

Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - «Муром 2019»

**Веб-портал банка данных СВЧ-радиометрического зондирования атмосферы в диапазоне резонансного поглощения водяного пара 18 – 27 ГГц**

Д.П. Егоров<sup>1</sup>, Б.Г. Кутуза<sup>1</sup>, М.Т. Смирнов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва*  
*[egorov.dp@ntcir.ru](mailto:egorov.dp@ntcir.ru), [kutuza@cplire.ru](mailto:kutuza@cplire.ru)*

<sup>2</sup>*Фрязинский филиал института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино*  
*[smirnov@sunclass.ire.rssi.ru](mailto:smirnov@sunclass.ire.rssi.ru)*

*Разработан веб-сервис банка данных СВЧ-радиометрического зондирования атмосферы. Банк данных содержит длительные сеансы непрерывных измерений яркостной температуры атмосферы вблизи резонансной линии поглощения водяного пара ( $22.235 \pm 4$  ГГц). Данные получены с помощью 47-канального СВЧ радиометра-спектрометра с наземного пункта наблюдений, расположенного в г.Фрязино Московской области. Веб-сервис представляет собой клиент-серверное приложение, позволяющее пользователю получать и загружать данные проведённых измерений, при необходимости производить их калибровку, вычислять значения структурных функций радиояркостной температуры. Реализованы алгоритмы определения значений интегральных параметров полной массы водяного пара и водозапаса облаков.*

*A web-portal that provides a wide range of tools for convenient interaction with microwave radiometric measurements data of atmospheric descending radiation in the band of resonant water vapor absorption ( $22.235 \pm 4$  GHz) has been developed. The measurements were carried out via special 47-channel spectral radiometer from a ground-based observation point located in Fryazino, Moscow Region. The portal represents a server application that allows to obtain RAW data of the measurements, perform primary digital data processing (including external calibration using specified parameters), obtain processed data in CSV files and compute necessary data metrics, for instance time-temporal structural functions values. Algorithms for determining total water vapor mass and integral liquid water content in clouds are implemented.*

**Введение**

Развитие сети наземных СВЧ-радиометрических наблюдений атмосферы является одной из важнейших задач современного дистанционного зондирования. Помимо самих пунктов наблюдения, необходимости увеличения их количества и оснащения новейшим оборудованием, большое внимание должно быть уделено разработке механизмов автоматического сбора и анализа получаемых данных. Необходимо обеспечить неограниченный доступ к данным и организовать удобную работу с ними. В рамках настоящей работы представлен один из возможных вариантов реализации этих механизмов на базе легко масштабируемого клиент-серверного приложения.

Метод СВЧ радиометрического зондирования атмосферы представлен в [1,5-13]. Он позволяет по яркостной температуре атмосферы, измеренной на нескольких частотах, определять значения полной массы водяного пара и водозапаса облаков, а также оценивать их пространственно-временные вариации. На территории филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, расположенного в г.Фрязино Московской области (ФирЭ РАН), был создан специальный пункт наземных СВЧ-радиометрических наблюдений атмосферы. Измерения радиоизлучения атмосферы производятся круглосуточно из окна лаборатории при помощи СВЧ

радиометра-спектрометра «P22M», разработанного в СКБ ИРЭ под руководством С.Ю. Турыгина [4,15]. Данный прибор позволяет измерять спектры радиотеплового излучения в диапазоне 18-27.2 ГГц с частотным разрешением 0.2 ГГц. Спектр излучения получается путем сканирования по частоте, типичное время получения полного спектра составляет ~11 сек. Длительность одного сеанса измерений может составлять от 3-х до 12-ти часов. Сеансы измерений представлены в виде файлов бинарных данных, своевременно загружаемых на дисковое пространство удалённого сервера, формируя таким образом банк данных СВЧ-радиометрического зондирования атмосферы. Банк данных также содержит результаты метеонаблюдений с двух расположенных на расстоянии порядка 300 метров от исходного пункта наблюдений метеостанций Vantage Pro 2. Указанные метеостанции с интервалом в 1 мин. измеряют температуру, относительную влажность воздуха, атмосферное давление, скорость и направление ветра, интенсивность и сумму осадков. Дополнительно, в течение наблюдений проводится фотофиксация текущих погодных условий при помощи 2.0 мегапиксельной видеокамеры HI3516C.

