

Исследование радиояркостной температуры атмосферы тропиков в линиях 183 и 325 ГГц

А.Г. Семин¹, А.В. Кузьмин², Ю.Б. Хапин², Е.А. Шарков²

¹ Пензенский государственный педагогический университет
440026, Пенза, Лермонтова, 37
E-mail: semin@sura.ru

² Институт космических исследований РАН
117997, Москва, Профсоюзная, 84/32
E-mails: kuzmin@iki.rssi.ru; yuhapin@gmail.com; easharkov@iki.rssi.ru

В работе рассматривается возможность восстановления детальных профилей водяного пара в тропической атмосфере по данным спутниковых измерений радиотеплового микроволнового излучения. В прямой задаче анализируется возможность восстановления профиля водяного пара на 8–10 высотных уровнях до высоты 10 км с использованием измерений в окрестностях резонансных линий поглощения 183 и 325 ГГц. Решение этой задачи, несомненно, будет принципиально важным шагом в изучении физических условий генезиса и эволюции тропических циклонов.

Ключевые слова: восстановление профиля водяного пара в атмосфере, микроволновая радиометрия, радиояркостная температура.

Исследование радиояркостных характеристик атмосферы из космоса средствами микроволновой радиометрии дает возможность изучения физических условий генезиса и эволюции тропических циклонов. В настоящей работе исследуется интегральное поглощение в атмосфере, радиояркостная температура атмосферы и температура системы атмосфера–океан в диапазоне частот 5–360 ГГц, а также весовые функции восходящего излучения атмосферного водяного пара в диапазоне частот 85–325 ГГц.

Радиояркостная температура системы атмосфера–поверхность на частоте ν в миллиметровом диапазоне радиоволн под углом падения θ , регистрируемая антенной радиометра на искусственном спутнике Земли определяется следующим выражением (Башаринов и др., 1974):

$$T_{b\nu}(\theta) = 1 - R_\nu(\theta) T_S \exp(-\tau_{0\nu} \sec \theta) + \int_0^\infty T(h) \gamma_\nu(h) \exp \left[- \int_h^\infty \gamma_\nu(h') \sec \theta dh' \right] \sec \theta dh + \\ + R_\nu(\theta) \exp(-\tau_{0\nu} \sec \theta) \int_0^\infty T(h) \gamma_\nu(h) \exp \left[- \int_0^h \gamma_\nu(h') \sec \theta dh' \right] \sec \theta dh,$$

где $R_\nu(\theta)$ – энергетический коэффициент отражения поверхности; θ – угол падения излучения на подстилающую поверхность; T_S – температура поверхности; $\tau_{0\nu}$ – интегральное зенитное поглощение радиоволн в зените; $T(h)$ – вертикальный профиль температуры; $\gamma_\nu(h)$ – погонный коэффициент поглощения на высоте h . При расчете радиояркостной температуры учитывались три составляющие. Первая составляющая – это излучение самой подстилающей поверхности, ослабленное атмосферой; вторая – это яркостная температура

восходящего излучения атмосферы; третья составляющая – нисходящее излучение атмосферы, отраженное поверхностью и ослабленное атмосферой. Атмосфера предполагается плоскостистой, явлением рефракции для углов $\theta < 80^\circ$ допустимо пренебречь, в этом случае интегральное поглощение в атмосфере под углом θ определяется выражением

$$\tau_v(\theta) = \int_0^{\infty} \gamma_v(h) \sec \theta \, dh = \tau_{0v} \sec \theta.$$

Поглощение радиоволн в сантиметровом и миллиметровом диапазоне длин волн в атмосферном кислороде подробно рассмотрено в работах (Жевакин, Наумов, 1965; Жевакин, 1986, 1987), поглощение радиоволн в атмосферном водяном паре в этом диапазоне приводится в работах (Жевакин, Наумов, 1964; Зражевский, 1976). Модельные расчеты интегрального поглощения электромагнитного излучения в диапазоне 5–360 ГГц в молекулярном кислороде проводились по методике, приведенной в работе (Жевакин, 1986), расчеты поглощения в атмосферном водяном паре проводились по методикам (Зражевский, 1976).

Для расчетов были выбраны следующие метеоданные:

- Летняя атмосфера средних широт: температура воздуха у поверхности – 294 К; влажность – 14,0 г/м³; давление – 1013 мб; интегральная влажность – 2,94 г/см² (Clatchey et al., 1972);
- Стандартная тропическая атмосфера: температура воздуха у поверхности – 300 К; влажность – 19,0 г/м³; давление – 1013 мб; интегральная влажность – 4,14 г/см² (Clatchey et al., 1972);
- Данные радиозонда 49 (ИКИ), полученные 18.05.1989 г. в 00:00 в 1300 км от центра ТЦ «Бренда»: температура воздуха у поверхности – 299,8 К; влажность – 22,7 г/м³; давление – 1007,5 мб; интегральная влажность – 6,22 г/см².

Расчет интегрального поглощения в атмосфере и радиояркостной температуры атмосферы в диапазоне 5–360 ГГц проводился численным интегрированием с шагом 100 метров до высоты 25 км для наблюдения под углом 45° для горизонтально поляризованного электромагнитного излучения. Расчёты выполнялись для случая безоблачной атмосферы.

Результаты расчетов интегрального поглощения в атмосфере приведены на рис. 1. Расчеты показывают, что интегральное поглощения в атмосфере изменяется в широких пределах от 0,13 Нп на частоте от 5 ГГц до 116 Нп в линии резонанса водяного пара 325 ГГц.

