

# **О возможностях восстановления детального профиля водяного пара по спутниковым данным в зонах крупномасштабных тропосферных возмущений**

**Ю.Б. Хапин<sup>1</sup>, А.В. Кузьмин<sup>1</sup>, А.Г. Семин<sup>2</sup>, Е.А. Шарков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Институт космических исследований РАН,  
117997 Москва, Профсоюзная 84/32

E-mails: [yuhapin@gmail.com](mailto:yuhapin@gmail.com), [kuzmin@iki.rssi.ru](mailto:kuzmin@iki.rssi.ru), [easharkov@iki.rssi.ru](mailto:easharkov@iki.rssi.ru);

<sup>2</sup> Пензенский государственный педагогический университет,  
440026, г. Пенза, ул. Лермонтова, 37  
E-mail: [semin@sura.ru](mailto:semin@sura.ru)

Радиометрические спутниковые данные могут быть с успехом использованы не только опосредованно для восстановления значений метеорологических параметров, но и непосредственно, в качестве прямых характеристик теплового и динамического взаимодействия океана и атмосферы. В настоящей работе рассматривается возможность получения детальных данных по восстановлению профиля водяного пара в атмосфере. Решение этой задачи, несомненно, будет принципиально важным шагом в изучении физических условий генезиса и эволюции тропических циклонов. Анализируются новые подходы к формированию методики детального (8–10 градаций на высотах от 0 до 10 км) восстановления профиля водяного пара с включением данных как по слабой линии (22,2 ГГц), так и сильных линий поглощения (183 и 325 ГГц). Наряду с этим, чтобы исключить влияние неопределенности в определении профиля температуры, рассматривается целесообразным ввести в состав радиометра измерений в линии 118 ГГц.

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

Значительные усилия, предпринятые в течение последних 40 лет по изучению изменчивости температурно-влажностных полей турбулентной атмосферы Земли на мезо и синоптических масштабах в зонах активного тропического циклогенеза не выявили, однако, физически адекватной картины взаимодействия этих процессов. В первую очередь это относится к таким сложным и энергетически емким метеообъектам в тропиках как катастрофические атмосферные вихри – тропические циклоны. Циклоны представляют собой своеобразный механизм эффективного сброса избыточного тепла в тропической атмосфере. Таким образом, катастрофические явления играют важную роль при установлении климатического температурного режима Земли, отводя излишнее тепло и способствуя предотвращению чрезмерного перегрева планеты в тропической зоне. Поэтому получение детальных данных по восстановлению профиля водяного пара, несомненно, является принципиально важным шагом в изучении физических условий генезиса и эволюции тропических циклонов.

Результаты исследований показывают, что радиояркостная температура адекватно отражает пространственно-временные изменения энергетики и динамики атмосферных процессов. Радиометрические спутниковые данные могут быть с успехом использованы не только опосредованно для восстановления значений метеорологических параметров, но и непосредственно, в качестве прямых характеристик теплового и динамического взаимодействия океана и атмосферы.

В настоящей работе рассматривается возможность восстановления профиля водяного пара по спутниковым данным в зонах крупномасштабных тропосферных возмущений для атмосферы средних широт. Возможность восстановления профиля водяного пара проверяется модельными расчетами для системы атмосфера–поверхность.

Радиояркостная температура системы атмосфера–поверхность на частоте  $\nu$  в миллиметровом диапазоне радиоволн под углом  $\theta$ , регистрируемая антенной радиометра на искусственном спутнике Земли определяется следующим выражением [1]:

$$T_{bv}(\theta) = [1 - R_v(\theta_S)] T_S \exp(-\tau_{0v} \sec \theta) + \int_0^\infty T(h) \gamma_v(h) \exp \left[ - \int_h^\infty \gamma_v(h') \sec \theta dh' \right] \sec \theta dh + \\ + R_v(\theta_S) \exp(-\tau_{0v} \sec \theta) \int_0^\infty T(h) \gamma_v(h) \exp \left[ - \int_0^h \gamma_v(h') \sec \theta dh' \right] \sec \theta dh, \quad (1)$$