Для накопленного банка измерительных сеансов был создан веб-портал, организующий удобную среду взаимодействия пользователя рядового, предположительно, маломощного персонального компьютера со всем имеющимся объёмом непрерывных данных дистанционного зондирования. С использованием средств и библиотек языков Python и JavaScript (JS) было разработано клиент-серверное приложение, позволяющее пользователю получить как «сырые», так и обработанные данные проведённых измерений за любой выбранный интервал времени. Под «обработкой данных» здесь подразумевается последовательное выполнение одного или нескольких алгоритмов цифровой обработки с целью получения значений яркостных температур, полной массы водяного пара, водозапаса облаков. Некоторые алгоритмы рассмотрены ниже.

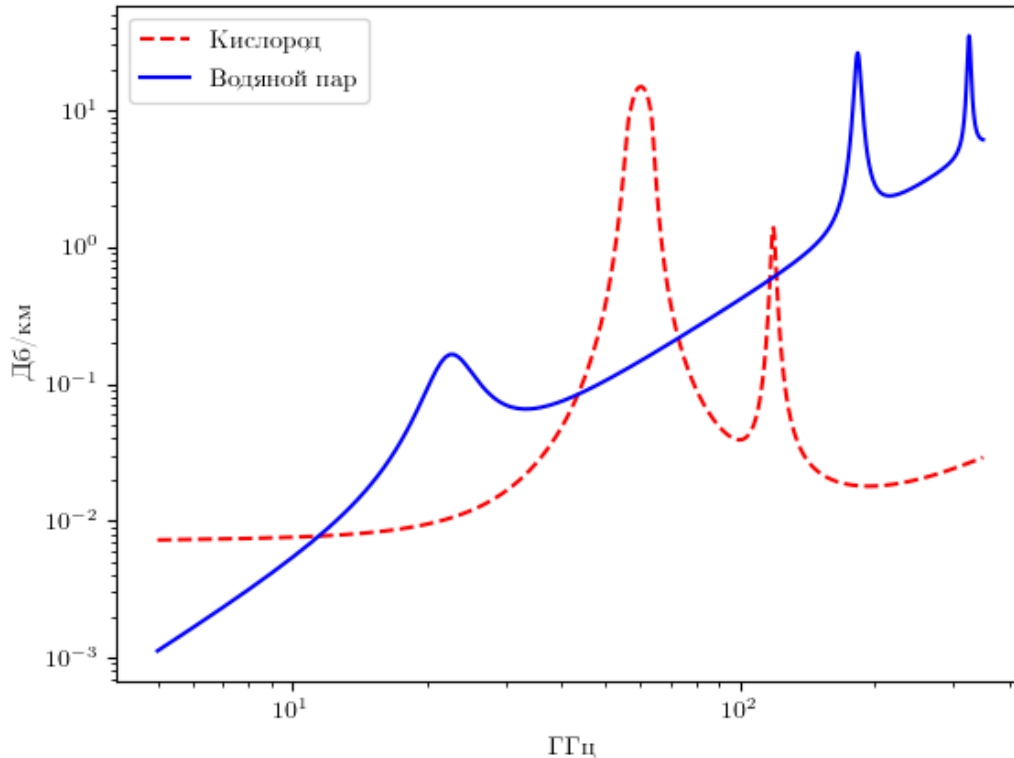
### **Алгоритм качественной калибровки СВЧ-радиометрических измерений**

Рассмотрим алгоритм внешней калибровки измерений по яркостным температурам абсолютно черного тела и безоблачной атмосферы как пример используемой на практике калибровки данных СВЧ-радиометрического зондирования.