Результаты расчетов радиояркостной температуры электромагнитного излучения системы атмосфера-океан приведены на рис. 2. Расчеты показывают, что наибольшее изменение температуры системы от изменения интегрального содержания водяного пара, в линии резонанса водяного пара от 22,235 ГГц – 69 К (21 К·см²г⁻¹), на частоте 85 ГГц – 47 К (14 К·см²г⁻¹). Максимум радиояркостной температуры восходящего излучения системы в окрестности линии 183 ГГц – на частоте 160 ГГц составляет 276,6 К, минимум температуры на частоте 183,6 ГГц – 227 К.

Вклад различных составляющих в общую радиояркостную температуру системы атмосфера-океан приведен на рис. 3. При расчете определялся вклад нисходящего отраженного излучения атмосферы и излучения поверхности в общую температуру системы. На частоте 170 ГГц вклад этих составляющих 1,6 и 0,35 % соответственно, на частотах выше 175 ГГц – практически отсутствует.

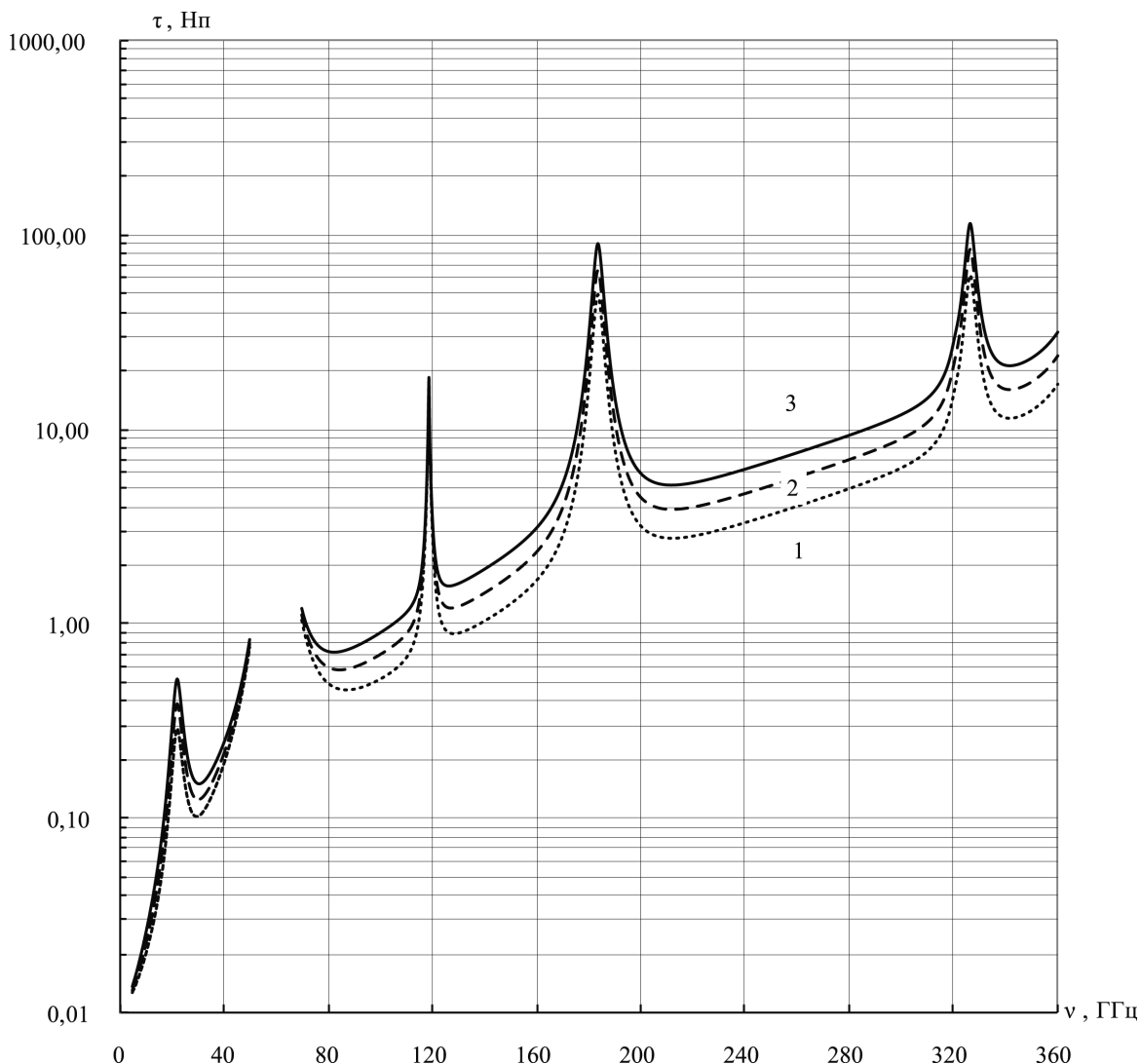


Рис. 1. Интегральное поглощение электромагнитного излучения в атмосфере в диапазоне 5–360 ГГц:
 1 – стандартная атмосфера средних широт; 2 – стандартная тропическая атмосфера;
 3 – метеоданные радиозонда 49 (ИКИ)

