

УДК 551.501.8

DOI: 10.24412/2304-0297-2022-1-313-322

**Оценка возможности использования данных наземных одноканальных сканирующих температурных профилемеров для определения параметров влажности атмосферного пограничного слоя**

А.К. Князев, Е.Н. Кадыгров, В.А. Юшков

ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория», 141700, Московская область, г.Долгопрудный, ул. Первомайская 3, e-mail: [ldz@cao-rhms.ru](mailto:ldz@cao-rhms.ru)

*Представлен анализ возможности использования данных микроволнового одноканального сканирующего температурного профилемера для оценки параметров влажности в атмосферном пограничном слое (АПС).*

*Ключевые слова: микроволновый одноканальный сканирующий профилемер, параметры влажности, атмосферный пограничный слой.*

**Evaluation of possibility determinations of density parameters in atmospheric boundary layer on the basis of an angular-scanning single-channel microwave radiometer data**

A.K.Kniazev, E.N.Kadygrov, V.A.Ushkov

*Possibility of ABL density parameters determination with the using of scanning microwave temperature profiler data are presented.*

*Key words :ABL density parameters, an-angular scanning single channel microwave radiometer.*

**Введение**

В последние десятилетия для измерения структурных параметров атмосферы (профилей температуры, ветра, влажности) наряду с традиционным контактным методом измерений радиозондированием все более широко используются дистанционные методы измерений. Основным преимуществом дистанционных методов по сравнению с традиционными радиозондами является возможность непрерывных измерений и практическое отсутствие расходных эксплуатационных материалов (радиозонд- прибор одноразового действия) [1]. В данном докладе рассматривается один тип наземных дистанционных приборов ,а именно микроволновые температурные профилемеры для измерения профилей температуры атмосферного пограничного слоя (АПС) [2]. Принцип их действия основан на приеме собственного теплового излучения атмосферы на одной частоте в районе максимума поглощения молекулярного кислорода 60 ГГц со сканированием угла приема излучения от горизонта до зенита [3]. Примером таких приборов может служить микроволновый температурный профилемер МТР-5, обеспечивающий в любых погодных условиях практически непрерывное измерение профилей температуры атмосферы в диапазоне высот от поверхности Земли до 1 км. Данный прибор достаточно широко используется как в нашей стране, так и за рубежом. Профилемер сертифицирован Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии и рекомендован Росгидрометом для использования на наблюдательной сети [4]. Однако для прогноза опасных метеорологических явлений (например, тумана, обледенения) необходима еще информация о профиле значений точки росы в АПС, такая информация есть в стандартном наборе данных радиозонда. В данной работе рассматривается возможность получения такой информации на основе данных МТР-5 и данных значений от приземной метеостанции.

## 1. Используемые данные и предположения

1.1 При оценке возможности использования данных одноканального сканирующего температурного профилера МТР-5 для определения параметров влажности пограничного слоя атмосферы использовались следующие эмпирические данные:

1) Электронная база данных температуры атмосферного пограничного слоя в диапазоне высот от 0 до 1000 метров за январь - июнь 2019 года, полученных в г. Долгопрудном Московской области [5]. Данные получены с помощью многоканального радиометрического комплекса ЦАО «Микрорадам» с погрешностью от 0,5 до 0,6°C, с шагом по высоте 50 метров и временным интервалом 5 минут, в состав которого входит прибор МТП-5.

2) Данные радиозондирования аэрологической станции Долгопрудный о высотных профилях температуры и влажности. Пуски зондов осуществляются два раза в сутки, - в полдень и в полночь по всемирному времени.

3) Относительная влажность воздуха на нулевом высотном уровне, во время запусков радиозондов определялась с помощью финской метеостанции VAISALA WXT520.

Предполагается, что влажный воздух представляет собой гомогенную смесь сухого воздуха и водяного пара, в пропорциональном отношении состав воздуха в диапазоне высот от 0 до 1000 метров остаётся постоянным, атмосферное давление подчиняется барометрической формуле Лапласа. Принимается гипотеза равновесия атмосферы, согласно которой воздух неподвижен, т.е. сила тяжести рассматриваемого объема воздуха уравнивается разностью давлений на ее нижнее и верхнее основания.

В рамках сделанных предположений, оценим возможность определения профилей таких метеорологических величин, как относительная и абсолютная влажность, точка росы и дефицит точки росы. С практической точки зрения информация об этих параметрах атмосферы может представлять интерес для синоптиков, занимающихся прогнозированием образования туманов и обледенения, что становится важным по мере развития малой авиации.

### 1.2 Относительная влажность

На основании высотного профиля температуры, измеренного прибором МТР-5, сначала определим парциальное давление водяных паров в воздухе на текущей высоте  $h$  по формуле (1) [6]:

$$e_B(h) = e_{B0} e^{r_h(h-h_0)} = r_0 E(t_0) e^{r_h(h-h_0)}, \quad h_0, h \in H_T, r_0 \in R_T, t_0 \in T_r, \quad (1)$$

где,  $r_0$  - относительная влажность воздуха на нулевом уровне, определяется с помощью метеостанции VAISALA WXT520;  $e$  - основание натурального логарифма;

$r_h = -0.000461 \text{ м}^{-1}$  - высотная постоянная влажного воздуха;  $h$  - текущая высота;  $h_0$  - начальная высота;  $e_B(h)$  - парциальное давление водяных паров в воздухе на высоте  $h$ .

