

**УДК 551.521:629.78**

**Численное моделирование радиояркостных температур разорванных облачных полей в микроволновом диапазоне.**

Илюшин Я.А.<sup>1,2</sup>, Кутуза Б.Г.<sup>2</sup>, Егоров Д.П.<sup>2</sup>, Копцов Я.В.<sup>1</sup>,

1. Россия 119992 ГСП-2 Москва Ленгоры МГУ физический факультет

2. Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН Моховая 11-7, Москва, 125009, Россия тел. +7(495)629-33-65, факс. +7(495)629-36-78

Проведено численное моделирование радиояркостных температур теплового радиоизлучения разорванных облачных полей в микроволновом диапазоне. В соответствии с ранее известными моделями разорванной облачности построены модельные случайные облачные поля. Выполнена трассировка лучей радиометрического зондирования и проделаны расчеты радиояркостных температур, наблюдаемых прибором вдоль лучевых траекторий. Показаны систематические расхождения результатов для рассмотренных моделей случайной облачности по сравнению с плоскостной моделью.

Ключевые слова: разорванная облачность, радиояркостная температура, радиометр

**Numerical simulations of microwave radio brightness temperatures of broken cloud fields.**

Ilyushin Ya.A., Kutuza B.G., Egorov D.P., Koptsov Ya.V.

Numerical simulation of the radio brightness temperatures of thermal radio emission coming from broken cloud fields in the microwave spectral band. Random cloud fields were simulated according to the known models of the broken cloud fields. Systematic deviations of the newly obtained results from the ones known for the simple flat layered model are shown.

Keywords: broken clouds, radio brightness temperatures, radiometer

**Введение.**

Важной задачей дистанционного зондирования окружающей среды является контроль состояния атмосферы и морской поверхности. Зондирование атмосферы методом приема атмосферного радиотеплового излучения является развитием наземных исследований радиотеплового излучения атмосферы. Одним из методов таких исследований является СВЧ-радиометрическое зондирование с искусственных спутников Земли. Метод основан на измерениях уходящего теплового излучения системы атмосфера – морская поверхность в радиодиапазоне. Спутниковые СВЧ-радиометрические измерения, проведенные в СССР, США и Индии, показали возможность определения в глобальном масштабе таких важных метеорологических и океанологических параметров, как полная масса водяного пара в атмосфере, водозапас облаков, температура поверхности океана и др. [1-2]. Для исследования гидрометеоров могут быть использованы также радиоастрономические методы исследования атмосферы, развитые в [3] применительно к свободной атмосфере. Наблюдения радиотеплового излучения системы «атмосфера-поверхность океана» с искусственных спутников Земли (ИСЗ) позволяют получить

полезную информацию о состоянии облачных полей в атмосфере и количественно определить такие метеопараметры как полную массу водяного пара, водозапас и эффективную температуру облаков [1,4].

В работе Кутузы и Смирнова [5] рассмотрено влияние пространственных распределений параметров облачных полей на радиотепловое излучение системы «атмосфера-поверхность океана» в диапазоне 3-150 ГГц. В этой работе проведены расчеты поглощения в облаках для модели изотермического облака и облака с вертикальным градиентом температуры -6.5 град/км и распределением влажности согласно [6]. Как показано в этой работе, различия оказываются невелики и не превышают 1.5%.

В работе Гагарина и Кутузы [7] проведена оценка влияния шероховатости морской поверхности и разрывности кучевой облачности на точность определения полной массы водяного пара в атмосфере и водозапаса облаков по спутниковым СВЧ-радиометрическим измерениям. В этой работе предлагается определять полное атмосферное поглощение по измерениям радиояркостной температуры системы атмосфера-морская поверхность. Там принято, что поглощение в атмосфере без осадков в СВЧ-диапазоне с высокой степенью точности определяется поглощением в каплях облаков, обусловленным рэлеевским рассеянием, и молекулярным поглощением в водяном паре и кислороде.

Целью настоящей работы является исследование систематических ошибок оценки метеорологических параметров атмосферы по плоскостной радиометрической модели, связанных со случайной природой реальных разорванных облачных полей. Для этого в работе проводится непосредственное численное моделирование радиояркостных температур разорванной облачности на различных частотах микроволнового диапазона длин волн. Рассчитанные радиояркостные температуры непосредственно сравниваются с результатами расчетов для модели плоского слоя с эквивалентным усредненным по площади водозапасом.

### **Численное моделирование случайных облачных полей и радиояркостных температур.**

Случайные облачные поля генерировались в соответствии с Планковской моделью [8] с соответствующим распределением диаметров и однозначной связью мощности облака с диаметром [9].

По результатам обработки обширной базы стереоскопических фотографий облачности в районе полуострова Флорида (США), Планком [8] была предложена следующая формула

$$n(D) = Ke^{-\alpha D}, 0 \leq D \leq D_m,$$

Где  $D$  – диаметр облака,  $D_m$  – максимальный диаметр облака в данном ансамбле,  $K$  – нормировочный коэффициент,  $\alpha$  -- параметр, зависящий от времени суток и локальных климатических условий. Связь между мощностью облака  $N$  и его диаметром  $D$  имеет вид

$$H = \eta D \left( \frac{D}{D_m} \right)^\beta,$$

где  $\eta, \beta$  -- параметры.