Расчет весовых функций электромагнитного излучения атмосферы в окрестностях линий резонанса 183 и 325 ГГц проводился по следующей схеме. Атмосфера до высоты 25 км разбивалась на слои высотой $\Delta h = 50$ м, где рассчитывалось погонное поглощение в середине каждого слоя. Радиояркая температура от i -го атмосферного слоя за границей атмосферы с учетом ослабления излучения вышележащими слоями может быть представлена в виде:

$$T_{bi} = T(h_i)[1 - \exp(-\gamma_w(h_i)\Delta h \sec\theta)] \sum_{k=i+1}^n \gamma(h_k)\Delta h \sec\theta,$$

где $T(h_i)$ – температура i -го слоя; $\gamma_w(h_i)$ – погонное поглощение в водяном паре в середине слоя; $\gamma(h_i)$ – погонное атмосферное поглощение в середине слоя; $n = 500$ – число слоев. Яркая температура каждого слоя нормируется к температуре слоя с максимальной температурой.

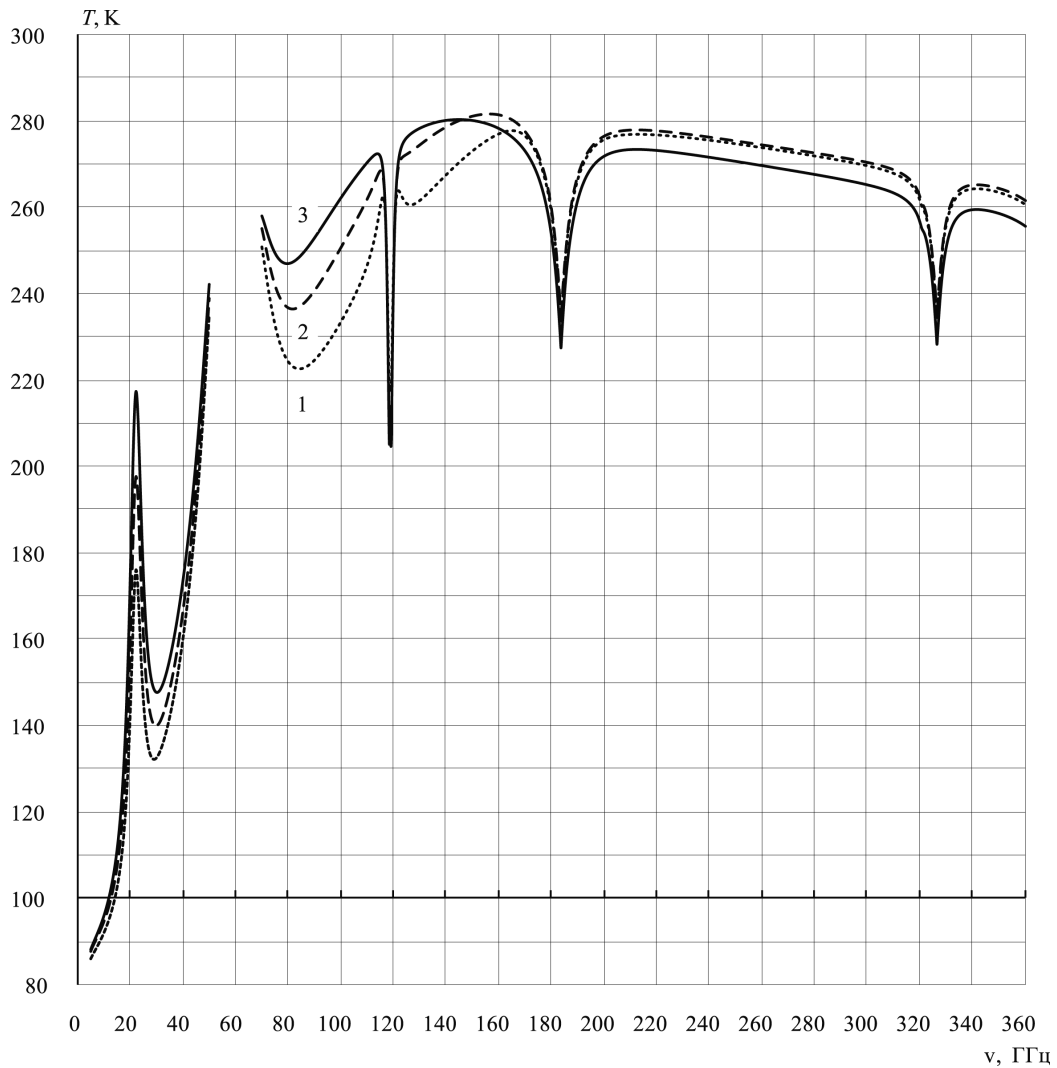


Рис. 2. Радиояростная температура электромагнитного излучения системы атмосфера-океан в диапазоне 5–360 ГГц: 1 – стандартная атмосфера средних широт; 2 – стандартная тропическая атмосфера; 3 – метеоданные радиозонда 49 (ИКИ)

Максимумы весовых функций излучения атмосферного водяного пара для фиксированных частот в окрестностях линий 183 и 325 ГГц во многом зависят от содержания водяного пара в атмосфере. Для уменьшения смещения максимумов функций при вариациях содержания водяного пара в тропической атмосфере частоты были подобраны для его среднего значения между значением для стандартной тропической атмосферы и данным радиозонда. Это составило для поверхностной влажности – $21,00 \text{ г/м}^3$, и интегральной влажности – $5,19 \text{ г/м}^2$. Результаты расчетов весовых функций для линии 183 ГГц и окне прозрачности атмосферы 85 ГГц приведены на рис. 4–6.