Пусть заранее известны:  $T_1$  – яркостная температура абсолютно чёрного тела,  $T_2(t_0)$  – модельное значение яркостной температуры безоблачной атмосферы при известных в момент времени  $t_0$  метеорологических условиях (температура, давление, влажность),  $T_{изм}(t)$  и  $T_{изм}(t_0)$  – показания радиометра в моменты времени  $t$  и  $t_0$  соответственно. Тогда истинную радиояркостную температуру  $T_{br}(t)$  в момент времени  $t$  можно определить следующим образом:

$$T_{br}(t) = T_2(t_0) + \frac{T_1 - T_2(t_0)}{T_1 - T_{изм}(t_0)} (T_{изм}(t) - T_{изм}(t_0)). \quad (1)$$

Модельные значения яркостных температур  $T_2$  могут быть рассчитаны, например, в соответствии с моделью атмосферного поглощения Rec. ITU-R P.676-3 (МСЭ) [2], содержащей известные теоретико-эмпирические зависимости погонных коэффициентов поглощения в кислороде и водяном паре ( $\gamma_{O_2}$  и  $\gamma_p$  (дБ/км)) от частоты  $\nu$  (или длины волны  $\lambda$ ), температуры воздуха  $T$ , атмосферного давления  $P$  и абсолютной влажности  $\rho$ . Эти зависимости для условий стандартной атмосферы ( $T = 15^\circ\text{C}$ ,  $P = 768$  мм.рт.ст.,  $\rho = 7.5$  г/м<sup>3</sup>) отображены на рис. 1.



**Рис. 1. Зависимость погонного коэффициента поглощения от частоты (для стандартной атмосферы)**

Полное поглощение  $\tau$  (в зените) оценивается моделью [1, 2] как

$$\tau(\lambda, T_0, P_0, \rho_0) = \gamma_{O_2}(\lambda, T_0, P_0) \cdot H_1 + \gamma_{\rho}(\lambda, T_0, P_0, \rho_0) \cdot H_2, \quad (2)$$

где  $T_0, P_0, \rho_0$  – значения температуры, давления и влажности, измеренные у поверхности Земли;  $H_1$  и  $H_2$  – характеристические высоты, причем  $H_2 = 5.3$  (км), а  $H_2 = 1.8$  (2.1) (км) в обычных условиях (при дожде).

С учетом соображений  $\tau \lesssim 1$  (нп), можно считать, что [1]:

$$T_2 = T_{\text{avg}}(1 - \exp(-\tau \cdot \sec(\theta))), \quad (3)$$

где  $T_{\text{avg}} = T_0 - \Delta T$ ,  $\Delta T \approx 15^\circ\text{C}$  – поправка на неизотермичность,  $\theta$  – зенитный угол наблюдения.

#### **Методика определения полной массы водяного пара и водозапаса облаков**

Если известна яркостная температура  $T_{b\nu}$ , измеренная под определенным зенитным углом  $\theta$  на частоте  $\nu$ , то полное поглощение (в зените) можно выразить (из (3)) как

$$\tau(\nu) = \tau_{\nu, \theta}(T_{\text{avg}}, T_{b\nu}) = -\ln\left(\frac{T_{b\nu} - T_{\text{avg}}}{-T_{\text{avg}}}\right) \cdot \cos(\theta). \quad (4)$$

Отношение (4) позволяет рассмотреть описанные ниже методики определения полной массы водяного пара  $Q$  и водозапаса облаков  $W$  по измеренным радиояркостным температурам. Двухчастотный метод определения интегральных параметров  $Q$  и  $W$  заключается в численном решении следующей системы уравнений [2,5-12]

$$\begin{cases} \tau(\nu_1) = \tau_{O_2}(\nu_1) + k_\rho(\nu_1) \cdot Q + k_w(\nu_1, T_{обл}) \cdot W \\ \tau(\nu_2) = \tau_{O_2}(\nu_2) + k_\rho(\nu_2) \cdot Q + k_w(\nu_2, T_{обл}) \cdot W \end{cases} \quad (5)$$

Здесь

$$\tau_{O_2}(\nu) = \int_0^\infty \gamma_{O_2}(\nu, T(h), P(h)) dh \approx \gamma_{O_2}(\nu, T_0, P_0) \cdot H_1 \quad (6)$$