где  $R_v(\theta_S)$  – энергетический коэффициент отражения поверхности,  $\theta_S$  – угол падения излучения на подстилающую поверхность,  $T_S$  – температура поверхности,  $\tau_{0v}$  – интегральное поглощение радиоволн в зените,  $T(h)$  – вертикальный профиль температуры,  $\gamma_v(h)$  – по-гонный коэффициент поглощения. 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 плоскослоистой, явлением рефракции для надирных углов  $\theta < 80^\circ$  допустимо пренебречь, в этом случае интегральное поглощение в атмосфере под углом  $\theta$  определяется выражением

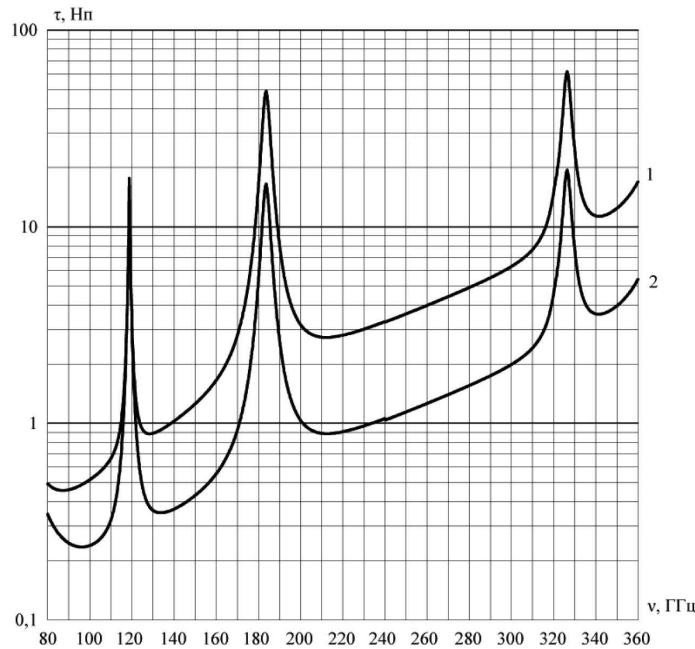
$$\tau_v(\theta) = \int_0^\infty \gamma_v(h) \sec \theta dh = \tau_{0v} \sec \theta. \quad (2)$$

Поглощение радиоволн в сантиметровом и миллиметровом диапазоне длин волн в атмосферном кислороде подробно рассмотрено в работах [2–4], поглощение радиоволн в атмосферном водяном паре в этом диапазоне приводится в работах [5–6]. Модельные расчеты интегрального поглощения электромагнитного излучения в диапазоне 80–360 ГГц в молекулярном кислороде проводилась по методике [4], расчеты поглощения в атмосферном водяном паре проводились по методикам [6]. Расчет интегрального поглощения в атмосфере и радиояркостной температуры атмосферы в диапазоне 80–360 ГГц проводился численным интегрированием с шагом 100 м до высоты 25 км для наблюдения под углом  $45^\circ$  от надира. Расчеты проведены для средних широт летней и зимней атмосфер [7].

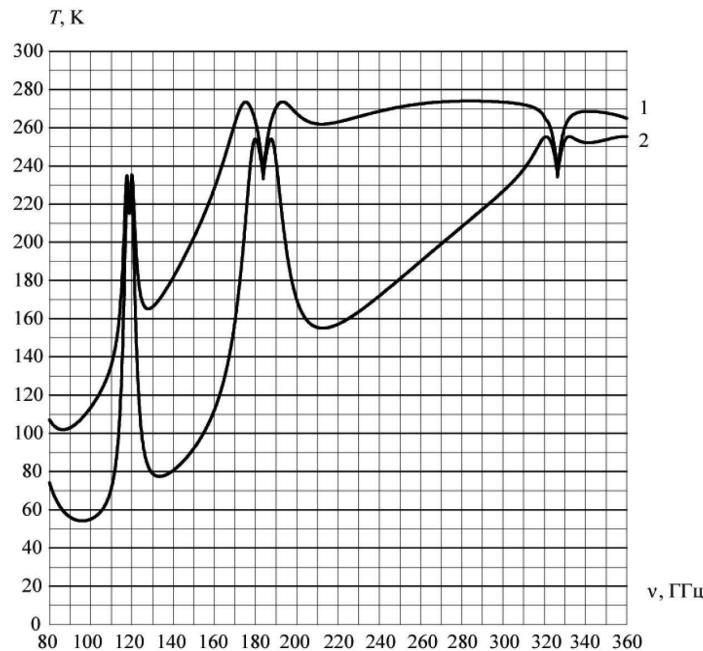
На рис. 1 представлены результаты расчета интегрального поглощения в атмосферном водяном паре. В центре резонансной линии 183 ГГц значение интегрального поглощения достигает 49 Нп для летней атмосферы и 16,5 Нп для зимней атмосферы. В центре резонансной линии 325 ГГц поглощение составляет 60 и 19,5 Нп для летней и зимней атмосфер соответственно. Столь значительная разность в поглощении для летней и зимней атмосфер связана прежде всего с разностью интегрального содержания водяного пара 2,94 и 0,86 г/см<sup>2</sup> в летней и зимней атмосферах.