Максимумы функций достаточно равномерно располагаются по высотам до высоты 9 км. При стандартной тропической атмосфере максимумы функций понижаются, максимальное изменение высоты составляет 2,2 км на частоте 175,7 ГГц. Для атмосферы представленной радиозондом максимумы весовых функций смещаются вверх, максимальное изменение высоты составляет 1,8 км на частоте 172 ГГц.

Результаты расчетов весовых функций для окрестности линии 325 ГГц для стандартной тропической атмосферы представлены на рис. 7. Из расчетов следует, что измерение в этой линии не позволяет проводить измерение содержания водяного пара на высотах менее 3 км.

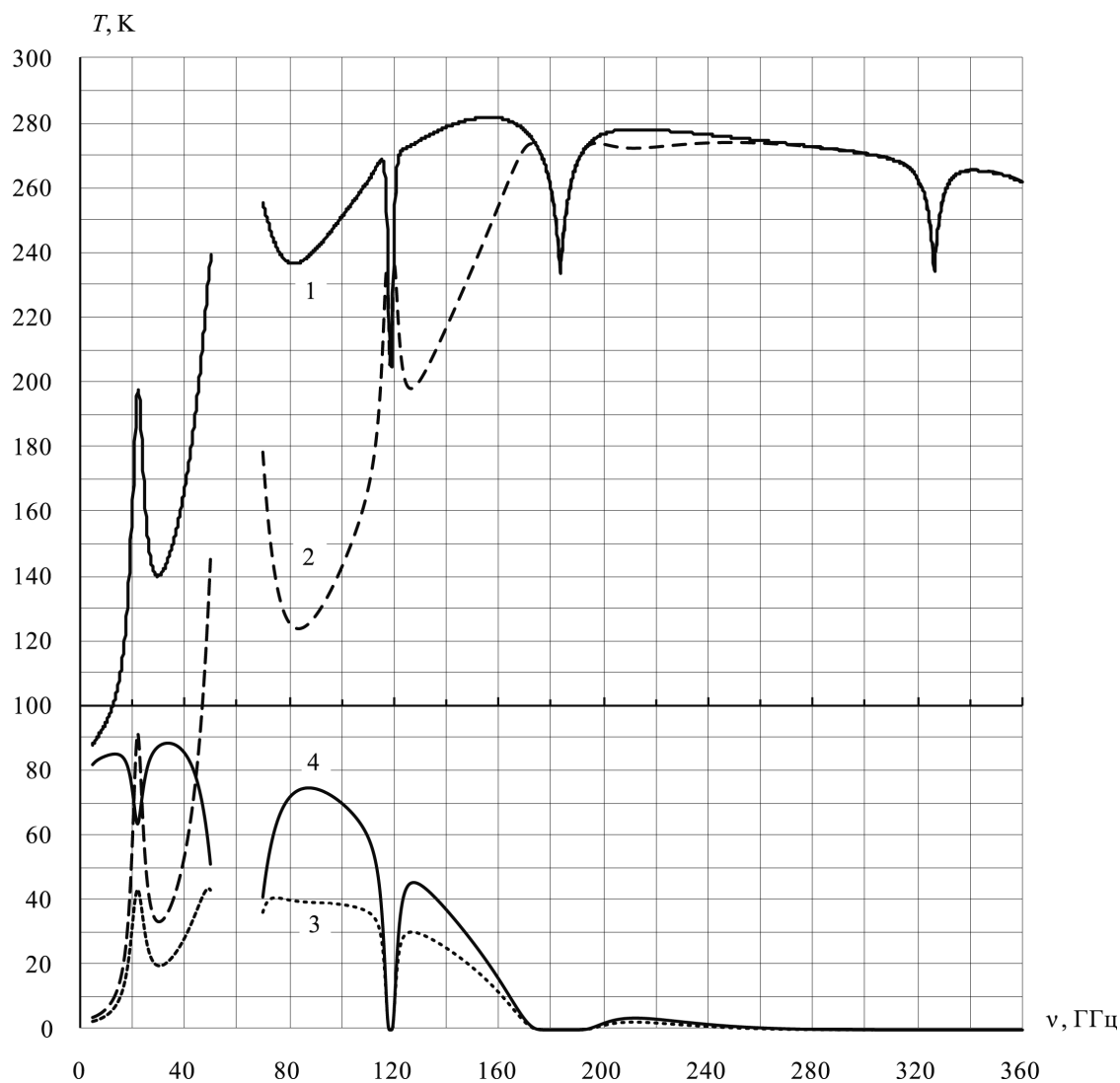


Рис. 3. Радиояркостьная температура электромагнитного излучения системы атмосфера-океан и вклад составляющих излучения в диапазоне 5–360 ГГц, угол падения 45°, метеоданные радиозонда 49 (ИКИ):
 1 – системы атмосфера-океан; 2 – восходящего излучения атмосферы;
 3 – нисходящего излучения атмосферы, отраженного поверхностью и ослабленного атмосферой;
 4 – излучения поверхности, ослабленного атмосферой

На основании проведенных расчетов можно сделать следующий вывод. Для надежного восстановления детальных профилей атмосферного водяного пара в окрестностях линии 183 ГГц в условиях облачной атмосферы и взволнованной морской поверхности, необходимо использование низкочастотной линии резонанса водяного пара 22,23 ГГц и измерений в окнах прозрачности на 19; 37; 85–90 ГГц. Это позволит получить информацию о характеристиках морской поверхности и облачности.