– поглощение в кислороде;

$$k_\rho(\nu) \approx \frac{\tau_\rho(\nu)}{Q_\rho}, \quad (7)$$

где

$$\tau_\rho(\nu) = \int_0^\infty \gamma_\rho(\nu, T(h), P(h), \rho(h)) dh \approx \gamma_\rho(\nu, T_0, P_0, \rho_0) \cdot H_2 \quad (8)$$

– поглощение в водяном паре,

$$Q_\rho = \int_0^\infty \rho(h) dh, \quad (9)$$

а

$$k_w(\lambda, T_{обл}) = k_w\left(\frac{c}{\nu}, T_{обл}\right) = \frac{0.6 \pi}{\lambda} \cdot \frac{3 (\varepsilon_S - \varepsilon_O) \frac{\lambda_S}{\lambda}}{(\varepsilon_S + 2)^2 + (\varepsilon_O + 2)^2 \frac{\lambda_S}{\lambda}}, \quad (10)$$

где  $T_{обл}$  – температура облака ( $-2^\circ\text{C}$  для модельных расчетов),

$$\begin{aligned} \varepsilon_O &= 5.5, \\ \varepsilon_S &= 88.2 - 0.40885 \cdot T_{обл} + 0.00081 \cdot T_{обл}^2, \\ \lambda_S &= 1.8735116 - 0.027296 \cdot T_{обл} + 0.000136 \cdot T_{обл}^2 + 1.662 \cdot \exp(-0.0634 \cdot T_{обл}). \end{aligned}$$

При использовании двухчастотного метода точность расчётов минимальна [3], если для выбранной пары частот  $(\nu_1, \nu_2)$  определитель системы (5) принимает близкие к нулю значения

$$\det(A_{\nu_1, \nu_2}) = \begin{vmatrix} k_\rho(\nu_1) & k_w(\nu_1, T_{обл}) \\ k_\rho(\nu_2) & k_w(\nu_2, T_{обл}) \end{vmatrix} \rightarrow 0. \quad (11)$$

Так, например, при  $T_{\text{обл}} = -2^{\circ}\text{C}$ :  $\det(A_{18,21}) \sim 10^{-3}$ ,  $\det(A_{18,22})$ ,  $\det(A_{21,27})$ ,  $\det(A_{21,27}) \sim 10^{-2}$ , а  $\det(A_{18,27}) \approx 6 \cdot 10^{-4}$  (частоты указаны в ГГц). Выбор пары частот 18 и 27 ГГц приводит к неудовлетворительным результатам (разброс по  $Q$  – до  $8.3 \text{ г/см}^2$ , по  $W$  – до  $5.3 \text{ кг/м}^2$  в условиях развитой облачности), тогда как для остальных указанных в индексах пар частот сильного разброса значений  $Q$  и  $W$  не наблюдается.

Многочастотный ( $N$  каналов) метод определения интегральных параметров заключается в решении задачи минимизации следующего функционала

$$J = \sum_{k=1}^N (\tau(v_k) - \tau_{O_2}(v_k) - k_{\rho}(v_k)Q - k_w(v_k, T_{\text{обл.}})W) \rightarrow \min_{Q, W} \quad (12)$$

Данный метод предполагает последовательный перебор (с неким заданным шагом) значений  $Q$  и  $W$ , поэтому без дополнительных ограничений на их возможный интервал значений выполнение алгоритма минимизации становится неудовлетворительно затратным по времени и вычислительной мощности. Такие ограничения на значения интегральных параметров могут быть введены на основании дополнительного анализа изменчивости принимаемого радиоизлучения, например, путём подсчёта значений структурных функций яркостной температуры [8].

### Реализация

Рассмотрим компоненты разработанного веб-приложения. Решение обладает трёхзвенной клиент-серверной архитектурой (рис. 2). Сервер приложений (звено 2) получает сжатые бинарные данные измерений по протоколу FTP от удалённого сервера, размещённого в ФИРЭ РАН (звено 3). Данные измерений постоянно пополняются. Окружение развёртывания второго звена включает в себя операционную систему Linux CentOS 6, веб-сервер Apache HTTP Server версии 2.2, СУБД MySQL 5.6.33, PHP 5.1-7.2, Perl 5.10, Python 2.6-3.7 и панель управления ISPManager.



