

Новые приборы и методы метеорологического и экологического мониторинга

Корольков Владимир Александрович, д.т.н.

(Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск).

Основные метеорологические параметры, контролируемые на метеостанциях:

- - **скорость и направление ветра,**
- - **температура и влажность воздуха,**
- - **атмосферное давление,**
- - **наличие, вид и интенсивность осадков,**
- - **высота снежного покрова;**
- - **продолжительность солнечного сияния и интенсивность облачности.**

Механические измерители параметров ветра



Чашечный анемометр с флюгером



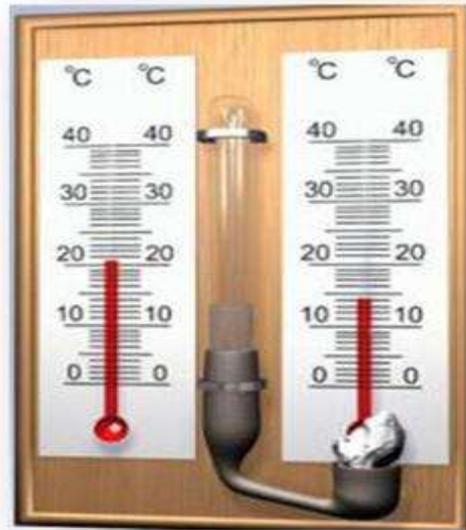
Анеморумбометр

Измерение температуры и влажности воздуха



Психрометр

- ❖ Обычно пользуются в тех случаях, когда требуется достаточно точное и быстрое определение влажности воздуха.



Психрометр Августа имеет два термометра: сухой и влажный. Они так называются потому, что конец одного из термометров находится в воздухе, а конец второго обвязан кусочком марли, погруженным в воду. Испарение воды с поверхности влажного термометра приводит к понижению его температуры. Сухой термометр показывает обычную температуру воздуха. Значения температур можно перевести в значение относительной влажности воздуха по специальной таблице.

Традиционные осадкомеры



О-1 (Ведро Третьякова)



Весовой осадкомер МЖ-24



Челночный осадкомер

Метод ультразвуковой термоанемометрии



- $t_1 = L / (c + v_x)$
- $t_2 = L / (c - v_x)$
- $v_x = 0,5L(t_2 - t_1) / t_1 t_2$
- $c = 0,5L / (t_1 + t_2) / t_1 t_2$

$$C_T^2 = \langle [T'(t + \Delta t) - T'(t)]^2 \rangle (\langle V_m \rangle \Delta t)^{-2/3}$$

$$C_V^2 = \langle [u'(t + \Delta t) - u'(t)]^2 \rangle (\langle V_m \rangle \Delta t)^{-2/3}$$

$$C_{na}^2 = C_T^2 / (2 \langle T_k \rangle)^2 + C_V^2 / \langle c \rangle^2$$

$$C_{no}^2 = \left\{ 8 \cdot 10^{-5} \langle P \rangle / \langle T_k \rangle^2 \right\}^2 C_T^2$$

$$c = \sqrt{\frac{\chi R}{\mu} T_K}$$

$\chi = c_p / c_v$ – отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме;

R – универсальная газовая постоянная;

μ – молекулярный вес газа.

Для сухого воздуха при нормальных условиях

$\chi = 1,402$, $\mu = 28,96$, $R = 8,315 \cdot 10^7$ эрг/град

Учет зависимости от влажности воздуха:

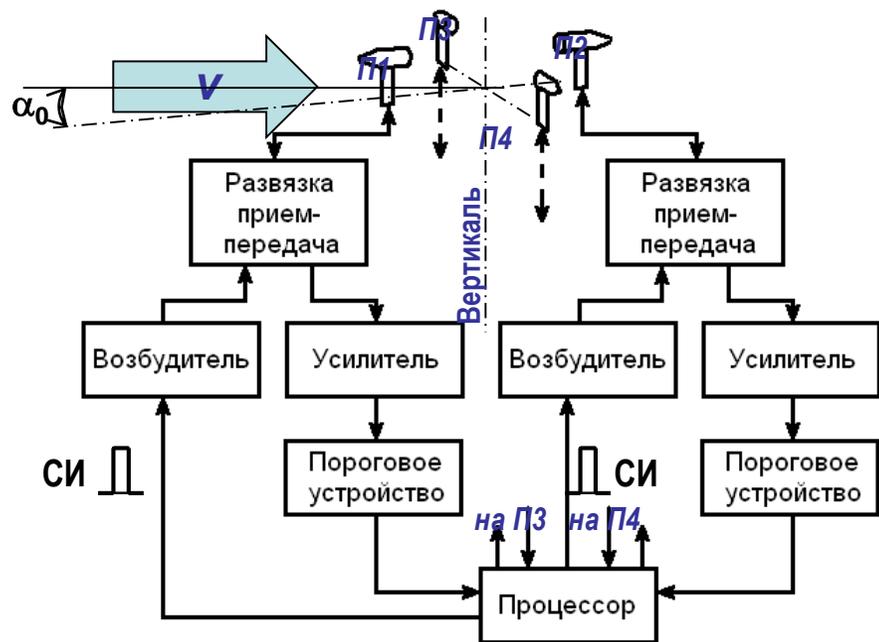
$$c = 20,067 T^{1/2}$$

где $T_e = T_K (1 + 0,3192 e / p_\alpha)$ – виртуальная акустическая температура.

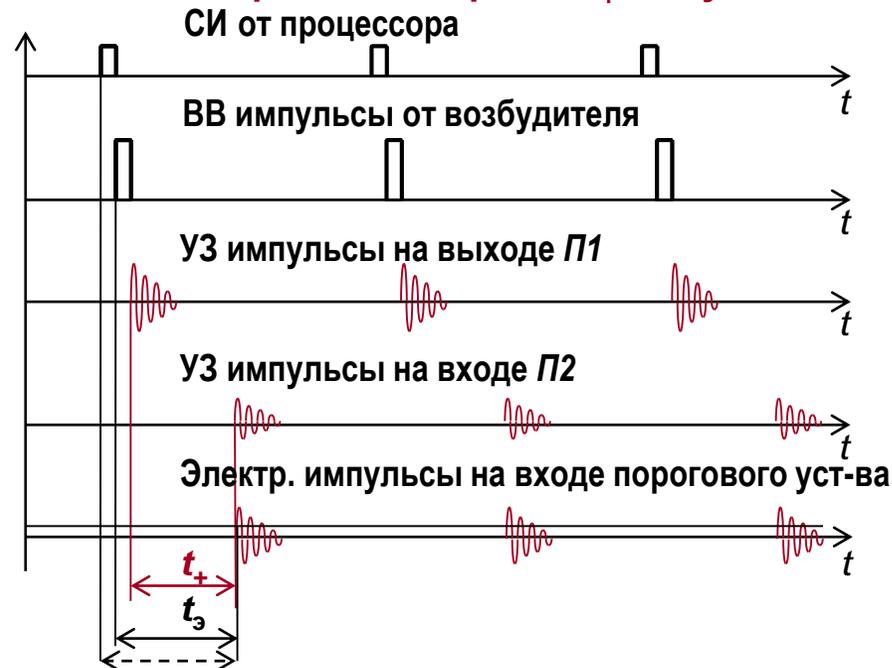
e / p_α – отношение упругости водяного пара к атмосферному давлению

