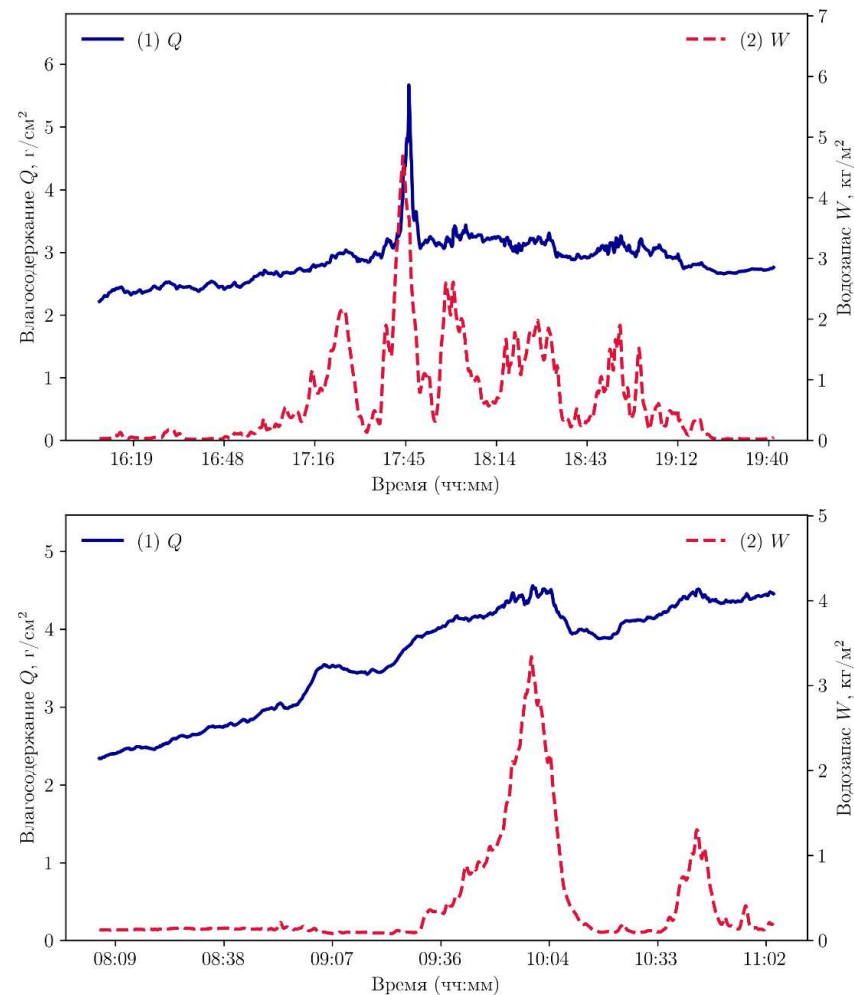


Рис. 15 – Ошибки определения водозапаса по средней Тя.
Летние сеансы 2019-2024 гг. Усреднение - 2 ч.



Заключение

- Хотя ошибки восстановления зависят от множества факторов и различаются по величине для разных пространственных реализаций облачного поля (в том числе при равном суммарном водозапасае), они, тем не менее, носят систематический характер и могут быть проанализированы статистически.
- Анализ экспериментальных данных наземного СВЧ радиометра-спектрометра Р22М, установленного во Фрязинском филиале ИРЭ РАН, за 2019-2024 гг., подтверждает выводы авторов, полученные в предыдущих работах по результатам компьютерного моделирования.
- *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.*

Спасибо за внимание!