На рис. 2 показана радиояркостная температура восходящего радиотеплового излучения свободной атмосферы. В окнах прозрачности на частоте 140 ГГц разница в яркостных температурах летней и зимней атмосфер превышает 100 К, а на частоте 220 ГГц – 105 К. В центрах резонансных линий эта разница составляет около 3 К.

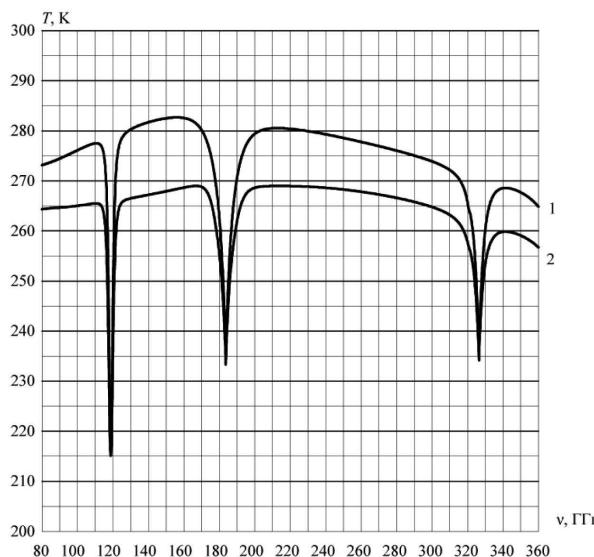
На рис. 3 представлена радиояркостная температура системы атмосфера–поверхность при измерении с орбиты искусственного спутника Земли. Разница в радиояркостных температурах летней и зимней атмосферы составляет около 15 К для частот 140 и 220 ГГц и около 5 К в центрах линий.



*Рис. 1. Интегральное поглощение электромагнитного излучения в атмосфере в диапазоне 80–360 ГГц, угол визирования 45° от надира. Кривая 1 соответствует летнему сезону на широте 45°; температура воздуха у поверхности – 294 К; влажность – 14,0 г/м<sup>3</sup>; давление – 1013 мб; интегральная влажность – 2,94 г/см<sup>2</sup>. Кривая 2 – зима, широта – 45°; температура воздуха у поверхности – 272,2 К; влажность – 3,5 г/м<sup>3</sup>; давление – 1018 мб; интегральная влажность – 0,86 г/см<sup>2</sup>*