Рис. 2. Клиент-серверная архитектура проекта

Веб-приложение разработано на базе фреймворка Django (рис. 3) версии 2.1 для Python 3.7. Фреймворк Django использует технологию объектно-реляционного отображения ORM (Object-Relational Mapping) для управления локальной базой данных. Это обеспечивает работу с данными в терминах классов, а не таблиц данных и, напротив, преобразует термины и данные классов в данные, пригодные для хранения в СУБД [14]. Вводятся т.н. django-модели, представляющие собой классы-описания сущностей БД. В качестве одной из таких моделей нами используется класс-описание файла бинарных данных радиометрических измерений. Описание содержит: путь до файла от корневой директории на удалённом сервере, название файла, фактическое время (datetime) начала и завершения измерительного сеанса, настройки калибровки, информацию о средних значениях метеорологических параметров либо полный путь к файлу с непрерывными данными о значениях метеорологических параметров на период наблюдения. Обновление локальной базы данных производится сторонней утилитой по ssh в течение времени, отведённого на серверную диагностику. Некоторые настройки

калибровки для отдельных измерительных сеансов записываются в локальную БД сервера приложений автоматически по мере пользования порталом.

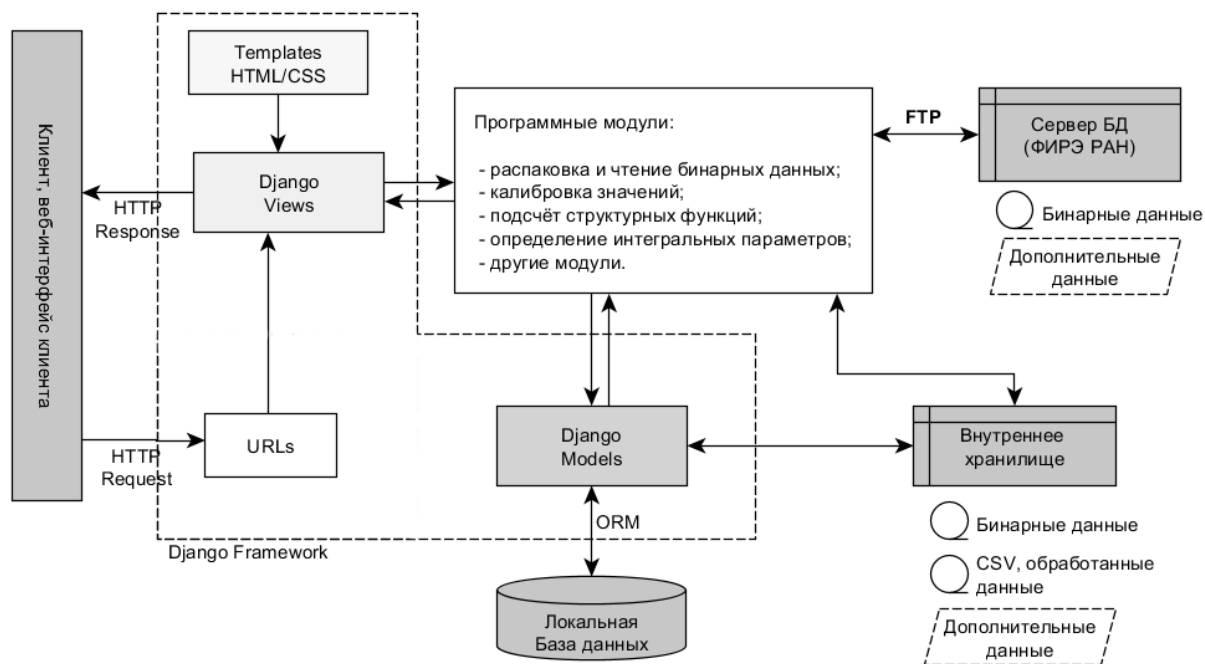


Рис. 3. Структура приложения

Логика взаимодействия пользователя с порталом определяется тем, какой объект пользователь желает получить на выходе:

- «сырые» данные проведённых измерений;
- данные яркостных температур, полученные с помощью алгоритма первичной автоматической калибровки (калибровка производится только по яркостной температуре абсолютно чёрного тела);
- данные яркостных температур, полученные с помощью алгоритма настраиваемой внешней калибровки значений по яркостным температурам абсолютно черного тела и безоблачной атмосферы;
- значения интегральных параметров полной массы водяного пара  $Q$  и водозапаса облаков  $W$ ;
- значения структурной функции яркостной температуры (в качестве меры интенсивности флуктуаций радиоизлучения атмосферы).

После выбора интересующего временного интервала, серверное приложение определяет соответствующие запросу пользователя имена файлов измерений (поиск по локальной базе данных), далее обращается к удалённому серверу данных по FTP, подгружая необходимые файлы в своё локальное хранилище. Приложение производит распаковку файлов, чтение бинарных данных. Данные записываются во временный CSV файл, с которым впоследствии и ведётся работа. С целью экономии дискового пространства на сервере запущен фоновый daemon-процесс, удаляющий все временные файлы, использовавшиеся более четырёх часов назад.

Некоторые из производимых сервером операций при обработке данных являются потенциально затратными по времени, что может привести к длительному ожиданию загрузки веб-страницы на клиенте. Если выполнение операции не может быть перенесено со стороны сервера на сторону клиента, указанную проблему, возможно

частично разрешить внедрением т.н. потоков выполнения (тредов). Технология тредов была задействована при разработке веб-портала.

Веб-интерфейс клиента и логика представления реализуются связкой HTML5+CSS3+JS. Все данные, по возможности, визуализируются. В частности, для конструирования графиков временного хода различных величин используется библиотека plotly.js. Приведём пример визуализации предоставляемых пользователю данных. Рассмотрим измерительный сеанс от 01 августа 2017 г. (начало сеанса: 05:10 UTC+3; завершение сеанса: 07:50 UTC+3; зенитный угол наблюдения: 51°). Средние за время наблюдения значения метеорологических параметров: температура воздуха  $T = 17.3^{\circ}\text{C}$ , атмосферное давление  $P = 748$  мм.рт.ст., абсолютная влажность  $\rho = 13.4$  г/м<sup>3</sup>,  $T_{\text{обл}}$  принята за  $-2^{\circ}\text{C}$ . Безоблачная погода сменяется развитой облачностью. Временной ход радиоярких температур изображен на рис. 4. Проведена калибровка значений. Применена рассмотренная ранее методика внешней калибровки.  $T_{\text{br}}^1$  – ярк. температура на частоте 18 ГГц,  $T_{\text{br}}^2$  – 21 ГГц,  $T_{\text{br}}^3$  – 22 ГГц,  $T_{\text{br}}^4$  – 27 ГГц.



Рис. 4. Временной ход ярких температур

Для  $T_{\text{br}}^1, \dots, T_{\text{br}}^4$  построим график квадратного корня из их структурных функций ( $S_1, \dots, S_4$ ) в диапазоне временных интервалов от 3 до 350 секунд (рис. 5).