Измерение скорости горизонтального ветра

Размещая две линейные системы (П1÷П2 и П3÷П4 в горизонтальной плоскости в двух взаимно ортогональных направлениях можно определить скорость (v_d и v_n) и, соответственно, направление горизонтального ветра.



Временная диаграмма измерения t_+ на пути П1÷П2



Примерная структурная схема моностатического УЗА

- d – расстояние между П1 и П2 и П3 ÷ П4 (звуковой путь);
- t_+ – время распространения звукового импульса на пути d от П1 до П2; электроно детектируемое время распространения сигнала;
- $(t_з - t_+)$ – систематическая задержка;
- α_0 – азимут невозмущенного потока относительно ориентации УЗА;
- φ – угол отклонения ориентации УЗА от вертикали.

Аналогичные измерения проводят на пути П2÷П1, измеряя t_- и определяют v_d , а также на путях П3÷П4 и П4÷П3, измеряя соответствующие временные интервалы, и определяют v_n . (Частота повторений СИ – до 100 Гц).

Основные достоинства метода ультразвуковой термоанемометрии

- высокая чувствительность измерений метеопараметров (до 0,01 м/с по скорости ветра и до 0,01 градуса по температуре);
- малая инерционность измерений (до 80 мгновенных значений метеопараметров в секунду);
- отсутствие влияния радиационных помех от прямых солнечных лучей на измерение температуры воздуха;
- высокая эксплуатационная надежность измерительной системы вследствие отсутствия механических вращающихся элементов в датчике скорости ветра;
- малый вес и габариты измерительной системы;
- низкий уровень энергопотребления;
- полная автоматизация процесса измерения и обработки метеоданных, предоставление результатов измерения метеопараметров в удобном для интерпретации графическом виде в реальном масштабе времени.
- возможность вычисления в реальном масштабе времени несколько десятков производных значений метеопараметров, характеризующих турбулентность атмосферы в точке измерения, другие динамические и статистические ее параметры.

Типы созданных УЗА

Измерение скорости горизонтального ветра

Примеры реальных УЗА различных фирм

(Изображены примерно в одном масштабе)



Wind Observer
Gill Instruments Ltd (Великобритания)



Wind Sonic



UA Compact
Thies Clima (Германия)



UA 2D



Wind Horizon 200
МЕТЕК (Германия)



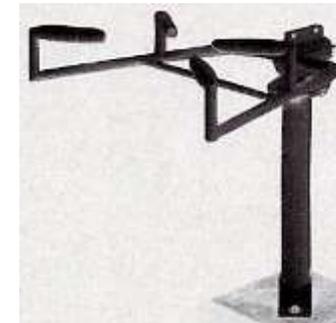
Model 85004
R.M. Young Company (США)



Model 85052



Sonimometer 102683
Climatronics Corporation (США)



TR-52T
Kaijo (Япония)

Типы созданных УЗА

Измерение скорости горизонтального ветра

Примеры с использованием резервных каналов

Vaisala (Финляндия)



WS425



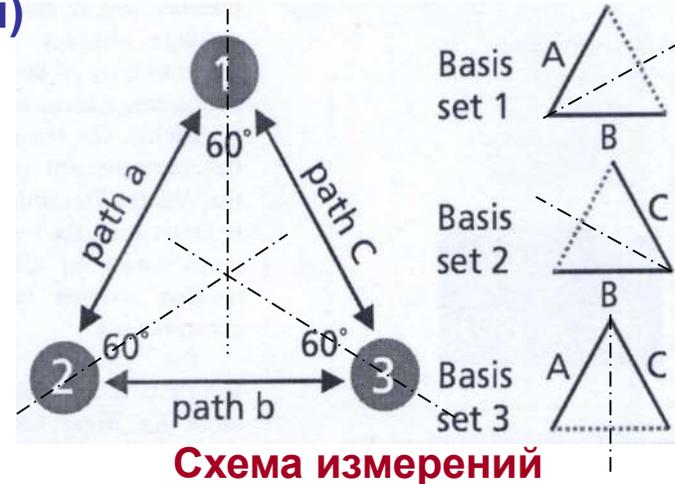
WS425 F/G



WMT52



WMT52-O



Измерение времен распространения звука на 6 путях позволяет рассчитать скорость ветра на каждом из трех путей, которые расположены под углом 120° друг к другу.

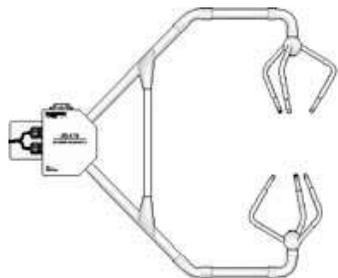
Вычисленные скорости ветра не зависят от высоты, температуры и влажности, поскольку они компенсируются при шести измерениях, даже когда скорость звука влияет на индивидуальные времена распространения.

Некорректная интерпретация результатов может иметь место, когда большие капли дождя или льдинки ударяют по преобразователю. Это компенсируется особенностью работы процессора.

Скорость ветра, которая в наибольшей степени подвергается воздействию турбулентности, компенсируется таким образом, что скорость ветра и направление вычисляются из двух наилучших векторов.