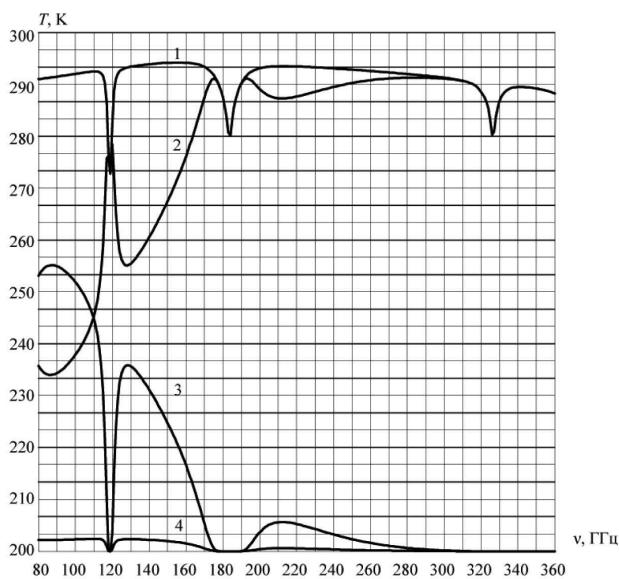


*Рис. 2. Радиояркостная температура электромагнитного излучения атмосферы в диапазоне 80–360 ГГц; угол наблюдения 45°. Кривая 1 рассчитывалась для летнего сезона на широте 45°, температура воздуха у поверхности – 294 К; влажность – 14,0 г/м<sup>3</sup>; давление – 1013 мб; интегральная влажность – 2,94 г/см<sup>2</sup>. Кривая 2 – для зимнего сезона на широте 45°, температура воздуха у поверхности – 272,2 К; влажность – 3,5 г/м<sup>3</sup>; давление – 1018 мб; интегральная влажность – 0,86 г/см<sup>2</sup>*



*Рис. 3. Радиояркостная температура электромагнитного излучения системы атмосфера–поверхность в диапазоне 80–360 ГГц, коэффициент отражения поверхности – 0,1, угол наблюдения 45°. Кривая 1 рассчитывалась для летнего сезона на широте 45°, температура воздуха у поверхности – 294 К; влажность – 14,0 г/м<sup>3</sup>; давление – 1013 мб; интегральная влажность – 2,94 г/см<sup>2</sup>. Кривая 2 – для зимнего сезона на широте 45°, температура воздуха у поверхности – 272,2 К; влажность – 3,5 г/м<sup>3</sup>; давление – 1018 мб; интегральная влажность – 0,86 г/см<sup>2</sup>.*

На рис. 4. приводится радиояркостная температура системы атмосфера–поверхность для летней атмосферы, широта – 45°. Как следует из расчетов, основной вклад в яркостную температуру системы атмосфера–поверхность дает восходящее излучение атмосферы. Вклад излучения поверхности и нисходящего излучения атмосферы, отраженного поверхностью проявляются только в окнах прозрачности. В окрестности резонансных линий 183 и 325 ГГц яркостная температура системы атмосфера–поверхность практически полностью определяется восходящим излучением атмосферы.



*Рис. 4. Вклад в радиояркостную температуру системы атмосфера–поверхность составляющих излучения, угол наблюдения 45°. Расчет произведен для летнего сезона на широте 45°, температура воздуха у поверхности – 294 К; влажность – 14,0 г/м<sup>3</sup>; давление – 1013 мб; интегральная влажность – 2,94 г/см<sup>2</sup>: 1 – радиояркостная температура системы атмосфера–поверхность; 2 – радиояркостная температура восходящего излучения атмосферы; 3 – радиояркостная температура поверхности, ослабленная атмосферой; 4 – радиояркостная температура нисходящего излучения атмосферы, отраженного поверхностью и ослабленного атмосферой*

Для оценки возможности детального восстановления профиля атмосферного водяного пара по данным спутниковых измерений электромагнитного излучения системы атмосфера–поверхность в линиях резонанса 183 и 325 ГГц проведен расчет весовых функций. Расчет проводился по следующей схеме. Атмосфера до высоты 25 км разбивалась на слои высотой  $\Delta h = 100$  м, где рассчитывалось погонное поглощение в середине каждого слоя. Радиояркостная температура от  $i$ -го атмосферного слоя за границей атмосферы с учетом ослабления излучения вышележащими слоями может быть представлена в виде:

$$T_{bi} = T(h_i)\gamma(h_i)\Delta h \sec \theta \sum_{k=i+1}^n \gamma(h_k)\Delta h \sec \theta, \quad (3)$$

где  $T(h_i)$  – температура  $i$ -го слоя;  $\gamma(h_i)$  – погонное поглощение в середине слоя;  $n = 250$  – число слоев. Яркостная температура каждого слоя нормируется к температуре слоя с максимальной температурой.

Результаты расчета весовых функций в окрестности линии 183 ГГц приведены на рис. 5, а для линии 325 ГГц – на рис. 6.