$E(t_0)$  - парциальное давление на нулевом уровне. Определяется при помощи формулы Бака [7]:

$$E(t_0) = 6.1121 \exp\left(\frac{\left(18.678 - \frac{T}{234.5}\right)T}{257.14 + T}\right), \quad (2)$$

Для отрицательных температур при отсутствии жидкой фазы используется другая формула Бака:

$$E(t_0) = 6.1115 \exp\left(\frac{\left(23.036 - \frac{T}{333.7}\right)T}{279.82 + T}\right), \quad (3)$$

где:  $T$  - температура воздуха [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Всемирная метеорологическая организация для этого рекомендует следующую формулу:

$$\ln E = -6094,4692T^{-1} + 21,1249952 - 0,027245552T + 0,000016853396T^2 + (4) + 2,4575506\ln T,$$

где  $T$  - температура воздуха [ $^{\circ}\text{K}$ ].

Эта формула справедлива для температур от 0 до  $100^{\circ}\text{C}$  и для отрицательных температур для переохлажденной воды (до  $-50^{\circ}\text{C}$ ).

Относительную влажность определяем по формуле [6]:

$$r = 100e_v(t) / E(t), \quad (5)$$

где,  $t$  - текущая температура воздуха, в градусах Цельсия;  $e_v$  - парциальное давление водяных паров в воздухе при температуре  $t$ , Па;  $E$  - парциальное давление насыщенных водяных паров в воздухе при температуре  $t$ , Па;  $r$  - относительная влажность в процентах.

На каждом шаге по высоте можно брать в качестве начальных условий температуру и влажность на начальной высоте  $h_0$ , а можно значения с предыдущего по высоте шага.

Относительная влажность зависит от высоты и от времени. Ниже представлено поле распределения относительной влажности по высоте и по времени. Цвет каждой точки в поле определяется цветом интервала, в котором содержится значение относительной влажности. Справа от поля представлена зависимость относительной влажности от высоты в определенный момент времени. Внизу (рис.1) представлена зависимость относительной влажности от времени суток при фиксированной высоте или сразу на всех высотах на одном графике.

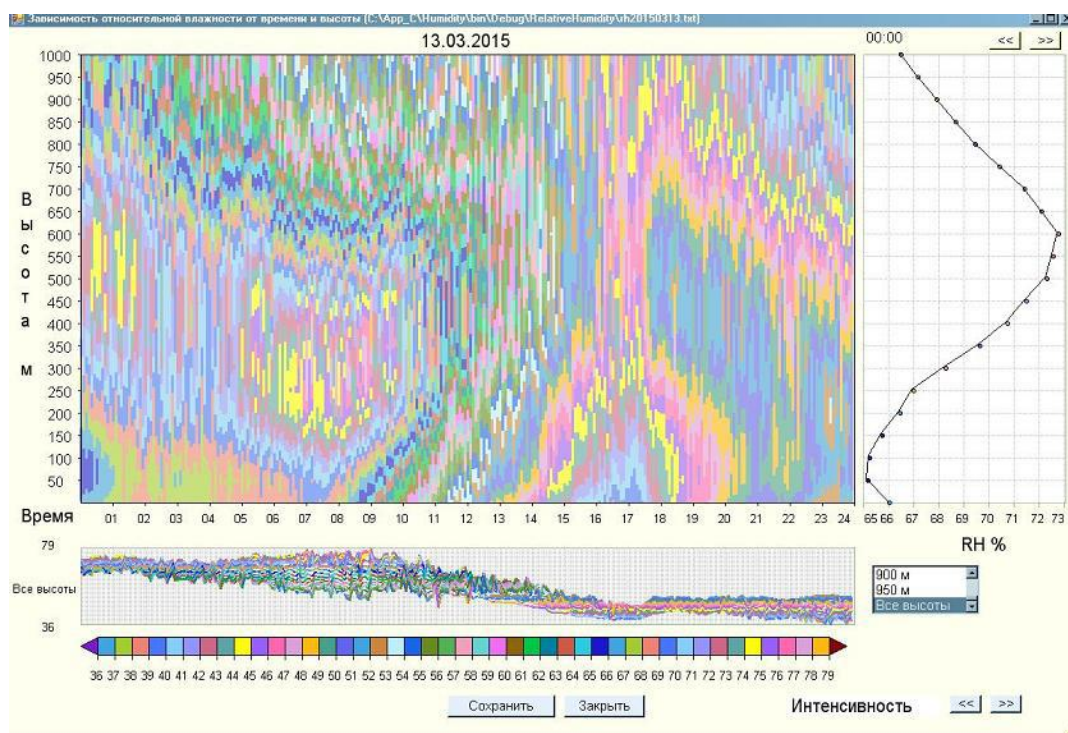


Рис.1. Зависимость относительной влажности от высоты и времени.

### 1.3. Абсолютная влажность

По известной относительной влажности подсчитаем абсолютную влажность по формуле [8]:

$$\text{Absolute Humidity (grams /m}^3) = \frac{6.112 \times \text{rh} \times 2.1674 \times e^{17.67T/(T+243.5)}}{273.15+T}, \quad (6)$$

где T - температура в градусах Цельсия; e - основание натурального логарифма; rh - относительная влажность.

### 1.4. Точка росы

По известной относительной влажности подсчитаем точку росы, воспользовавшись формулой для приблизительного расчёта точки росы  $T_p$  (°C) в зависимости от температуры воздуха T (°C) и его относительной влажности Rh (%) [9-11]:

$$T_p = \frac{b \times f(T,Rh)}{a - f(T,Rh)}, \quad f(T,Rh) = \frac{a \times T}{b+T} + \ln\left(\frac{Rh}{100}\right), \quad (7)$$

где T – температура; Rh - относительная влажность; a = 17,62 и b = 243,12 - константы; ln - натуральный логарифм;  $T_p$  - точка росы.

Формула обладает погрешностью  $\pm 0.4$  °C в диапазоне температуры воздуха T от 0°C до 60°C, температуры точки росы  $T_p$  от 0°C до 50°C, относительной влажности Rh от 1% до 100%.