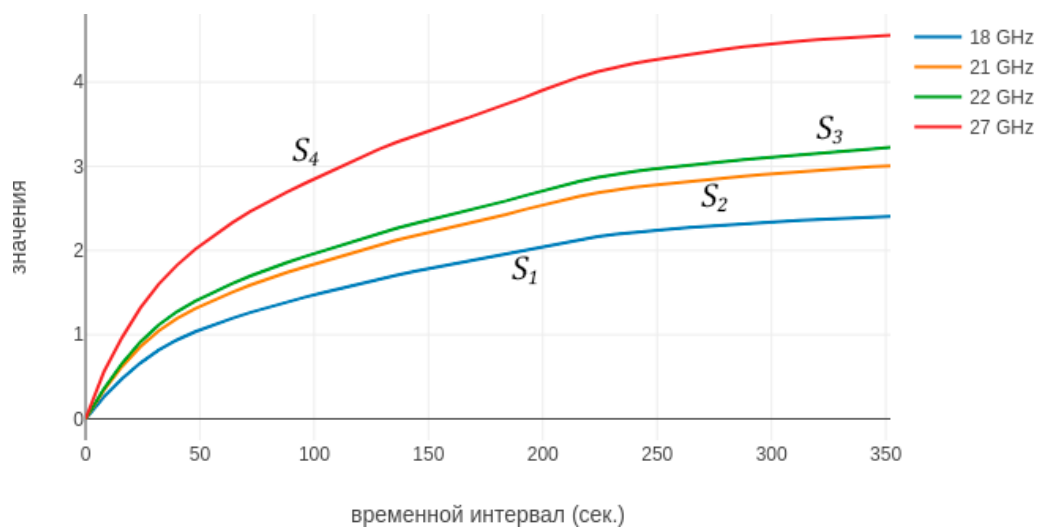
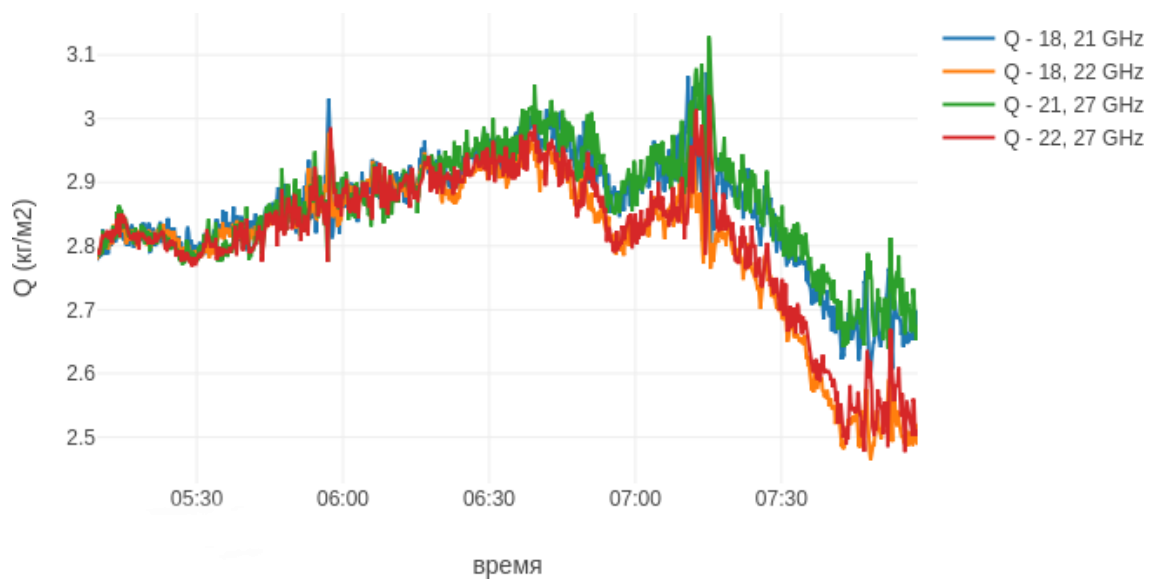


Рис. 5. Структурные функции ярких температур (квадратный корень)

Выполним расчёт значений интегральных параметров  $Q$  и  $W$  с помощью двухчастотного метода. Выберем следующие пары частот: 18 и 21, 18 и 22, 21 и 27, 22 и 27 ГГц. Результаты приведены на рис. 6 и 7 ниже.



**Рис. 6. Полная масса водяного пара  $Q$**



**Рис. 7. Водозапас облаков  $W$**

### **Заключение**

Архитектура разработанного клиент-серверного приложения (веб-ресурс: <https://atmostry.ru/>) легко масштабируема. Возможно неограниченное увеличение числа удалённых серверов, располагающих данными радиометрических измерений атмосферы. Таким образом, предложенное решение может быть расширено до полноценной глобальной сети автоматического сбора и анализа данных нисходящего радиоизлучения атмосферы в СВЧ диапазоне.