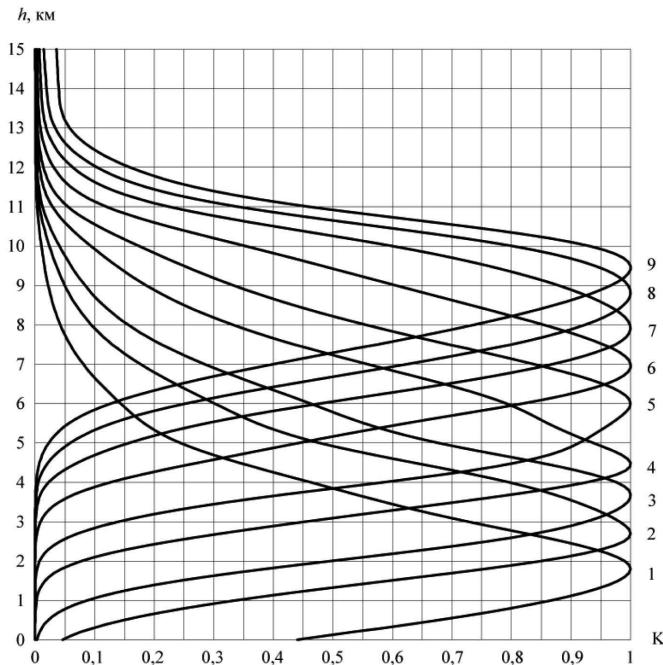


Рис. 5. Весовые функции для восходящего излучения атмосферного водяного пара в окрестности резонанса 183 ГГц (170–183,6 ГГц). Расчет произведен для летнего сезона на широте 45°, температура воздуха у поверхности — 294 К; влажность — 14,0 г/м³; давление — 1013 мб; интегральная влажность — 2,94 г/см²:

<i>Кривая</i>	<i>Частота, ГГц</i>	<i>Высота, км (максимум)</i>	<i>Кривая</i>	<i>Частота, ГГц</i>	<i>Высота, км (максимум)</i>
1	170	1,8	6	182	7,0
2	176	2,7	7	182,6	7,9
3	178	3,7	8	183	8,8
4	180	4,5	9	183,6	9,5
5	181	6,0			

Результаты проведенных расчетов показывают возможность восстановления профиля водяного пара по 8–10 уровням на высотах от 0 до 10 км по радиометрическим измерениям со спутника. Целесообразно проводить восстановление профиля водяного пара с включением данных как по слабой линии (22,2 ГГц), так и сильных линий поглощения (183 и 325 ГГц). Наряду с этим, чтобы исключить влияние неопределенности в определении профиля температуры, как нам кажется, следует ввести в состав радиометрической системы измерения в линии 118 ГГц. Кроме этого, измерения в окнах прозрачности, а именно, на частотах 37,5; 89; 150; 250 ГГц позволят восстанавливать профили влажности атмосферы в облачных и безоблачных условиях, а также в случае работы над поверхностью с неизвестной излучательной способностью. Все это позволит проводить измерения температурно-влажностных полей атмосферы Земли в мезо и синоптических масштабах.