Таким образом, восстановление профиля влажности на 8–10 уровнях потребует как разработки методов решения таких задач, так и разработки сканирующего многоканального радиометра с использованием измерений в 8–10 каналах в окрестности линии 183 ГГц, одного канала 22,23 ГГц, двухполяризационных радиометров на частотах 19; 37; 85–90 ГГц для учёта влияния взволнованной морской поверхности и вычисления водозапаса облаков и интенсивности осадков. Чувствительность на элемент разрешения может быть, ориентировочно, 0,1–0,5 К по мере увеличения частоты.

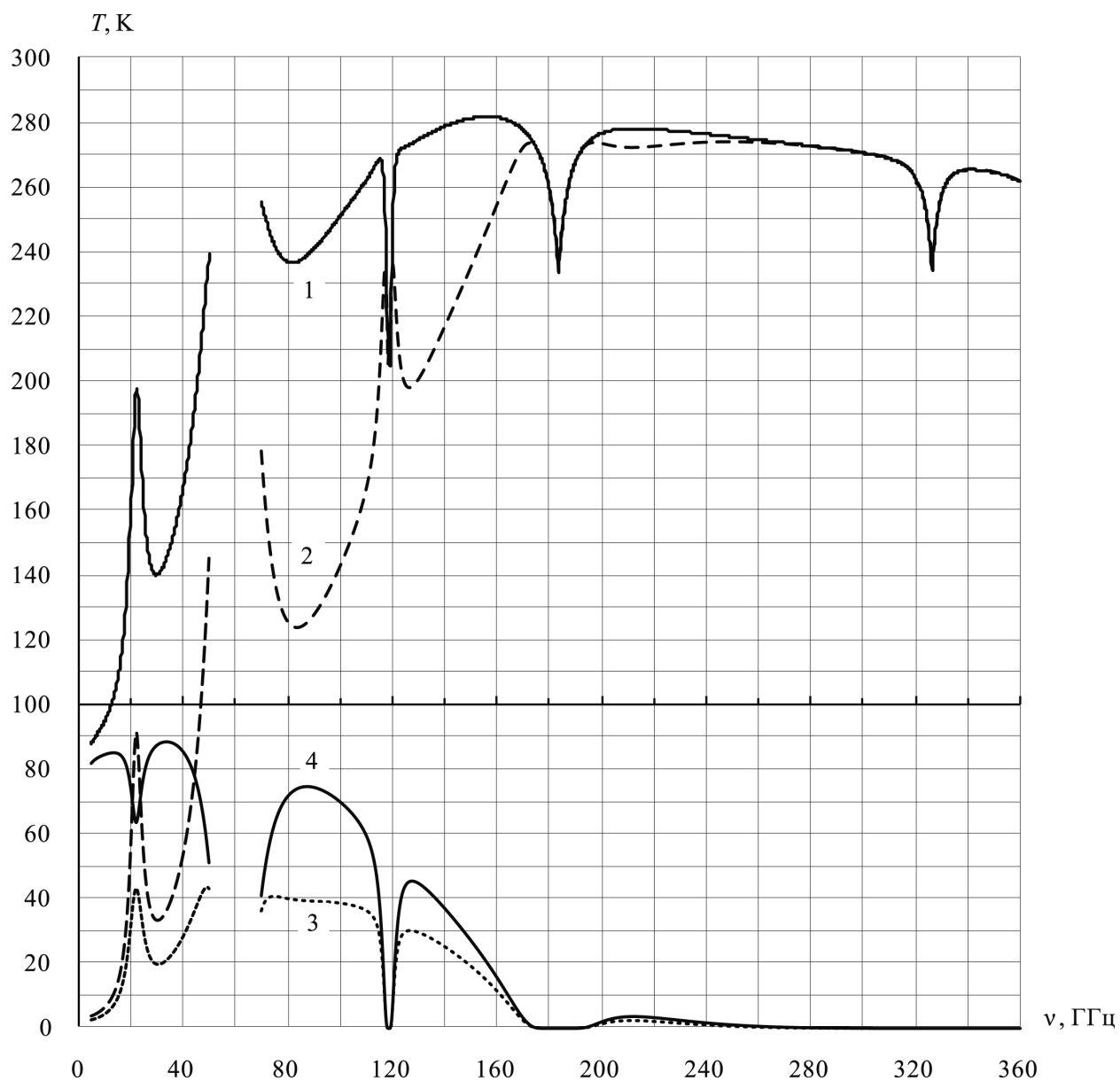


Рис. 4. Весовые функции для восходящего излучения атмосферного водяного пара: угол падения 45° ; тропики, средняя атмосфера, радиояростная температура воздуха – 300 К; давление – 1013 мб; влажность – $21,00 \text{ г/м}^3$; интегральная влажность – $5,19 \text{ г/см}^2$

Кривая	Частота, ГГц	Максимум, км	Кривая	Частота, ГГц	Максимум, км
1	85,00	0,00	6	179,10	6,00
2	154,00	1,90	7	180,55	7,00
3	172,00	3,00	8	181,30	8,00
4	173,28	4,30	9	182,50	9,00
5	175,70	5,00			

