

## **О регрессионных характеристиках яркостных температур и влаго- и водозапаса при дистанционном зондировании атмосферы на двух частотах**

Ю.В. Рыбаков<sup>1</sup>, О.А. Герасимов<sup>1</sup>, Г.Н. Ильин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова»

194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, д. 7.

E-mail: y.rybakov@mail.ru

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной астрономии Российской академии наук

191187, Санкт-Петербург, наб. Кутузова, д. 10.

E-mail: igen@iaaras.ru

*Анализируется возможность применения известных регрессионных соотношений яркостной температуры атмосферы на частотах 20,7 и 31,4 ГГц и интегральных значений влаго- и водозапаса атмосферы к экспериментальным данным двухчастотного СВЧ радиометрического комплекса ИПА РАН в п. Светлое.*

*Ключевые слова: радиояркая температура, радиометр, влагосодержание, водозапас*

## **On the regression characteristics of brightness temperatures and moisture and water content in remote sensing of the atmosphere at two frequencies**

Yu.V. Rybakov<sup>1</sup>, O.A. Gerasimov<sup>1</sup>, G.N. Il'in<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Voeikov Main Geophysical Observatory, St. Petersburg.

<sup>2</sup> Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg.

*The possibility of applying some known regression relationships of the atmospheric brightness temperature and integral values of atmospheric moisture and water content to the experimental data of a dual-frequency microwave radiometer was analyzed.*

*Keywords: microwave radiometry, dual-frequency, atmospheric moisture, water content*

### **Введение**

В настоящее время СВЧ радиометрия представляется наиболее разработанным теоретически и проверенным экспериментально методом получения данных об интегральных характеристиках водозапаса атмосферы  $Q$  и водозапаса облаков  $W$ . Важной особенностью радиометрической системы (РМС), производящей подобные измерения, является всепогодность и оперативность получения текущих значений  $Q$  и  $W$  в любое время суток – с интервалом от нескольких секунд до минут в зависимости от решаемых задач. Особенностью косвенного измерения  $Q$  и  $W$  является отсутствие эталонов этих величин, что обусловлено их природной изменчивостью. Поэтому все РМС калибруются по антенной температуре с помощью азотных температурных эталонов, располагаемых перед апертурой антенны РМС, а также методом угломестных разрезов. Для уменьшения влияния окружающего фона антенны РМС выполняются в виде гофрированных рупоров или рупоров Поттера со спадающим амплитудным распределением по апертуре и соответственно уменьшенным до 1-2% коэффициентом рассеяния вне главного лепестка диаграммы направленности. Далее используются рекомендации МСЭ-R Р.676-12 [1] и Р.840-8 [2], по которым измеряемые радиояркие температуры атмосферы  $T_b(f)$  пересчитываются в величины  $Q$  и  $W$ .

Фактически этот алгоритм является регрессионным соотношением между  $Q$ ,  $W$  и  $T_B(f)$  для теоретически обоснованных моделей излучающей атмосферы применительно к используемому частотному диапазону и местонахождению РМС. Для верификации получаемых данных  $Q$  используют ежедневные данные близкорасположенных станций аэрологического зондирования, результаты обработки сигналов навигационных спутников (GPS, Глонасс), а также сравнение с показаниями измерителей  $Q$  других типов [3]. Верификация  $W$  практически не используется и основана только на модельных расчетах. На начальном этапе исследований возможности определения  $W$  использовался специальный комплекс, принимающий сигнал со спутника, находящегося на геостационарной орбите [4].

### Базисные соотношения

Основные соотношения известны из [5]. Кажущаяся (яркостная) температура атмосферы в зените  $T_B(f)$  может быть представлена в виде:

$$T_B(f) = T_{cos} e^{-\tau_f} + k_f(z) T(z) e^{-\tau_f(0,z)} dz, \quad (1)$$

где  $T_{cos} \approx 2,7K$  – постоянная, характеризующая фоновое излучение космоса; атмосфера предполагается нерассеивающей средой и валидируется для безоблачной атмосферы или недождящих облаков,

$k_f(z)$  – связан с поглощением в кислороде  $O_2$ , водяном паре  $H_2O$  и облачной влаге,

$T(z)$  – высотный профиль термодинамической температуры.