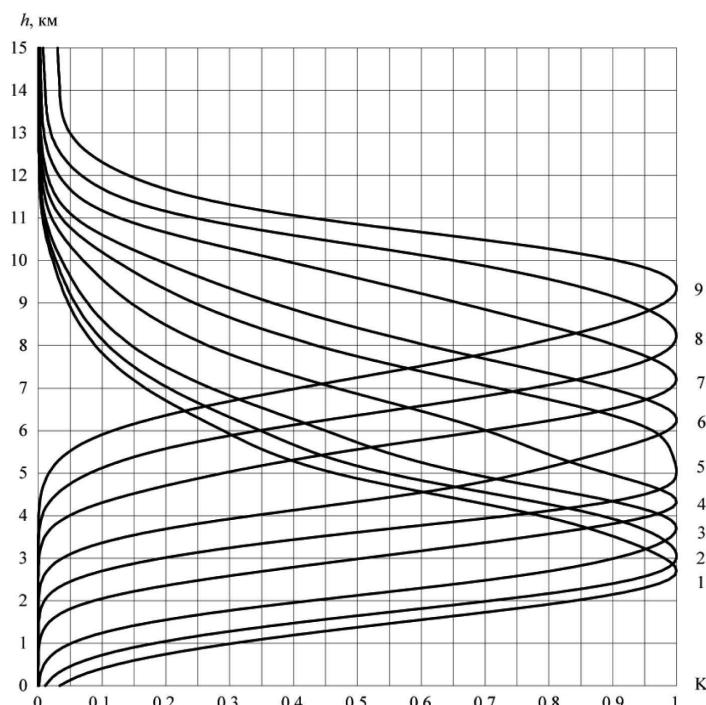


Рис. 6. Весовые функции для восходящего излучения атмосферного водяного пара в окрестности резонанса 325 ГГц (300–326,4 ГГц). Расчет произведен для летнего сезона на широте 45°, температура воздуха у поверхности — 294 К; влажность — 14,0 г/м<sup>3</sup>; давление — 1013 мб; интегральная влажность — 2,94 г/см<sup>2</sup>:

<i>Кривая</i>	<i>Частота, ГГц</i>	<i>Высота, км (максимум)</i>	<i>Кривая</i>	<i>Частота, ГГц</i>	<i>Высота, км (максимум)</i>
1	300	2,7	6	324	6,3
2	310	3,1	7	325	7,2
3	317	3,7	8	325,6	8,2
4	321	4,3	9	326,4	9,3
5	323	5,0			

В дальнейшем предполагается продолжить работу по исследованию возможности восстановления профилей влажности в линиях резонанса 183 и 325 ГГц для тропических широт.

## Литература

1. *Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т.* Радиоизлучение Земли как планеты // М.: Наука, 1974.
2. *Жевакин С.А., Наумов А.П.* К расчету коэффициента поглощении в атмосферном кислороде // Радиотехника и электроника. 1965. Т. 10. № 6. С. 987–995.
3. *Жевакин С.А.* Полуэмпирическая теория поглощения радиоволн молекулярным кислородом атмосферы. Новые результаты // 2-я Всесоюзная школа-симпозиум по распространению мм- и см-волн в атмосфере. Фрунзе: Илим, 1986. С. 16.
4. *Жевакин С.А.* 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.* Поглощение сантиметровых и миллиметровых радиоволн атмосфернымиарами воды // Радиотехника и электроника. 1964. Т. 9. № 8. С. 1327–1337.
6. *Зражевский А.Ю.* Методика расчета поглощения в атмосферных парах воды в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах // Радиотехника и электроника. 1976. Т. 21. № 5. С. 951.
7. *Clatchey R.A., Fenn R.W., Selby J.E.A. et al.* Optical properties of the atmosphere. 3<sup>rd</sup> ed. AFCRL-72-0497. 1972. P. 108.

## About Possibility of Water Vapor Detailed Profile Recovery by Satellite Data in Tropospheric Perturbation Large-Scale Area

**Yu.B. Khapin<sup>1</sup>, A.V. Kuzmin<sup>1</sup>, A.G. Semin<sup>2</sup>, E.A. Sharkov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow,  
117997 Moscow, 84/32 Profsoyuznaya Str.

E-mails: [yuhapin@gmail.com](mailto:yuhapin@gmail.com), [kuzmin@iki.rssi.ru](mailto:kuzmin@iki.rssi.ru), [easharkov@iki.rssi.ru](mailto:easharkov@iki.rssi.ru);

<sup>2</sup>State Pedagogical University, Penza, Russia  
440026, Penza, 37 Lermontov str.

E-mail: [semin@sura.ru](mailto:semin@sura.ru)

Radiometric satellite data may be successful use for not only recovering meteorology parameters but for direct characteristics determination of thermal and dynamic sea-atmosphere interaction. There are determining possibilities of water vapor detailed profile recovery at atmosphere in this paper. It's really important to decide this problem for study physically problems of evolution and genesis of tropical cyclones. There are new approaches for method of water vapor detailed profile recovery (8–10 levels for 0–10 km height) including data of strong (183 and 325 GHz) and weak (22.2 GHz) lines in this work. For reduce undefined factors in temperature profile determination we decided to include line 118 GHz to Satellite radiometer.

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