Типы созданных 3D-УЗА

Примеры реальных УЗА различных фирм
(Изображены примерно в одном масштабе)



CSAT Campbell Scientific
Inc (США)



Sonic Corporation. Япония



Model 81000
R.M. Young Company
(США)



UA 3D
Thies Clima
(Германия)



АЦАТ-3

НПО «Тайфун»
(Россия)



АЦАТ-3М



USA-1
Германия



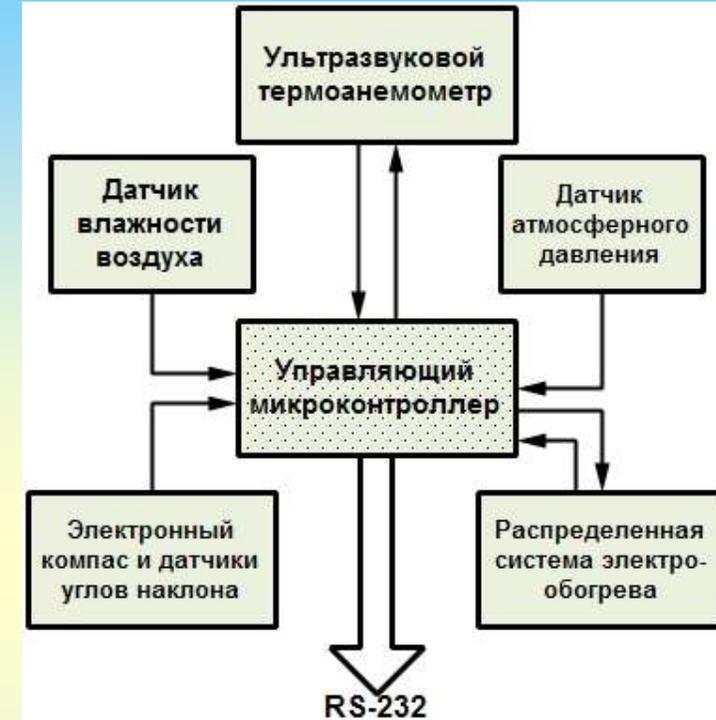
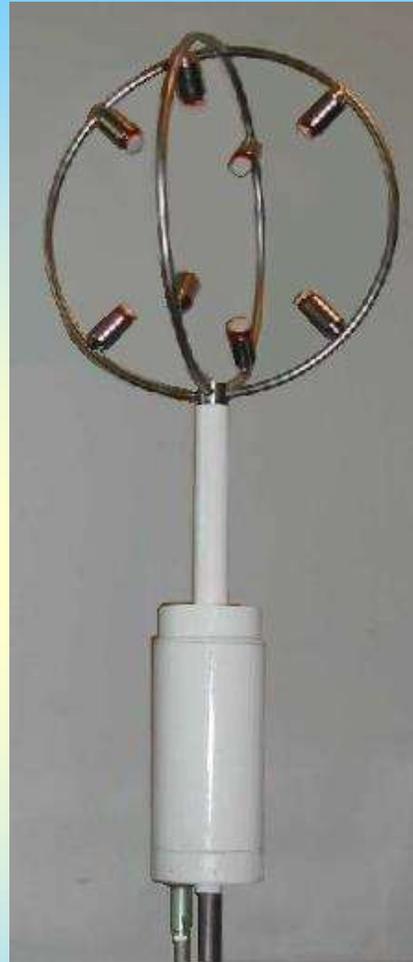
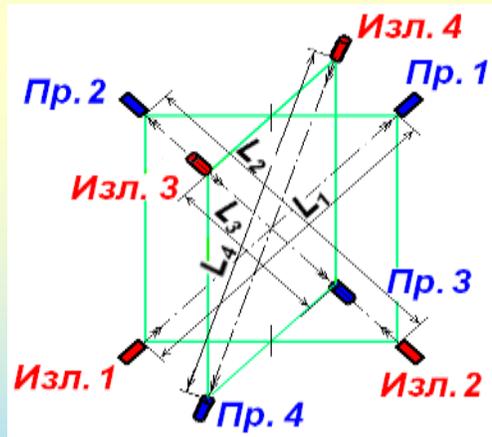
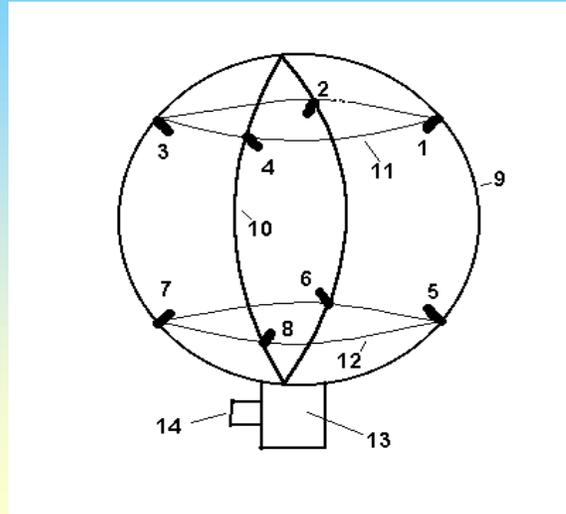
3-Outer-Bar
ISO 16622:2002



Applied Technologies Inc (США)



Ультразвуковой термоанемометр ДСВ-15



Блок-схема ультразвукового термоанемометра с дополнительными датчиками влажности воздуха, атмосферного давления и пространственной ориентации.

Конструкция и акустическая схема ультразвукового термоанемометра ДСВ-15.

Бистатическая акустическая схема измерений.

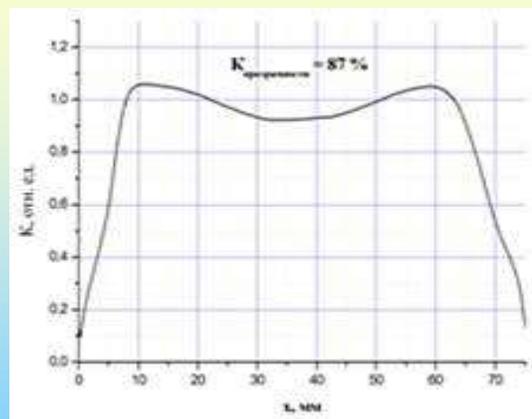
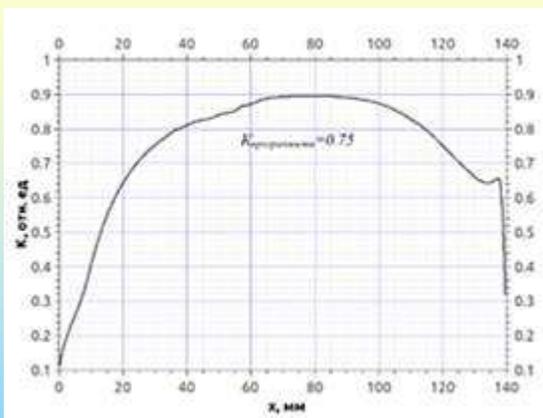
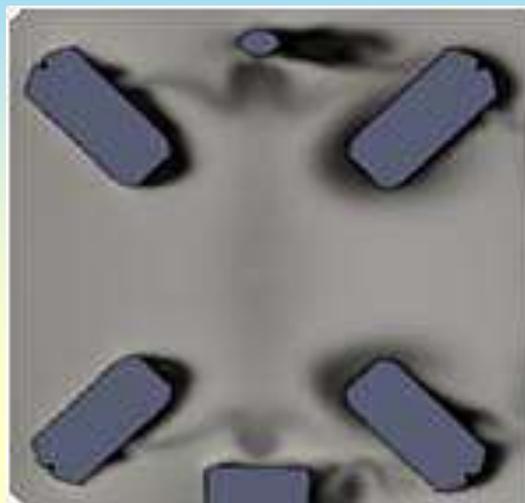
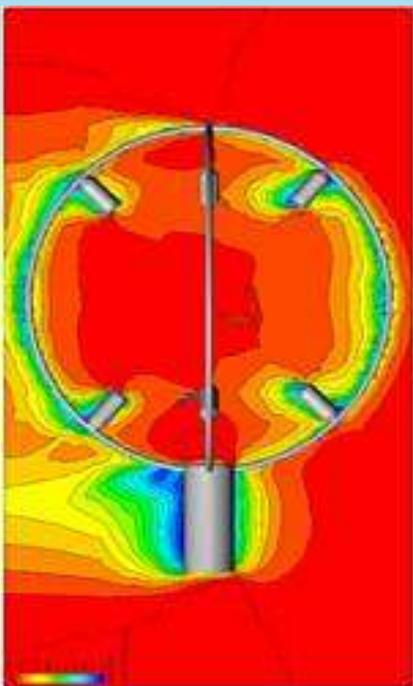
$$L_1/t_1 = c + v_z \cos\alpha + v_x \sin\alpha \quad (7-1 - \text{канал №1});$$