Константы 243,12 и 17,62 можно заменить константами 237,7 и 17,27, разница в результатах незначительная. Точка росы зависит от высоты и от времени. Ниже представлено поле распределения точки росы по высоте и по времени. Цвет каждой точки в поле определяется цветом интервала, в котором содержится значение точки росы. Справа от поля представлена зависимость точки росы от высоты в определенный момент времени. Внизу представлена зависимость точки росы от времени суток при фиксированной высоте или сразу на всех высотах на одном графике (рис.2):

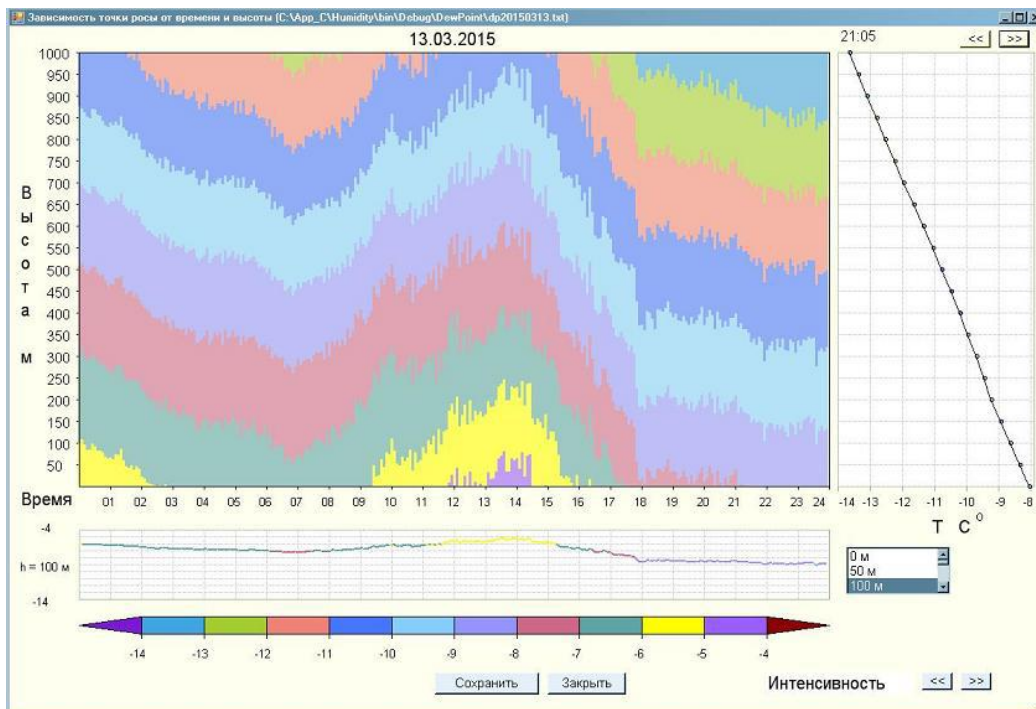


Рис.2. Зависимость точки росы от высоты и времени.

## 2. Результаты сравнения с данными радиозонда аэрологической станции «Долгопрудный»

По вышеприведенным формулам были осуществлены расчеты, в которых использовался температурный профиль, полученный при помощи прибора МТР-5. Профили относительной влажности, точки росы, дефицита точки росы сравнивались с профилями этих же данных, полученных с зонда в это же самое время в этой же самой точке. Радиозондонд запускается с территории Центральной аэрологической обсерватории (Московская область, г. Долгопрудный). Результаты сравнения приведены на рисунках ниже.

На рис. 3 и рис. 4 представлены профили оценки относительной влажности, окрашенные в разные цвета. Профиль красного цвета - начальная точка берется с прибора Микрорадком, парциальное давление вычисляется по формуле Бака. Профиль светло-красного цвета - начальная точка берется с прибора Микрорадком, парциальное давление вычисляется по формуле WMO. Профиль розового цвета - начальная точка берется из показаний радиозонда, парциальное давление вычисляется по формуле Бака. Профиль синего цвета - показания влажности по данным радиозонда. Профиль бирюзового цвета - показания температуры берутся из показаний радиозонда и пересчитываются по разработанному алгоритму.