В СВЧ диапазоне влиянием процессов рассеяния в облачной атмосфере можно пренебречь. В этих условиях, а также в предположении локального термодинамического равновесия радиояростная температура плоскостой атмосферы при наблюдении с поверхности Земли может быть представлена в виде [9]

$$T_b(\lambda, z) = \int_0^\infty T(h) \gamma_\lambda(h) \exp \left( - \int_0^h \gamma_\lambda(h') \sec z dh' \right) \sec z dh,$$

где  $T(h)$  – температура атмосферы на высоте  $h$ ,  $\gamma_\lambda(h)$  – полный коэффициент поглощения,  $z$  – зенитный угол,  $\lambda$  – длина волны.

### Диэлектрические свойства атмосферных газов и облаков

Полный коэффициент поглощения в облачной атмосфере складывается из молекулярного поглощения в кислороде и в водяном паре, а также из поглощения в мелких капельках облаков. Коэффициенты поглощения излучения водяным паром и значения полного интегрального поглощения кислородом в вертикальном столбе атмосферного воздуха для различных длин волн можно рассчитать по известным формулам [10,11].

Принимая рассеяние микроволнового излучения на сферических частицах воды в облаке рэлеевским, для объемного коэффициента поглощения жидкокапельной фазой в облаке нетрудно получить формулу

$$\kappa = \frac{3w}{\rho} k \operatorname{Im} \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right),$$

где  $w$  - водность облака,  $\text{кг/м}^3$ ,  $\rho$  - плотность воды,  $\text{кг/м}^3$ ,  $k = 2\pi / \lambda$  - волновое число излучения,  $m$  - коэффициент преломления воды.

Значения температуры, водозапаса и мощности облаков для Cu cong и Cu med приведены в [9]. Высотный профиль водности каждого облака рассчитывался по формуле

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

Где  $\xi = h / H$  -- приведенная высота внутри облака,  $H$  – мощность облака, км,  $W$  – водозапас облака,  $\text{кг/м}^2$ ,  $w(\xi)$  -- водность облака,  $\text{кг/м}^3$ ,  $w(\xi_0)$  -- максимальная водность облака,  $\xi_0$  --

приведенная высота максимальной водности облака,  $\mu_0, \psi_0$  -- безразмерные параметры модели. Согласно [9], значения параметров равны  $\mu_0 = 3.27, \psi_0 = 0.67, \xi_0 = 0.83$ . Зависимость водозапаса облаков (кг/м<sup>2</sup>) типа Cumulus от мощности облака (км) согласно приведенным в [9] табличным данным, приближенно аппроксимировалась формулой

$$W = 0.132574H^{2.30215}.$$

### Результаты моделирования.

На основе сформулированной модели были проведены расчеты радиоярких температур для зондирования как с поверхности Земли, так и с орбиты. Для наблюдений с Земли радиояркие температуры рассчитаны в зависимости от относительной координаты прибора и облачного поля вдоль траектории движения, что соответствует типичной ситуации движения облаков, увлекаемых ветром. Для наблюдений с орбиты построены двумерные распределения радиоярких температур по площади облачного поля, усредненных по полю зрения прибора с весовой функцией, соответствующей диаграмме направленности антенны. В обоих случаях установлены значительные систематические расхождения результатов с результатами для плоского облачного слоя с эквивалентными эффективными параметрами (средняя мощность, влагосодержание).

### Литература

1. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение Земли как планеты. М.:Наука, 1974. 188 с.
2. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Исследование Земли из космоса. 1981 №1 с.63-70.
3. Nicoll G.R. The measurement of Thermal and Similar radiations at Millimeter wavelengths. Proc. IEEE, B 104, N17. 1957. P.519.
4. Аквилонина А.Б., Кутуза Б.Г., Митник Л.М. Широтное распределение водозапасов облаков над земным шаром по данным измерения с ИСЗ «Космос-243» -- Известия АН СССР, ФАО, 1971, т.7. С.139-144.
5. Кутуза Б.Г., Смирнов М.Т. Влияние облачности на усредненное радиотепловое излучение системы Атмосфера-Поверхность океана. Исследования Земли из космоса 1980 (№3) с. 76-83
6. Войт Ф.Я., Мазин И.П. Водность кучевых облаков. Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана, 1972. №2. Т.8. С.1166-1176.
7. Гагарин С.П., Кутуза Б.Г. Влияние морского волнения и неоднородностей атмосферы на СВЧ излучение системы атмосфера – морская поверхность. Исследование Земли из космоса. 1983 №3. С.88-99.
8. Plank V.G. The size distribution of cumulus clouds in representative Florida populations. J.Appl.Met. 1969. V.8. N.1. P.46-67.
9. Кутуза Б.Г., Данилычев М. В., Яковлев О.И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности М.:2017
10. Rec. ITU-R P.676-3 1 RECOMMENDATION ITU-R P.676-3 ATTENUATION BY ATMOSPHERIC GASES (Question ITU-R 201/3) (1990-1992-1995-1997)

11. Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K. Microwave Remote Sensing, Active and Passive, V.1. Addison-Wesley, Reading, MA, 1981.