$$L_2/t_2 = c + v_z \cos\alpha - v_x \sin\alpha \quad (5-3 - \text{канал №2});$$

$$L_3/t_3 = c - v_z \cos\alpha + v_y \sin\alpha \quad (4-6 - \text{канал №3});$$

$$L_4/t_4 = c - v_z \cos\alpha - v_y \sin\alpha \quad (2-8 - \text{канал №4}).$$

Ветровое затенение измерительного объема ДСВ-15



Профили скорости ветра в измерительном объеме 3D-УГА различных конструкций

Ультразвуковой термоанемометр ДСВ-15

- 1) T - средняя температура воздуха, °С;
- 2) $\sigma[T]$ - стандартное отклонение температуры, °С;

- 11) V – средняя скорость горизонтального ветра, м/с;
- 12) V_{min} – минимальная скорость мгновенного горизонтального ветра, м/с;
- 13) V_{max} – максимальная скорость мгновенного горизонтального ветра, м/с;
- 14) $\sigma[V]$ – стандартное отклонение скорости Горизонтального ветра, м/с;
- 15) D – среднее направление горизонтального ветра, градусы;
- 16) $\sigma[D]$ – стандартное отклонение направления ветра, м/с;
- 17) w – средняя скорость вертикального ветра, м/с;
- 18) $\sigma[w]$ – стандартное отклонение скорости вертикального ветра, м/с;
- 19) W – модуль среднего вектора скорости ветра, м/с;
- 20) α – угол наклона к горизонту среднего вектора скорости ветра, градусы;

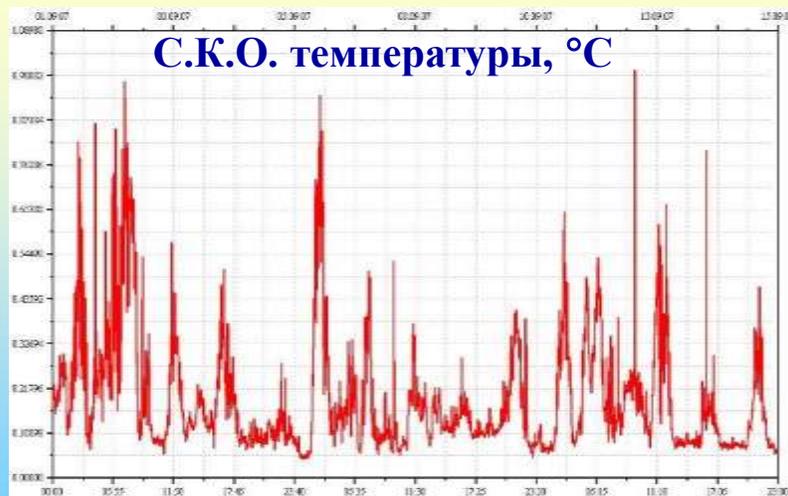
- 21) V_s – среднее значение южной компоненты скорости ветра, м/с;
- 22) V_e – среднее значение восточной компоненты скорости ветра, м/с
- *23) T_{min} – минимальная средняя температура воздуха, °С;
- *24) T_{max} – максимальная средняя температура воздуха, °С;
- 25) V_{min} – минимальная скорость мгновенного горизонтального ветра, м/с;
- *26) V_{max} – максимальная скорость мгновенного горизонтального ветра, м/с.

стандартные параметры турбулентных флуктуаций температуры и ветра (их энергетические характеристики, потоки тепла и импульса, характерные масштабы атмосферной турбулентности, структурные постоянные C_T^2 , C_V^2 и C_n^2).

9. Примеры использования ПО “МЕТЕО ДВ”