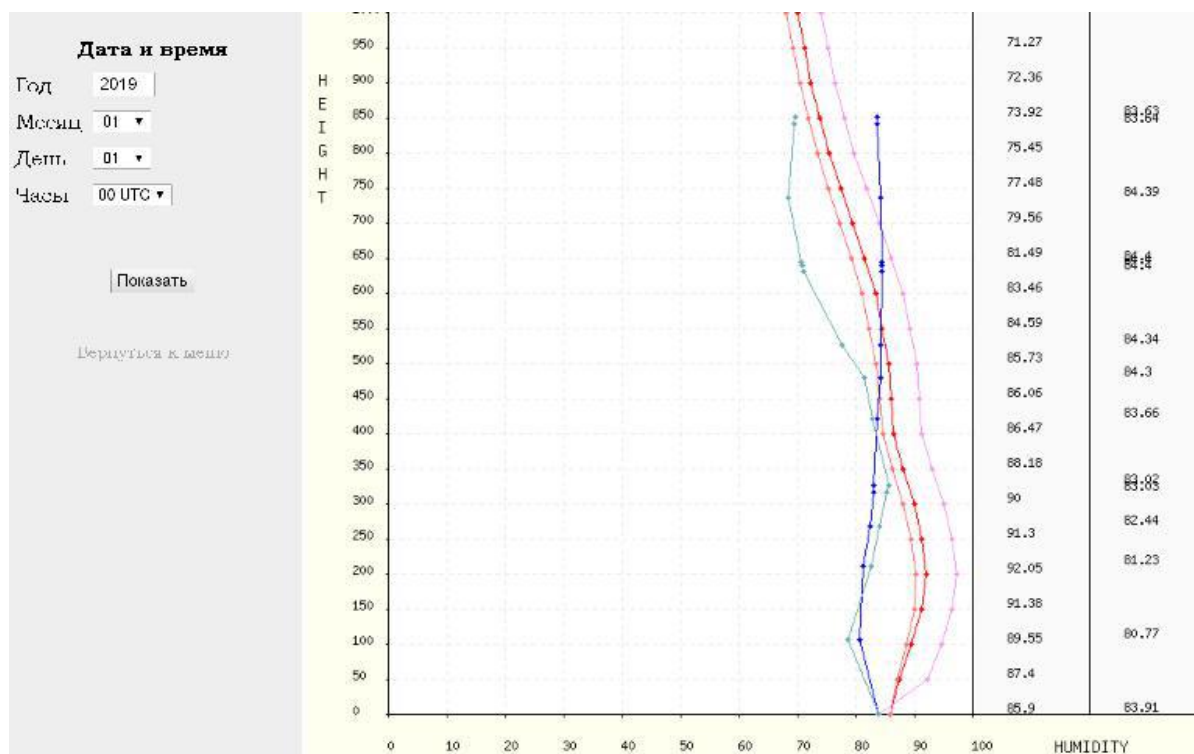


Рис.3. Профиль относительной влажности на 01.01.2019 в 0 часов UTC (2.30 MSK).

На рис.5 представлены профили оценки относительной влажности, окрашенные в разные цвета. Профиль красного цвета - начальная точка берется с прибора Микрорадком, парциальное давление вычисляется по формуле Бака. Профиль светло-красного цвета - начальная точка берется с прибора Микрорадком, парциальное давление вычисляется по формуле WMO. Профиль розового цвета - начальная точка берется из показаний радиозонда, парциальное давление вычисляется по формуле Бака. Профиль синего цвета - показания влажности по данным радиозонда. Профиль бирюзового цвета - показания температуры берутся из показаний радиозонда и пересчитываются по разработанному алгоритму.

бирюзового цвета - показания температуры берутся из показаний радиозонда и пересчитываются по разработанному алгоритму.

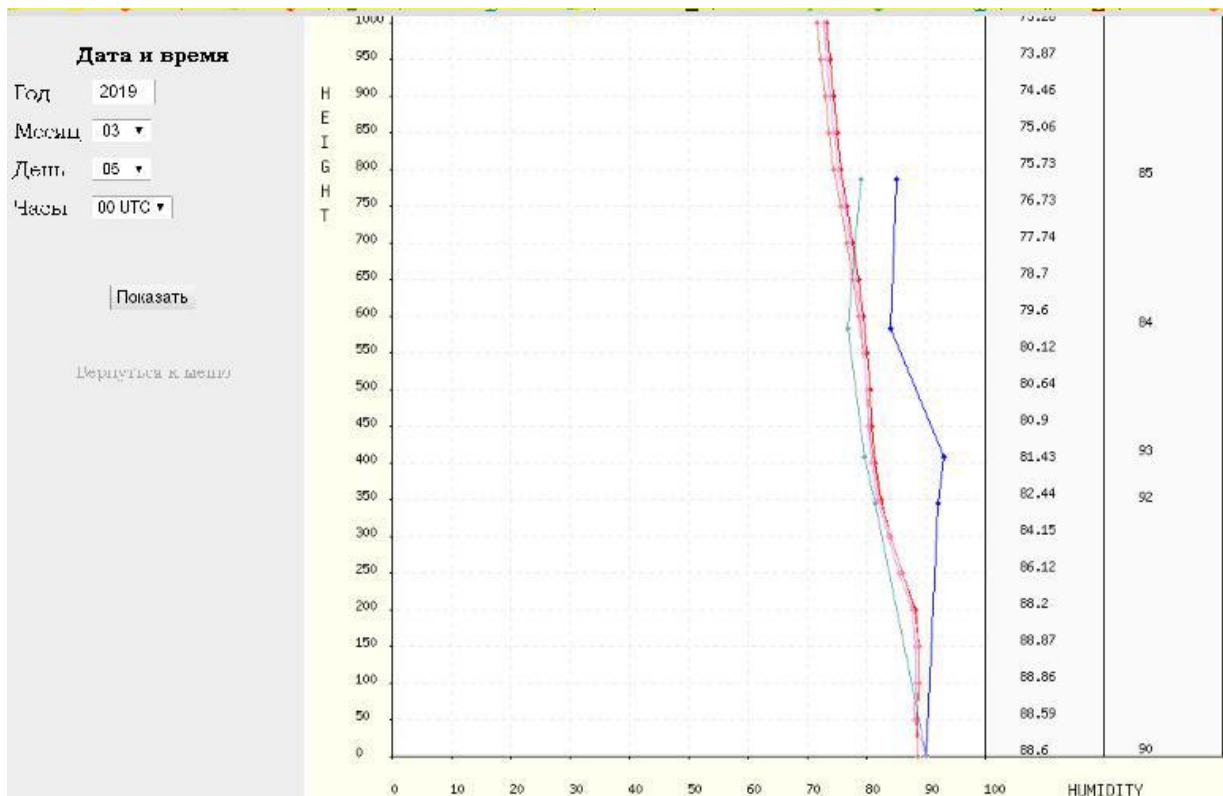


Рис.4. Профиль относительной влажности на 05.03.2019 в 0 часов UTC (2.30 MSK).  
 Дата и время представлены слева.