Вводя эффективную температуру атмосферы  $T_m$  в виде

$$T_m(f) = \frac{\int T(z) k_f(z) e^{-\tau_f(0,z)} dz}{\int k_f(z) e^{-\tau_f(0,z)} dz} \quad (2)$$

можно представить  $T_B(f)$  в виде

$$T_B(f) = T_{cos} e^{-\tau_f} + T_m(f) [1 - e^{-\tau_f}], \quad (3)$$

и для  $\tau_f \ll 1$ :

$$\tau_f = \frac{T_B(f) - T_{cos}}{T_m(f) - T_{cos}}. \quad (4)$$

Согласно [6],  $T_m = 0,95T_o$  для 20,7 ГГц и  $T_m = 0,94T_o$  для 31,3 ГГц, где  $T_o$  – приземная температура.

Поглощение в зените в общем случае может быть представлено в виде

$$\tau_f = \tau_{O_2f} + k_{H_2O}(f)Q + k_{obl}(f)W. \quad (5)$$

Используя (4) и (5), можно записать два уравнения регрессионного соотношения в виде:

$$\begin{aligned} Q &= a_0 + a_1 T_B(f_1) + a_2 T_B(f_2) \\ W &= b_0 + b_1 T_B(f_1) + b_2 T_B(f_2) \end{aligned}$$

Все константы для комбинации частот  $f_1=20,6$  ГГц и  $f_2 = 31,6$  ГГц были найдены эмпирически и имеют вид:

$$\begin{aligned} Q &= -1,9 + 1,18T_B(20,6) - 0,56T_B(31,6) \text{ [мм]} \\ W &= -0,18 - 0,0114T_B(20,6) + 0,284T_B(31,6) \text{ [мм]} \end{aligned}$$

Место измерений – Денвер (США), высота 1,61 км, время проведения измерений – июль-сентябрь.

Главный вывод состоит в том, что точность СВЧ измерений не хуже или лучше аэрологических.

В более общем случае предполагается линейная связь  $Q$  и  $W$  не с  $T_B(f_1)$  и  $T_B(f_2)$ , а с  $\tau_{f_1}$  и  $\tau_{f_2}$ . В [7] она найдена в виде:

$$\begin{aligned} Q &= -0,1 + 269,7\tau_{f_1} - 117,7\tau_{f_2} \text{ [мм]} \\ W &= -0,1 - 2,29\tau_{f_1} + 5,63\tau_{f_2} \text{ [мм]} \end{aligned}$$

В [8] приведены дополнительные характеристики для разных пунктов и сезонов наблюдений. В таблицах 1 и 2 приведены соответствующие коэффициенты для регрессионных характеристик влаго- и водозапаса.

**Таблица 1. Коэффициенты для регрессионных характеристик водозапаса**

Город, сезон наблюдений	$a_0$	$a_1$	$a_2$
Sterling VA (июль-ноябрь)	-2,4036	1,0940	-0,4604
Sheridan CA (ноябрь-апрель)	-2,2182	1,1258	-0,4982
Oklahoma City OK (апрель-май)	-1,9915	1,0776	-0,4621
Denver CO (весь год)	-1,6554	1,0153	-0,4483

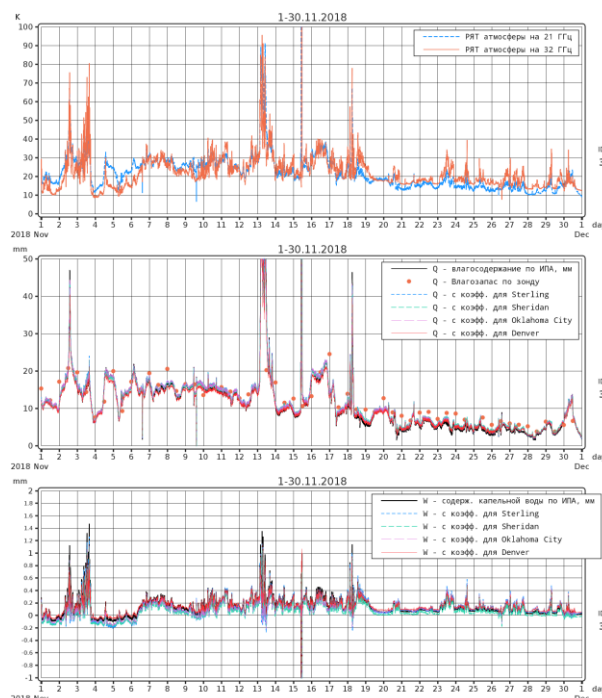
**Таблица 2. Коэффициенты для регрессионных характеристик водозапаса**