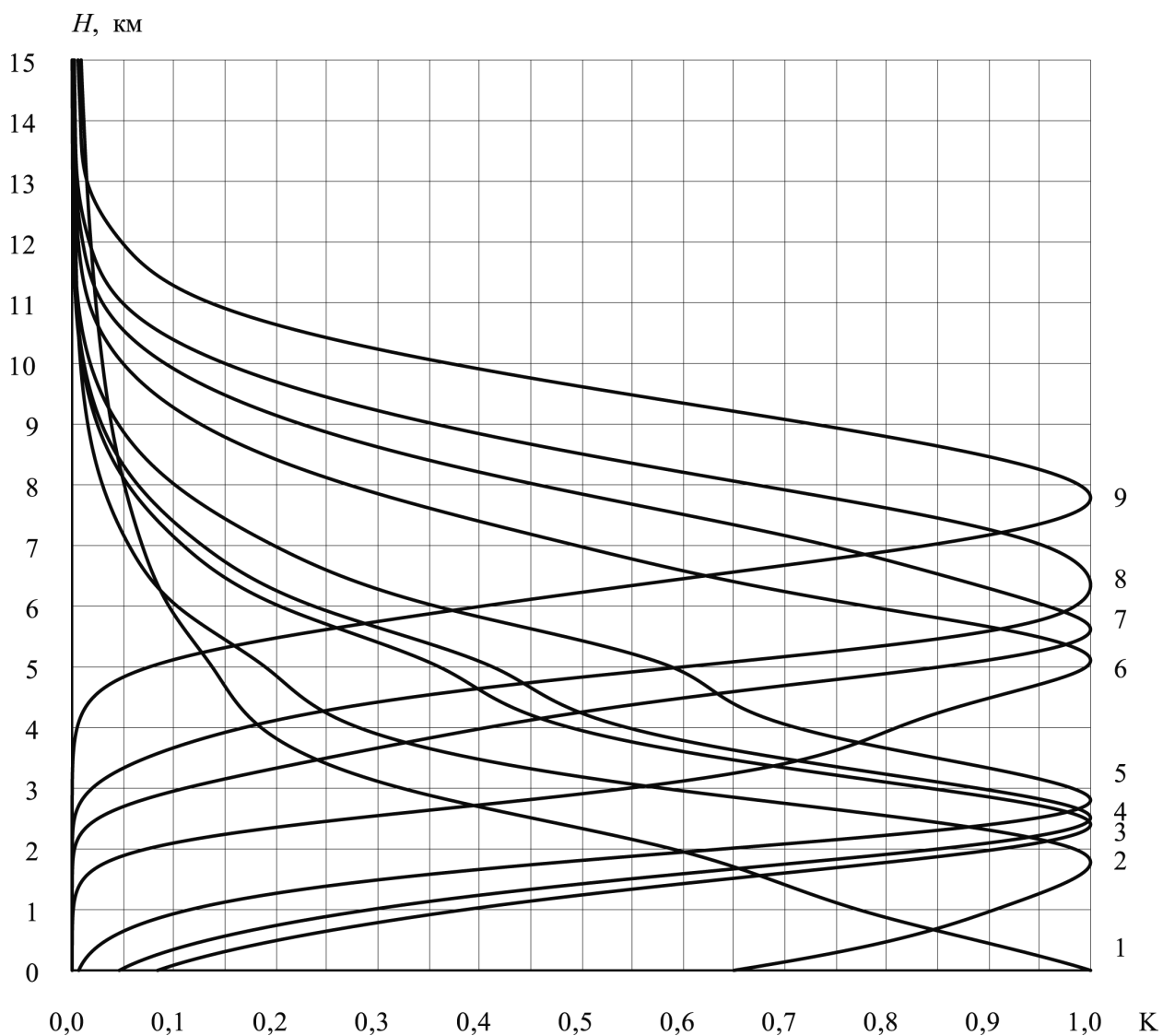


Рис. 5. Весовые функции для восходящего излучения атмосферного водяного пара: угол падения 45° ; тропики, стандартная атмосфера; радиояркостная температура воздуха – 300 К; давление – 1013 мб; влажность – $19,00 \text{ г/м}^3$; интегральная влажность – $4,14 \text{ г/см}^2$

Кривая	Частота, ГГц	Максимум, км	Кривая	Частота, ГГц	Максимум, км
1	85,00	0,00	6	179,10	5,10
2	154,00	1,80	7	180,55	5,60
3	172,00	2,40	8	181,30	6,35
4	173,28	2,50	9	182,50	7,80
5	175,70	2,80			