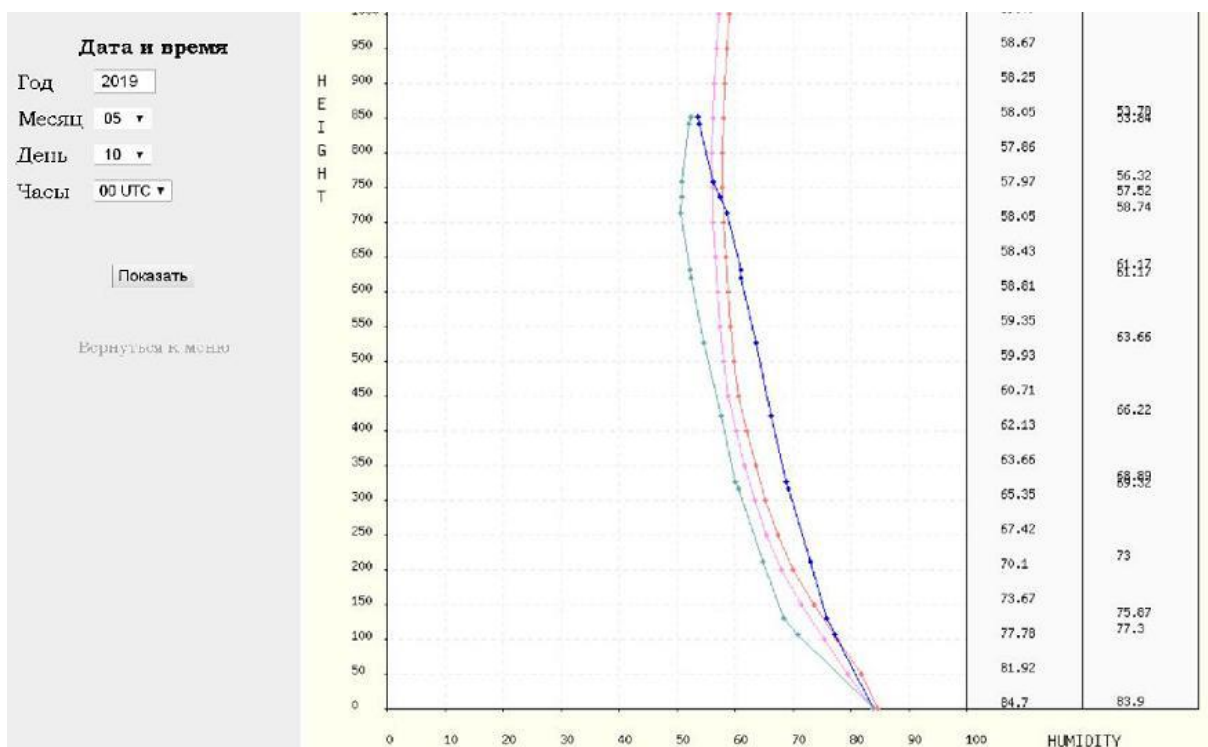
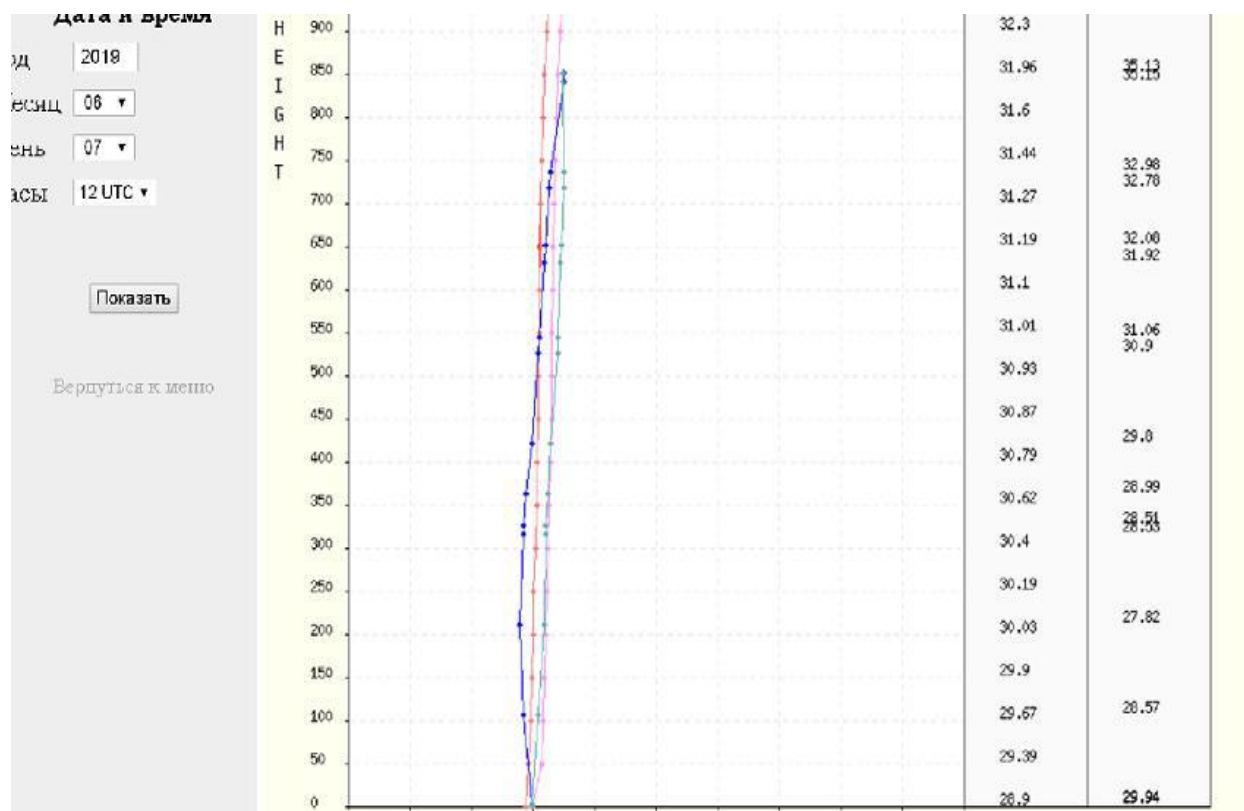


Рис.5. Профиль относительной влажности на 10.05.2019 в 0 часов UTC (2.30 MSK).  
 Дата и время представлены слева.