Построение графиков и гистограмм

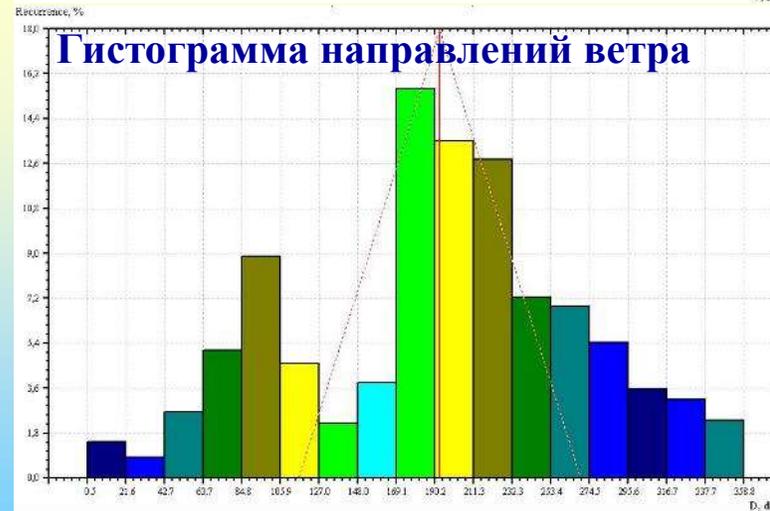
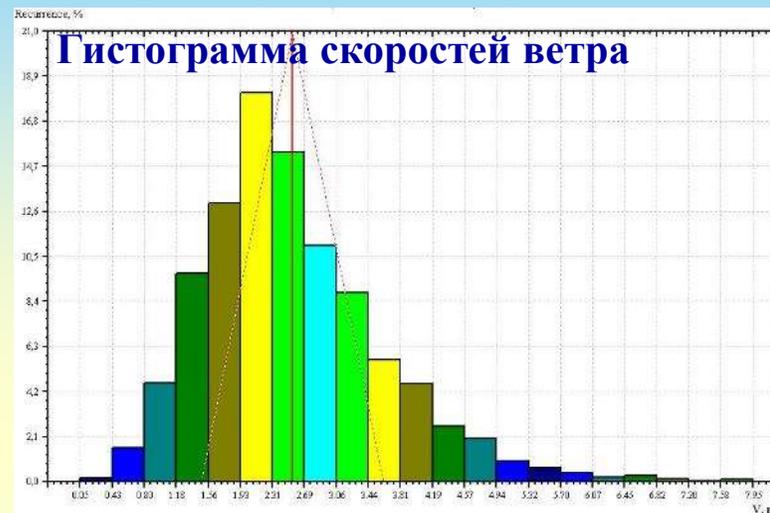
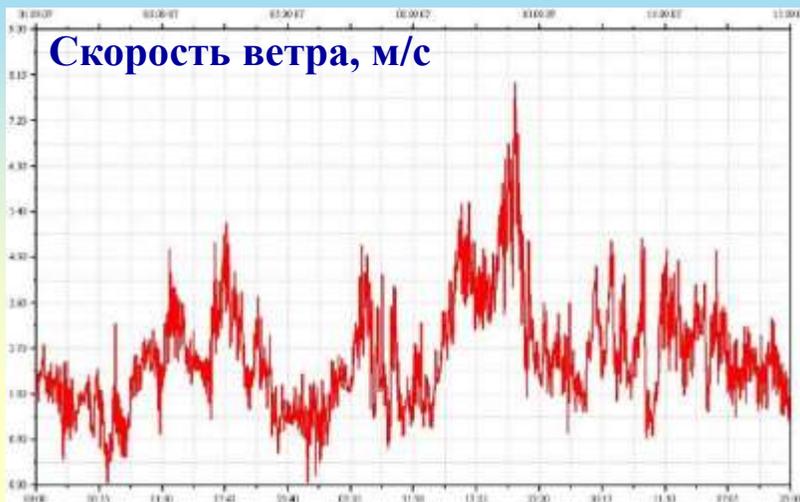
с 1 по 15 сентября 2007 г., г.Томск – характеристики температуры

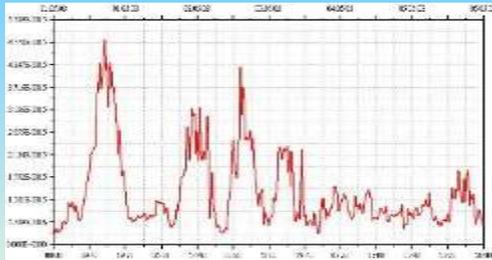


9. Примеры использования ПО "МЕТЕО ДВ"

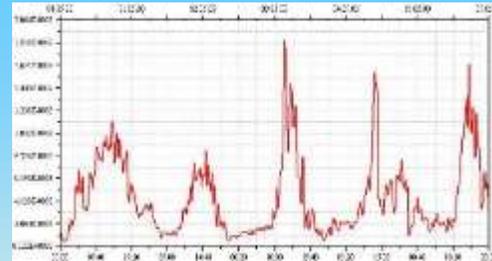
Построение графиков и гистограмм

с 1 по 15 сентября 2007 г., г.Томск – характеристики ветра

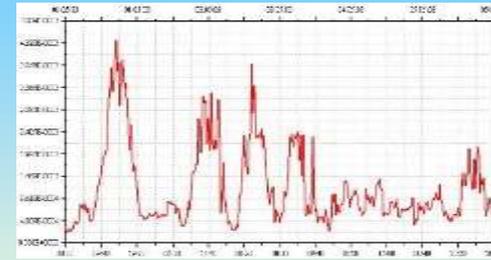




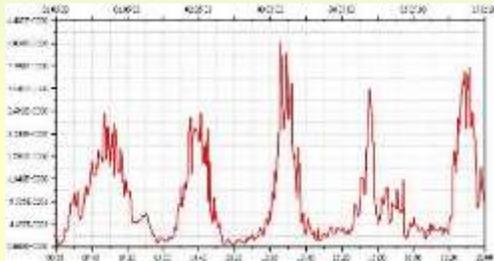
**Структурная постоянная флуктуаций
оптического показателя преломления C_n^2**



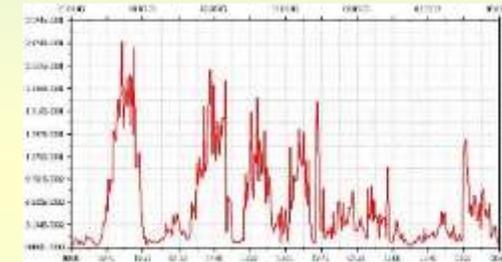
**Структурная постоянная
ветровых флуктуаций C_v^2**



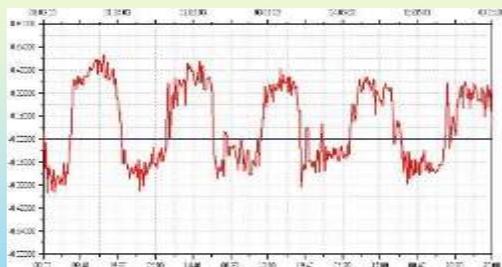
**Структурная постоянная
температурных флуктуаций C_T^2**



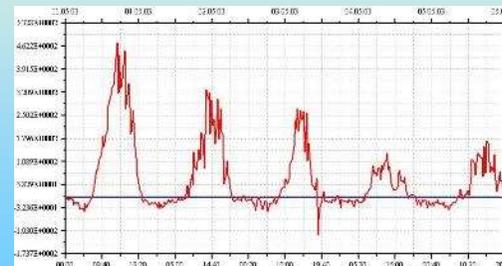
**Полная энергия флуктуаций скорости
ветра**