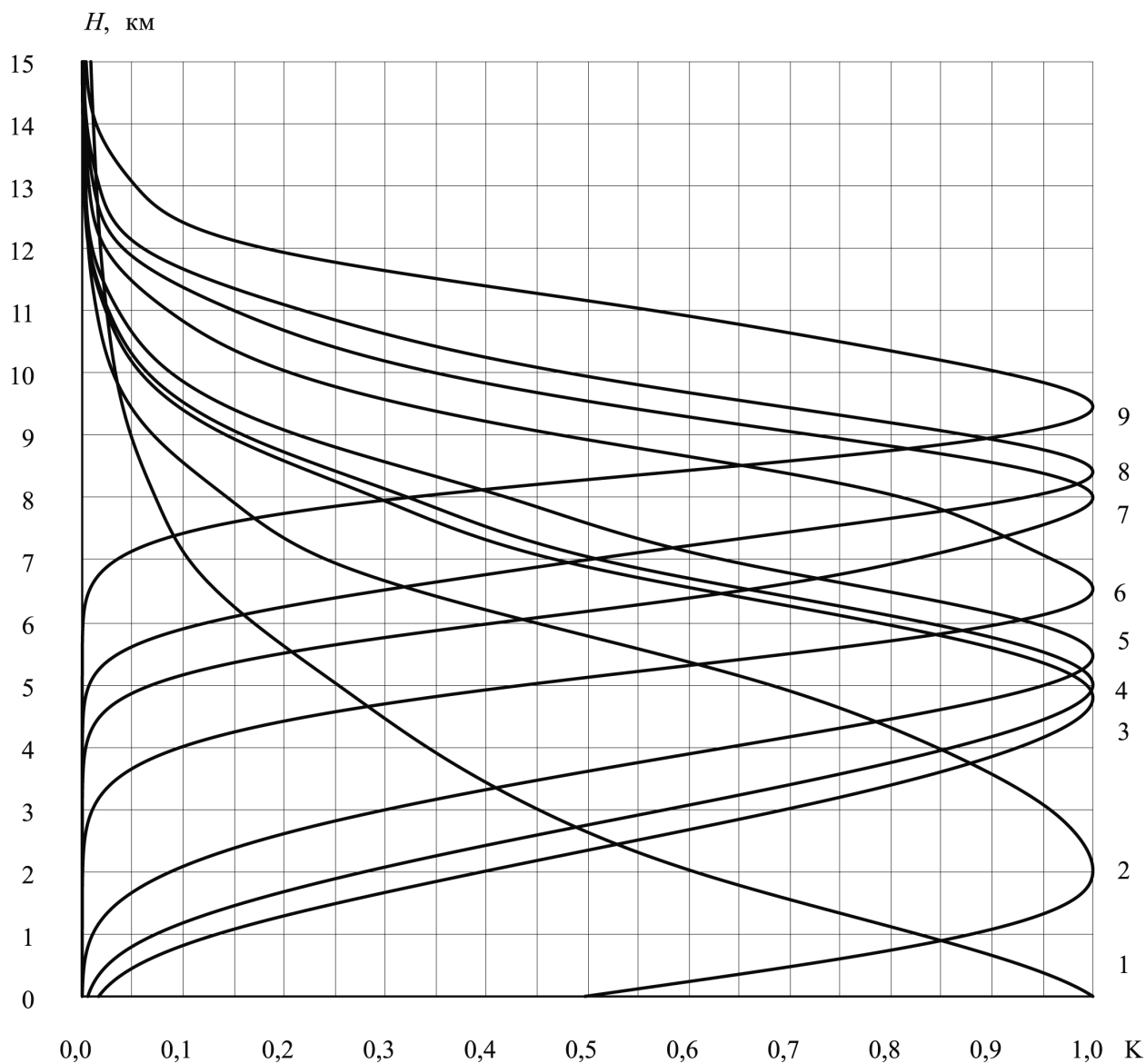


Рис. 6. Весовые функции для восходящего излучения атмосферного водяного пара: угол падения 45° ; тропики; радиозонд 49; радиояростная температура воздуха – 300 К; давление – 1007 мб; влажность – $22,74 \text{ г/м}^3$; интегральная влажность – $6,22 \text{ г/см}^2$

Кривая	Частота, ГГц	Максимум, км	Кривая	Частота, ГГц	Максимум, км
1	85,00	0,00	6	179,10	6,55
2	154,00	2,00	7	180,55	7,95
3	172,00	4,80	8	181,30	8,40
4	173,28	5,00	9	182,50	9,45
5	175,70	5,45			