На рис.6 представлены профили оценки относительной влажности, окрашенные в разные цвета. Профиль красного цвета - начальная точка берется с прибора Микрорадком, парциальное давление вычисляется по формуле Бака. Профиль светло-красного цвета - начальная точка берется с прибора Микрорадком, парциальное давление вычисляется по формуле WMO. Профиль розового цвета - начальная точка берется из показаний радиозонда, парциальное давление вычисляется по формуле Бака. Профиль синего цвета - показания влажности по данным радиозонда. Профиль бирюзового цвета - показания температуры берутся из показаний радиозонда и пересчитываются по разработанному алгоритму.



**Рис.6. Профиль относительной влажности на 07.06.2019 в 12 часов UTC (2.30 MSK).Дата и время представлены слева.**

На рис.9 представлены профили точки росы, окрашенные в разные цвета. Профиль красного цвета - точка росы, определенная по температуре с прибора МТР-5.Профиль розового цвета - температура, определенная прибором МТР-5.Профиль синего цвета - точка росы, по данным радиозонда ЦАО. Профиль бирюзового цвета - температура, по данным радиозонда ЦАО.

Дефицит точки росы- это разность между температурой и точкой росы.

На рис. 9 и рис. 10 представлены профили дефицита точки росы, окрашенные в разные цвета. Профиль красного цвета - дефицит точки росы, определенный по температуре с прибора МТР-5.

Профиль розового цвета - температура, определенная прибором МТР-5.Профиль синего цвета - дефицит точки росы, определенный по данным радиозонда о температуре. Профиль бирюзового цвета - температура, по данным радиозонда.

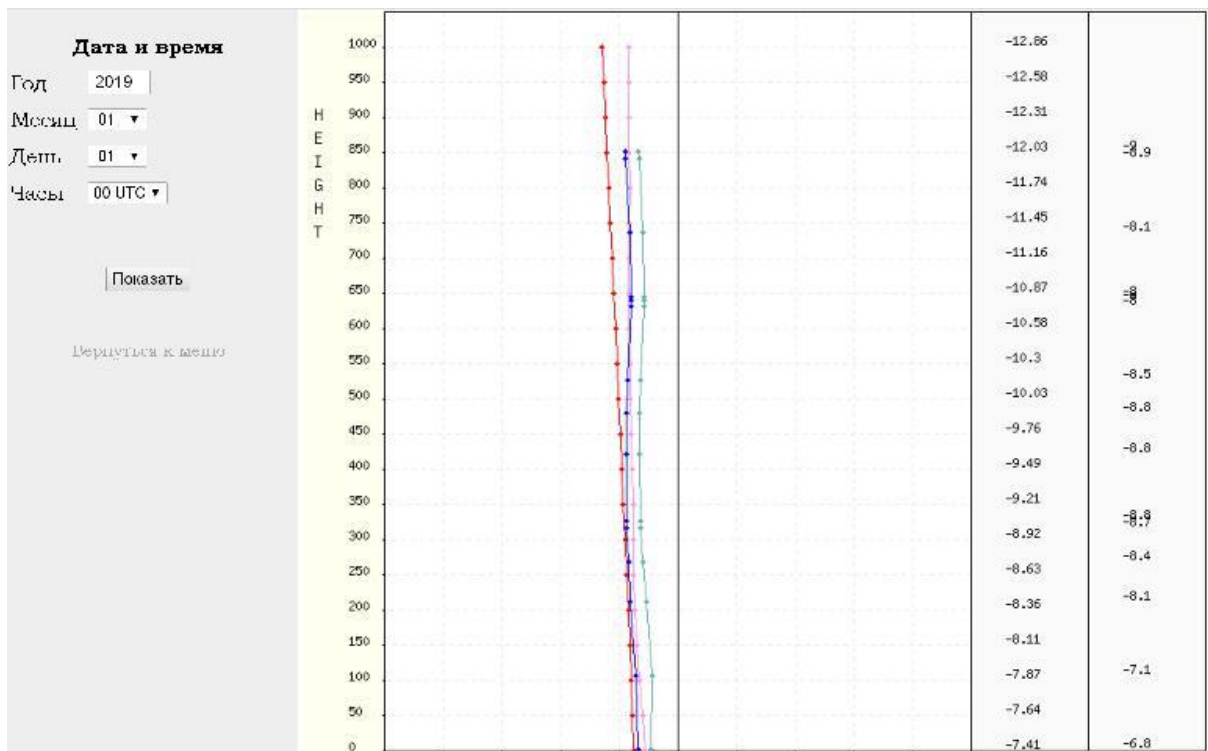


Рис.7. Профиль точки росы на 01.01.2019 в 0 часов UTC (2.30 MSK).