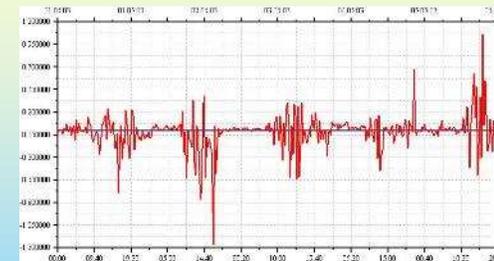
**Полная энергия
флуктуаций температуры**



**Взаимная корреляция
температуры и вертикального
ветра**

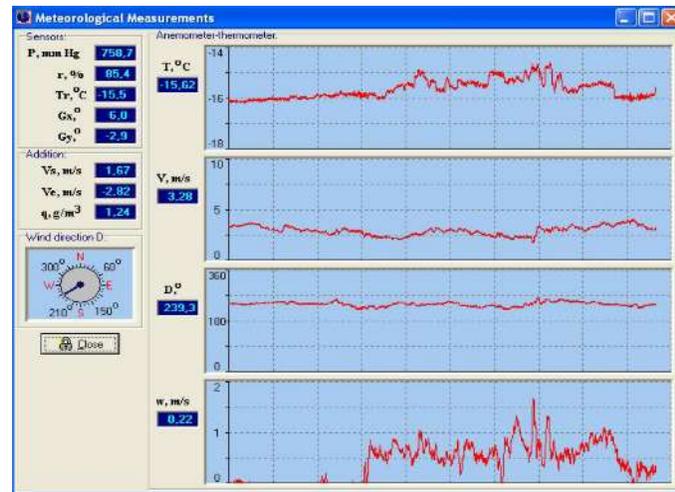
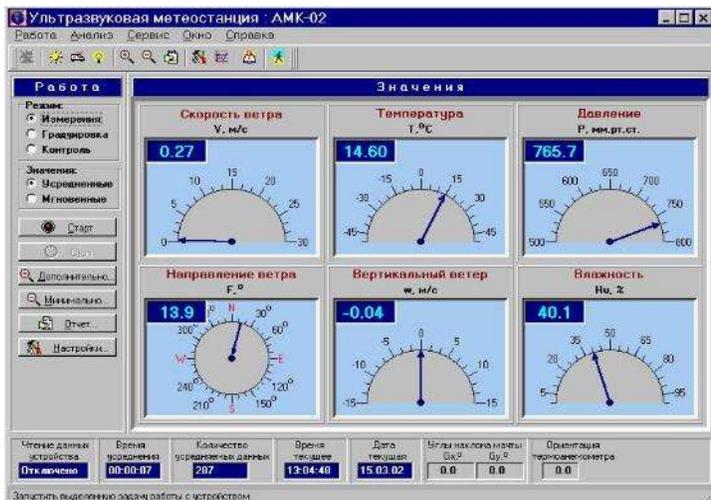


Вертикальный поток тепла



**Вертикальный поток
импульса**

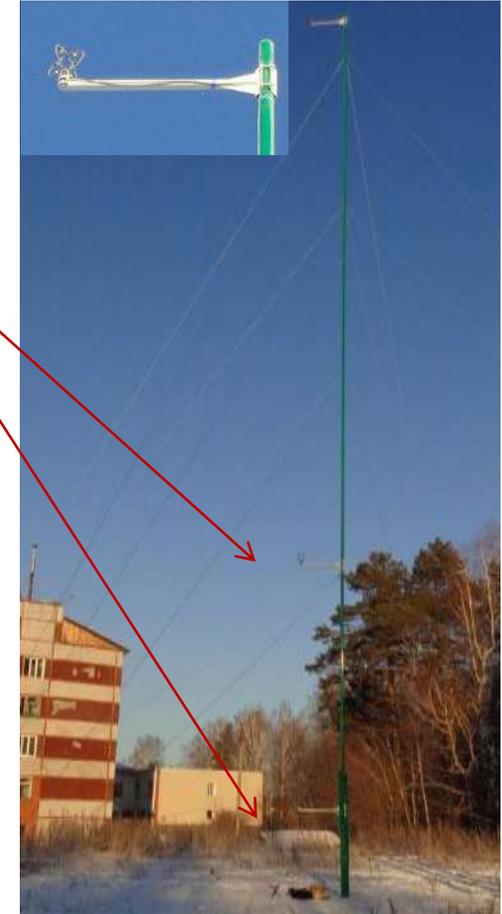
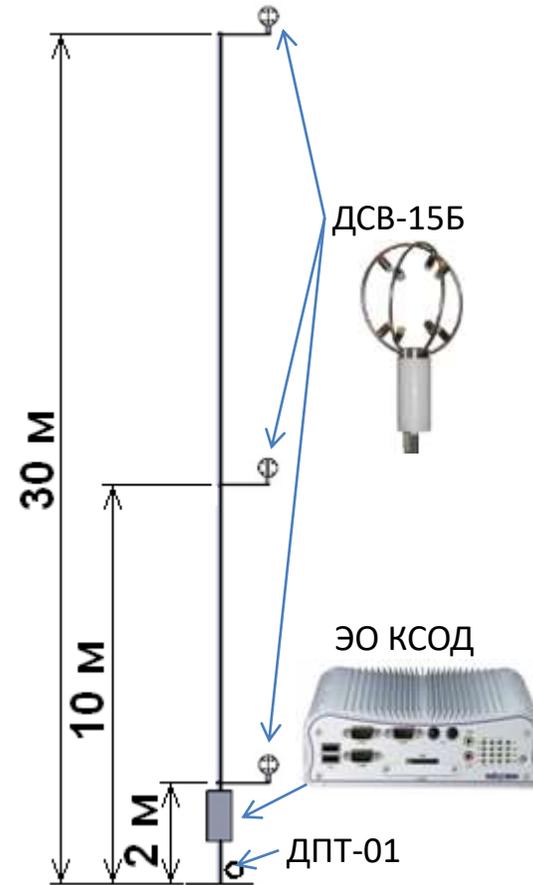
Ультразвуковая автоматическая метеорологическая станция АМК-03



Окна цифрового и графического отображения средних и мгновенных значений метеорологических величин

Измеряемая величина	Диапазон измерения	Погрешность
Температура воздуха (T), град С	минус 50...плюс 55	± 0,3 °C, при T ≤ +30 °C ± 0,5 °C, при T > +30 °C
Скорость горизонтального ветра (V), м/с	0,1...40	± (0,1 + 0,02 V)
Направление горизонтального ветра, град	0...360	± 2 °
Скорость вертикального ветра (W), м/с	-15...+15	± (0,1 + 0,02 W)
Относительная влажность воздуха, %	10...100	± 2,5 % при T > 0 °C; ± 5 % при T ≤ 0 °C
Атмосферное давление, гПа	693...1067	± 1,0

Ультразвуковая автоматическая метеорологическая станция АМК-03



Предложен и теоретически обоснован оригинальный метод определения типа стратификации и вертикальных профилей метеорологических характеристик АПС, основанный на совместном физико-математическом анализе данных измерений ультразвуковых метеостанций, синхронно выполняемых на нескольких (не менее 3-х) высотных уровнях

Переносные ультразвуковые автоматические метеостанции:

Метеокомплект 1Б65



Метеокомплект 1Б65. Укладка составных частей изделия 1Б65 в транспортном контейнере.