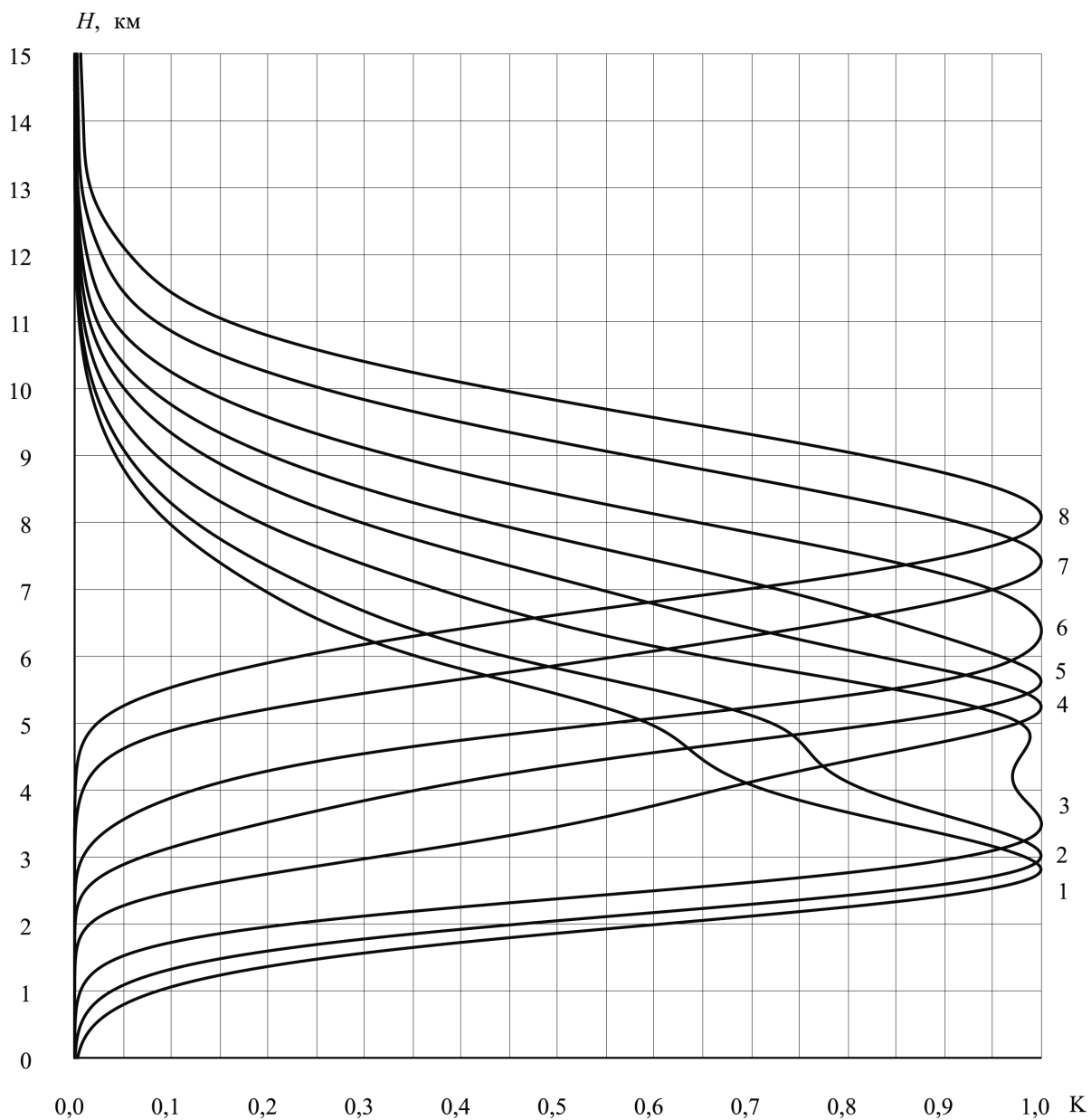


Рис. 7. Весовые функции для восходящего излучения атмосферного водяного пара: угол падения 45° ; тропики, стандартная атмосфера; радиояркостная температура воздуха – 300 К, давление – 1013 мб; влажность – $19,00 \text{ г/м}^3$; интегральная влажность – $4,14 \text{ г/см}^2$

Кривая	Частота, ГГц	Максимум, км	Кривая	Частота, ГГц	Максимум, км
1	300,00	2,80	5	323,00	5,60
2	310,00	3,00	6	324,00	6,40
3	317,00	3,50	7	325,00	7,40
4	321,00	5,20	8	325,60	8,10

Литература

1. *Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т.* (1974) Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974. 187 с.
2. *Жевакин С.А., Наумов А.П.* (1965) К расчету коэффициента поглощения в атмосферном кислороде // Радиотехника и электроника. 1965. Т. 10. № 6. С. 987–995.
3. *Жевакин С.А.* (1986) Полуэмпирическая теория поглощения радиоволн молекулярным кислородом атмосферы. Новые результаты // 2-я Всесоюз. шк.-симп. по распространению ММ и СМ-волн в атмосфере. Фрунзе: Илим, 1986. С. 16.
4. *Жевакин С.А.* (1987) Создание модели ослабления СМ и ММ-волн, метода диагностики и прогнозирования состояния радиоканалов для различных метеоусловий на основе дистанционного зондирования атмосферы: Отчет по НИР «Трамплин-3 НИРФИ». № 0187.0050516. Горький, 1987.
5. *Жевакин С.А., Наумов А.П.* (1964) Поглощение сантиметровых и миллиметровых радиоволн атмосферными парами воды // Радиотехника и электроника. 1964. Т. 9. № 8. С. 1327–1337.
6. *Зражевский А.Ю.* (1976) Методика расчета поглощения в атмосферных парах воды в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах // Радиотехника и электроника. 1976. Т. 21. № 5. С. 951–957.
7. *Clatchey R.A., Fenn R.W., Selby J.E.A. et al.* (1972) Optical properties of the atmosphere. 3rd ed. // AFCRL-72-0497. 1972. P. 108.

Radiobrightness Temperature Investigation of the Tropic Atmosphere in Lines 183 and 325 GHz

A.G. Semin¹, A.V. Kuzmin², Yu.B. Khapin², E.A. Sharkov²

¹ *State Pedagogical University, Penza, Russia
440026, Penza, 37, Lermontov str.
E-mail: semin@sura.ru*

² *Space Research Institute, Russian Academy of Sciences
117997, Moscow, 84/32, Profsoyuznaya Str.
E-mails: kuzmin@iki.rssi.ru; yuhapin@gmail.com; easharkov@iki.rssi.ru*

In the paper a possibility of the water vapor detailed profile retrieval in tropical atmosphere as a result of satellite thermal microwave radiations measurements is considered. In direct problem is analysed possibility of the recovering the water vapor profile on 8-10 high-altitude levels before height 10 km with use the resonance absorption line 183 and 325 GHz. The Decision of this problem, certainly, will in principal be important at a walk in study of the physical conditions of the genesis and evolutions tropical cyclones.

Keywords: water vapor detailed profile retrieval at atmosphere, microwave radiometry, radio brightness temperature.