Город, сезон наблюдений	$b_0$	$b_1$	$b_2$
Sterling VA (июль-ноябрь)	-0,1648	-0,0184	0,0310
Sheridan CA (ноябрь-апрель)	-0,2092	-0,0123	0,0252
Oklahoma City OK (апрель-май)	-0,1366	-0,0162	0,0276
Denver CO (весь год)	-0,1322	-0,0086	0,0214

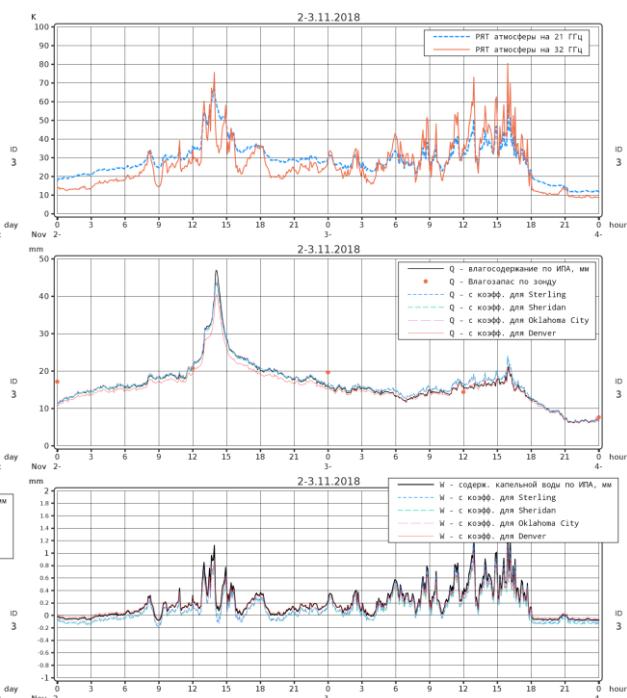
### Измерительный комплекс ИПА РАН и обработка результатов

Комплекс СВЧ [9] предназначен для измерения тропосферной задержки сигнала и работает на частотах 20,7 и 31,4 ГГц.

Первоначально был выбран массив данных за ноябрь 2018 г. На рис. 1 показаны данные ИПА за весь месяц – совмещенные результаты измерений  $T_b$  на двух частотах и результаты определения  $Q$  и  $W$ . Характерные временные фрагменты этих данных укрупнённо показаны на рис. 2, 3, 4.



**Рис. 1. Результаты за ноябрь 2018.**



**Рис. 2. Результаты за 2-3 ноября.**

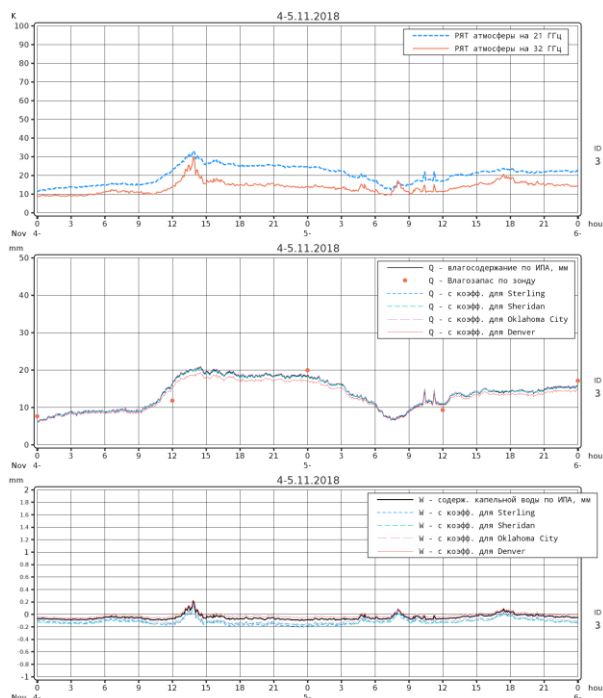


Рис. 3. Результаты за 4-5 ноября.