Габариты контейнера: 215×400×715 мм.
Масса изделия в контейнере – 18.8 кг.



Пульт управления и индикации ВиИ.



Метеокомплект 1Б65.
Развернутое положение



Метеокомплект 1Б65 в
походном положении

Сибаналитприбор

Метеокомплекс 1Б65 на позиции



Переносной метеорологический комплекс АМК-03П



Пульт управления
ПШУ-25



Блок измерения
метеопараметров
ДСВ-15



GPS-навигатор



Транспортный контейнер



Блок сбора и
накопления
информации БСИ-13



Блок питания
БПНН-01



Датчик температуры грунта



Разборная метеомачта с
арматурой крепления



GPRS-контроллер

Бортовой автоматический метеокомплекс 1Б65Б



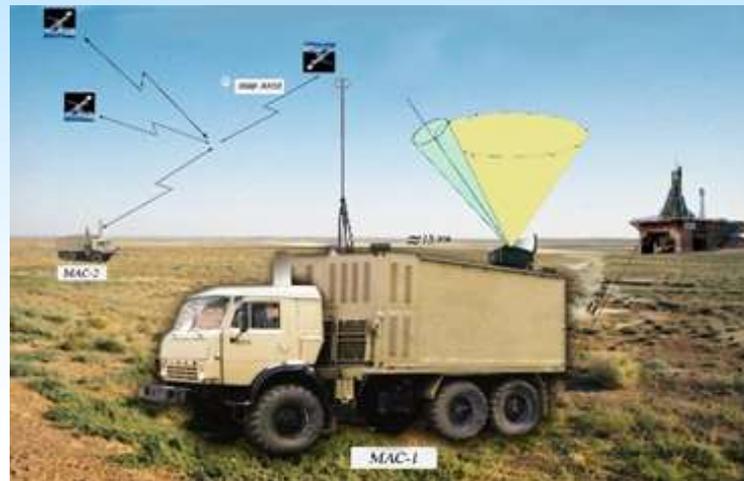
Бортовой метеокомплекс 1Б65Б на машине управления артиллерийским огнем

Пульт управления и индикации ВиИ-Б

Бортовой метеорологический комплекс АМК-03Б на автомобилях УАЗ, КАМАЗ, ГАЗ «Соболь» и БТР-80



Мобильный исследовательский комплекс ООО «Сибаналитприбор»



Мобильный аэрологический комплекс (космодром «Байконур»)



Мобильный исследовательский комплекс ИМКЭС СО РАН



Машина радиохимической разведки РХМ-6



Методы измерения вертикальных профилей метеорологических величин

Атмосферный пограничный слой (АПС) – наиболее динамично изменяющаяся нижняя составная часть воздушной оболочки Земли.

Необходимость знания вертикальных профилей метеорологических величин в АПС в режиме on-line для хозяйственных, военных и научных задач.

Методы:

1. Лазерное зондирование (лидар)
2. Акустическое зондирование (сонар)
3. Радиоволновое зондирование (радар)
4. Пассивные измерения теплового излучения атмосферы (радиометры, температурный профилемер)
5. Контактные измерения с помощью АМС, установленных на БПЛА:
 - а) наиболее распространенные – шар-зонды
 - б) вновь развиваемые:
 - *радиоуправляемые БПЛА (гексакоптеры, дроны)*
 - *привязные аэростаты*

Электронная метеостанция на гексакоптере



Период усреднения метеоданных 3 с ... 20 мин
Передача информации по радиоканалу (2,4 ГГц)
Точность зависания гексакоптера (в режиме GPS):
- вертикальная – 0,5 м
- горизонтальная – 2,5 м
Максимальная скорость взлета – 5 м/с;
Максимальная скорость спуска – 4 м/с;
Максимальная горизонтальная скорость – 22 м/с.

Измеряемые метеорологические характеристики:

Средняя (за период), максимальная/минимальная **температура воздуха**;
Средняя (за период), максимальная/минимальная **влажность воздуха**;
Среднее (за период), максимальное/минимальное **атмосферное давление**.

Диапазон и погрешности измерений:

Температура воздуха: от минус 50 до +55 °С
($\pm 0,2$ °С, при $T \leq +30$ °С; $\pm 0,3$ °С, при $T > +30$ °С.

Влажность воздуха: от 15 до 100%
($\pm 2,5\%$ при $T > 0$ °С; $\pm 5\%$ при $T < 0$ °С).

Атмосферное давление: от 520 до 800 мм.рт.ст.
($\pm 0,5$ мм.рт.ст.)

Режим измерений: режим реального времени

Вертикальное разрешение: зависит от скорости подъема и постоянной времени метеодатчиков

Автономность работы гексакоптера: 35 минут

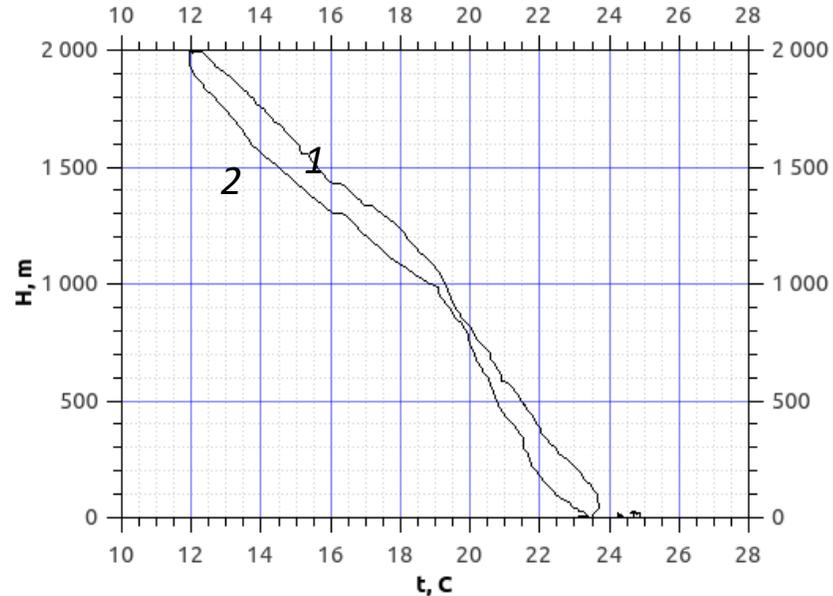
Мобильный компьютер: обеспечивает использование функции «полет по точкам» – измерения вне зоны действия радиосвязи

Функция автопилота: удерживает положение гексакоптера в одной точке и возврат БПЛА в точку старта.