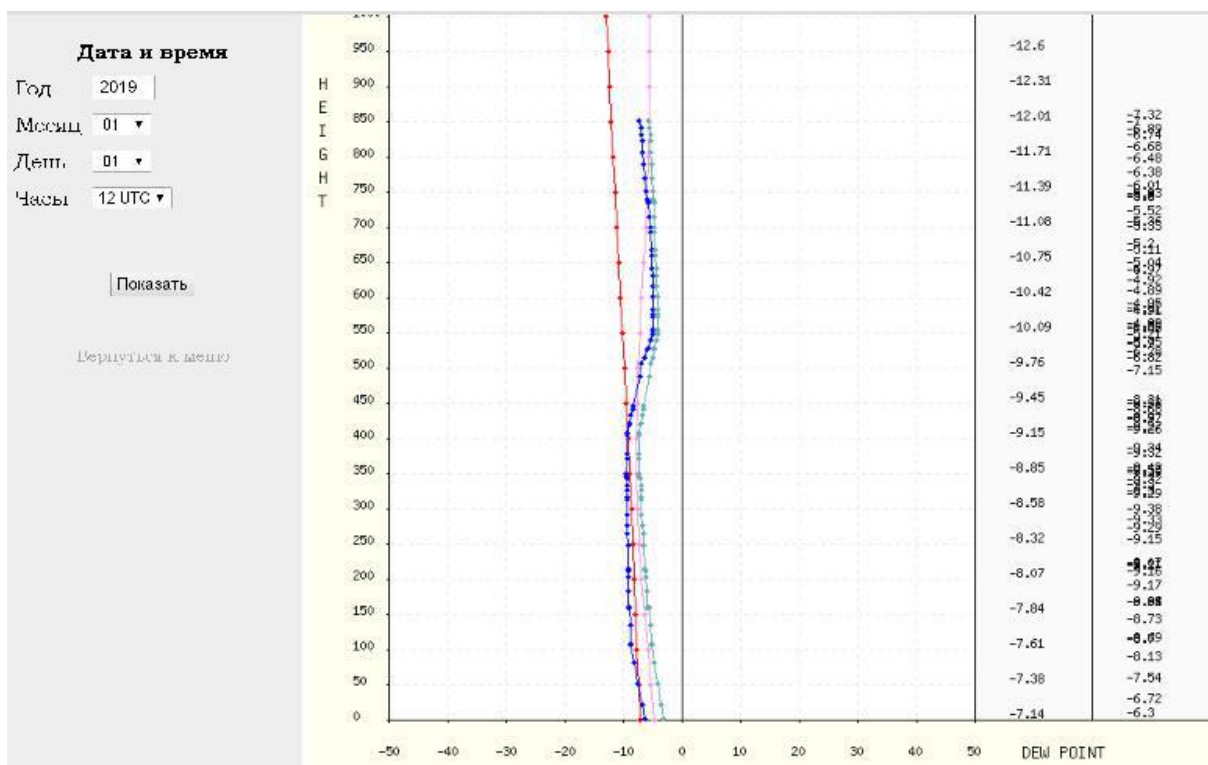


Рис.8. Профиль точки росы на 01.01.2019 в 12 часов UTC (2.30 MSK).  
 Дата и время представлены слева.



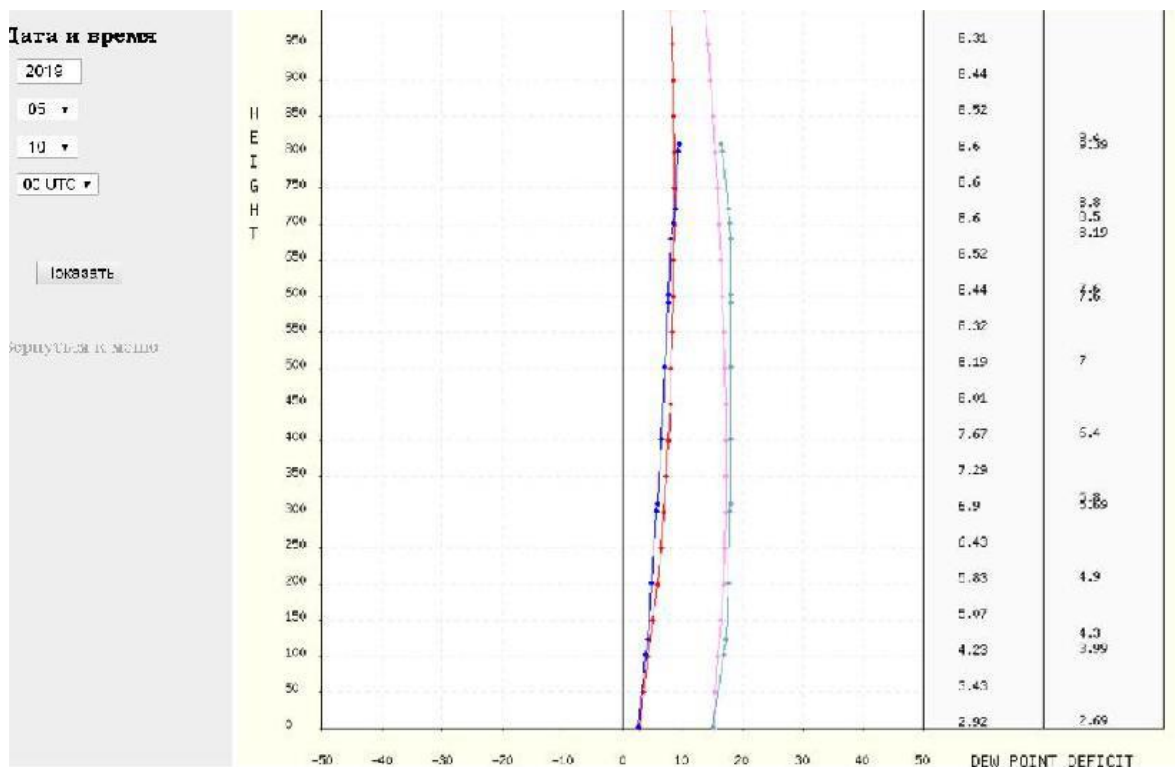


Рис.9. Профиль дефицита точки росы на 10.05.2019 в 0 часов UTC (2.30 MSK).