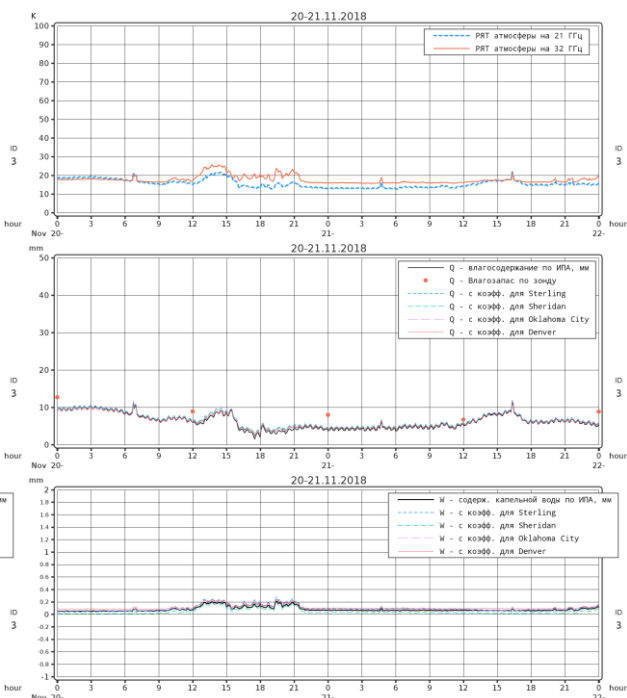


Рис. 4. Результаты за 20-21 ноября.

На этих же диаграммах построены результаты расчётов с использованием различных регрессионных соотношений из [8], коэффициенты для которых приведены выше (табл. 1 и 2). Значения величин, полученные ИПА по действующим рекомендациям, принимались в данном случае за «эталон».

В периоды, соответствующие сухой и безоблачной атмосфере, вычисленный водозапас  $W$  иногда принимает отрицательные значения, физически невозможные, что указывает на несовершенство исходной модели и необходимость её корректировки через введение аддитивного коэффициента.

Как видно из анализа, вычисленные значения влагозапаса  $Q$  очень близки между собой. Несмотря на различия в сезонах и географии получения исходных соотношений, разница между результатами редко выходит за 2 мм. Несколько более заметны относительные отличия для водозапаса  $W$ , однако ошибка не превышает 0,1 – 0,2 мм и также не представляется критичной.

## Выводы

Предложена и опробована методика оценки влаго- и водозапаса атмосферы, потенциально пригодная для прикладных задач. Существенное сокращение объёма вычислений может быть достигнуто без заметного увеличения ошибки.

Предполагается развить данную методику через использование экспериментальных данных, получаемых в разные времена года другими российскими станциями, что поможет уточнить и учесть влияние географических условий и сезонности.

*Работа выполнена по плану научно-технического сотрудничества между ГГО им. А.И. Воейкова и ИПА РАН.*

## Литература

1. Рекомендации МСЭ-R P.676-12 (08/2019). Затухание в атмосферных газах и связанное с ним воздействие.

2. Рекомендации МСЭ-R P.840-8 (08/2019). Ослабление из-за облачности и тумана.
3. Ипатов В.В. и др. Результаты сравнительных дистанционных измерений интегрального содержания водяного пара в столбе атмосферы // Труды ГГО. — 2015, вып. 577, стр. 141–155.
4. Snider J.B., Guiraud F.O., Hogg D.G. Comparison of Cloud Liquid Content Measured by Two Independent Ground-Based Systems. *J. Appl. Meteorology*, v.19, pp.577–579.
5. Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K. Microwave remote sensing. Active and passive. *Physical Basis*. V.3., pp.1331.
6. Wu S.C. Optimum Frequencies of a Passive Microwave Radiometer for Tropospheric Path-Length Correction, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, AP-27, pp.233–239.
7. Guiraud F.O., Howard J., Hogg D.G. A Dual-Channel Microwave Radiometer for Measurement of Precipitable Water Vapor and Liquid. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, v.GE-17, No 4, October, 1979, pp.129–136.
8. Hogg D.G., Guiraud F.O., Snider J.B., Decker M.T. and Westwater E.R. A Steerable Dual-Channel Microwave Radiometer for Measurement of Water Vapor and Liquid in the Troposphere. *J. Appl. Meteorology*, v.22, No 5, 1983, pp.789–806.
9. Ильин Г.Н., Быков В.Ю., Стэмповский В.Г., Шишкин А.М. Высокостабильный двухканальный радиометр водяного пара для измерений тропосферной задержки в реальном времени // Труды ИПА РАН. – 2013. – Вып. 27. – стр. 210–215.