В настоящий момент разработанные программные инструменты активно задействуются при обработке данных многочисленных сеансов измерений, предоставляемых ФИРЭ РАН. Анализируются спектры радиоизлучения атмосферы в



диапазоне 18–27 ГГц, частотные зависимости значений структурной функции при различных метеорологических условиях, изменчивость интегральных параметров полной массы водяного пара и водозапаса облаков. Получаемые метрики сравниваются с результатами теоретических расчётов.

*Работа выполнена в рамках гос/задания.*

### **Литература**

1. Кутуза Б.Г., Данилычев М.В., Яковлев О.И.. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. // М.: ЛЕНАНД, 2016 г.
2. Rec. ITU-R P.676-3. Attenuation by atmospheric gases. // The ITU Radiocommunication, 1997 г.
3. Казарян Р.А., Кутуза Б.Г.. О точности определения полной массы водяного пара и водозапаса облаков при двухчастотном измерении микроволнового излучения атмосферы. // ИРЭ РАН, 2014 г.
4. Данилычев М.В., Казарян Р.А., Калинин А.А., Кутуза Б.Г., Турыгин С.Ю. Наземный СВЧ радиометр для исследования атмосферы и обеспечения подспутниковых экспериментов. // Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации: Материалы 9-ой Международной научно-технической конференции /НТОРЭС им. А.С. Попова, Суздаль, Россия, 2016 г., с.203-207.
5. Basharinov A.E. and B.G.Kutuza, Investigation of radiation and absorption of cloudy atmosphere in the microwave range, *Bull. Americ. Meteorol. Soc.*, v. 40, № 5, part 2, pp. 597-598, 1968.
6. Башаринов А.Е., С.Т.Егоров, М.А.Колосов и Б.Г.Кутуза, Особенности метода СВЧ радиометрического зондирования атмосферы с летательного аппарата, *Тр. Главн. геоф. обсерв.*, вып. 222, стр. 153-158.
7. Башаринов А.Е., Кутуза Б.Г. Исследования радиоизлучения и поглощения облачной атмосферы в миллиметровом и сантиметровом диапазонах. // Тр. Главн. геоф. обсерв., вып. 222, стр. 100-110, Л., 1968 г.
8. Башаринов А.Е. и Б.Г.Кутуза, Определение температурной зависимости времени релаксации молекул воды в облаках и возможности оценки эффективной температуры капельных облаков по СВЧ радиометрическим измерениям, *Изв. ВУЗов, Радиофизика*, т.17, № 1, стр. 52-57, 1974.
9. Kutuza B.G. Spatial and temporal fluctuations of the atmospheric microwave emission, *Radio Science*, vol. 38, № 3, pp. 12-1 – 12-7, 2003.
10. Аквилонова А.Б., Кутуза Б.Г. Радиотепловое излучение облаков. // Радиотехника и электроника, т. 23, № 9, 1978.
11. Кутуза Б.Г., Поглощение миллиметровых и сантиметровых волн в облачных образованиях и его зависимость от температуры, в *Электромагнитные волны в атмосфере и космическом пространстве*, стр. 180-192, М., Наука, 1986.
12. Kutuza B.G., Spectral and Temperature Dependencies of the Millimeter and Centimeter Wave Absorption in Clouds, in *Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment*, edited by D.Solimini, pp. 175-184, VSP, Utrecht, Netherlands, 1995.
13. Кутуза Б.Г. Особенности флуктуаций микроволнового излучения атмосферы. *Успехи современной радиоэлектроники*, № 1, стр. 36-43, 2003.
14. Ноубл, Дж., Андерсон, Т., Брэйтуэйт, Г., Казарио, М., Треттола, Р. Flex 4. Рецепты программирования. — БХВ-Петербург, 2011. — С. 548. — 720 с.
15. Егоров Д.П., Кутуза Б.Г. Измерение временных флуктуаций яркостной температуры в резонансной области поглощения водяного пара 18-27 ГГц. // VIII Всероссийские

Армандовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы II Всероссийской научной конференции. Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2018. С. 239-245. ISSN 2304-0297