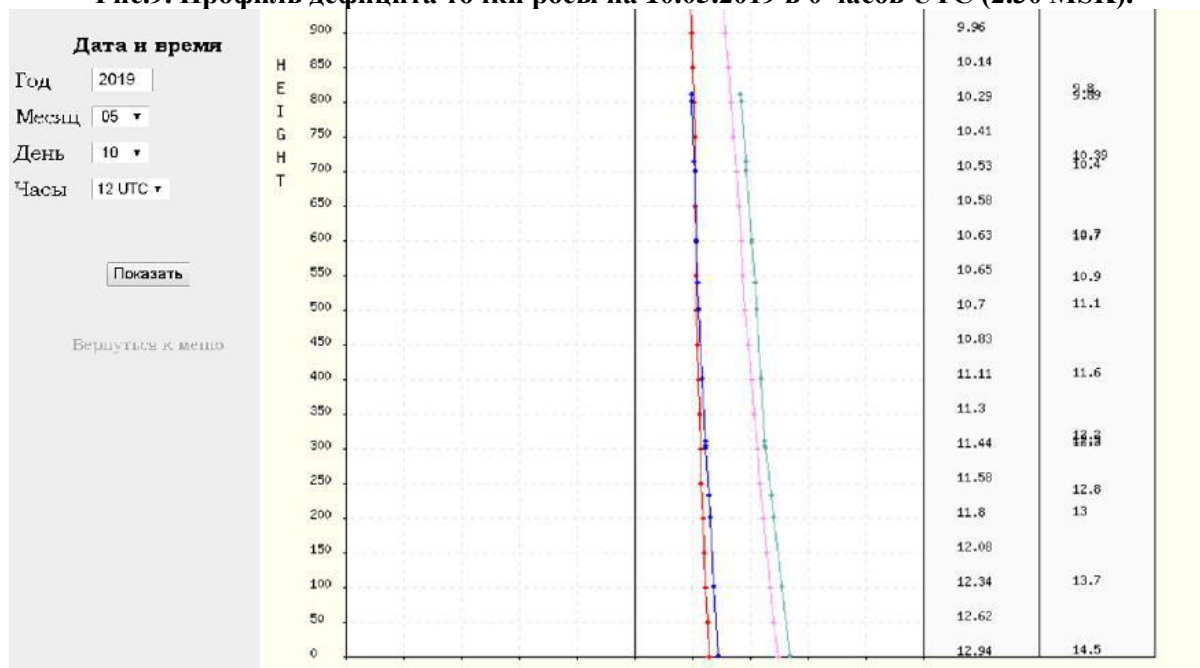


Рис.10. Профиль дефицита точки росы на 10.05.2019 в 12 часов UTC (14.30 MSK).  
 Дата и время представлены слева.

### Заключение

Как видно из сравнительного анализа, помимо измерения профилей температуры АПС приборы МТР-5, или аналогичные, в комплексе с метеорологической наземной станцией возможно использовать для качественной оценки профилей относительной влажности, абсолютной влажности, точки росы и дефицита точки росы.

## Литература

1. *Зайцева Н.А.* Аэрология. –Л.: Гидрометеиздат, 1990, 237 с. (ISBN 5-286-00415-6).
2. *Кадыгров Е.Н.* Микроволновая радиометрия термической стратификации атмосферы. — М.: ООО "Печатный салон Шанс", 2020, 272 с. (ISBN 978-5-6045006-3-7).
3. *Kadygrov E.N., Pick D.R.* The potential for temperature retrieval from an angular- scanning single-channel microwave radiometer and some comparisons with in situ observations. *Meteorological Applications*, v.5, Issue 4, 1998, p. 393-404.
4. *Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н.* Методические рекомендации по использованию данных дистанционных измерений профилей температуры в атмосферном пограничном слое микроволновыми профиломерами: теория и практика.-Долгопрудный, издательство «Физматкнига», 2015, 171 с.
5. *Агапов Ю.В., Ганьшин Е.В., Кадыгров Е.Н., Князев А.К., Миллер Е.А., Некрасов В. В., Шапошников А.Н.* // Пополняемая база данных температуры атмосферы в городе Долгопрудном Московской области в диапазоне высот от 0 до 1000 метров за первое полугодие 2019 года - Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019622489 дата регистрации в Реестре 26 декабря 2019 г. Правообладатель: ФГБУ ЦАО.
6. *Миняев В.В.* "Расчет параметров атмосферы с учетом влажности воздуха", вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Естественные науки". 2004. №2.
7. *Buck A. L.* Research Manual (1996); updated equation from Buck, A. L., New equations for computing vapor pressure and enhancement factor, *J. Appl. Meteorol.*, 20, 1527-1532, 1981.
8. *Bolton David* The Computation of Equivalent Potential Temperature, *Monthly Weather review*, v. 108, 1046 – 1053, Issue 7 (Jul 1980).
9. *Бурцев С. И., Цветков Ю. Н.* Влажный воздух. Состав и свойства. — СПб.: СПбГАХИТ, 1998. -146 с.— ISBN 5-89565-005-8.
10. *Barenbrug, A.W.T.* Psychrometry and Psychrometric Charts, 3<sup>rd</sup> Edition, Cape Town, S.A.: Cape and Transvaal Printers Ltd., 1974.
11. *John M. Wallace, Peter V. Hobbs.* Water Vapor in Air // Atmospheric Science. An introductory Survey.. — Second edition. — Washington: Academic Press Elsevier, 2006. – 551 с. - ISBN 978-0-12-732951-2.