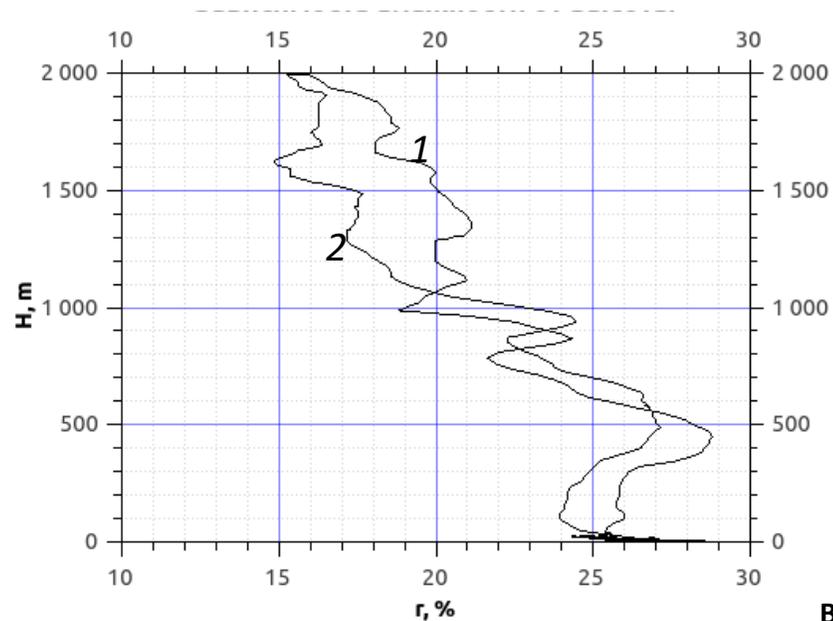
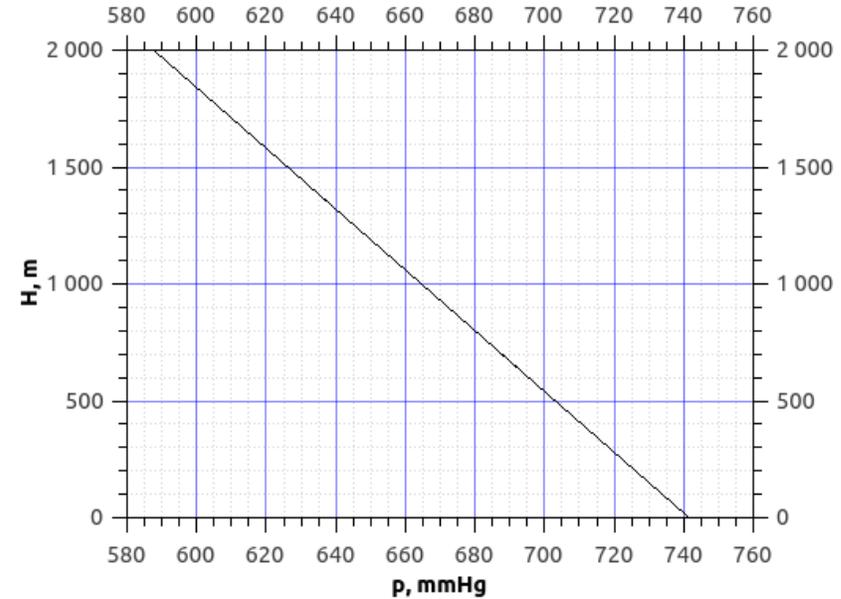


Результаты измерений ПЭМС-БПЛА

Зависимость температуры от высоты



Зависимость давления от высоты



Результаты первых натуральных испытаний ПЭМС-БПЛА
02.09.2015, после 17:00 (восточная окраина Томска):

Единичные измерения 1 раз в 5 секунд;

1 – подъем до высоты 2 км за 30 минут ($v_{cp} \geq 3$ v/c).

2 – спуск – за 15 минут ($v_{cp} \geq 4$ v/c).

Погода имела неустойчивый характер, перистые облака, в конце эксперимента сплошная облачность.

При спуске ПЭМС-БПЛА возрастает влияние воздушных потоков от двигателей на датчик температуры

Ультразвуковая метеостанция на аэростате

Измеряемые метеорологические характеристики:

Мгновенная, средняя (за период), максимальная/минимальная (за период):
температура воздуха, влажность воздуха, атмосферное давление, скорость и направление горизонтального ветра, скорость и направление вертикального ветра.

Диапазон и погрешности измерений:

Температура воздуха: от минус 50 до +55 °С,
($\pm 0,2$ °С, при $T \leq +30$ °С; $\pm 0,3$ °С, при $T > +30$ °С.

Влажность воздуха: от 15 до 100%,
($\pm 2,5\%$ при $T > 0$ °С; $\pm 5\%$ при $T < 0$ °С).

Атмосферное давление: от 520 до 800 мм рт. ст.
($\pm 0,5$ мм рт. ст.).

Скорость горизонтального ветра: от 0,1 до 20 м/с $\pm(0,1 + 0,02V)$ м/с.

Направление горизонтального ветра: от 0 до 360°
 $\pm 2^\circ$.

Скорость вертикального ветра: от -15 до +15 м/с

Период осреднения: от 1 до 10 минут;

Режим измерений: режим реального времени;

Автономность работы ПУМС-БПЛА: 5 суток



Автоматическая метеостанция на платформе привязного аэростата гибридного типа.

Высота подъема – до 1000 м,
длительность измерений – до 5 суток.

Измеряемые параметры: турбулентные характеристики АПС, скорость и направление ветра, температура и влажность воздуха, атмосферное давление, **видеоинформация.**

Оптические измерители параметров осадков

Работа основана на принципе получения и анализа теневых изображений отдельных капель дождя (града), пролетающих под действием силы тяжести через виртуальную измерительную площадку оптического канала устройства. Измерение размеров последовательных сечений мгновенных теневых изображений частиц осадков позволяет определить их микроструктурные и динамические характеристик – эквивалентный диаметр, объем, концентрацию и скорость падения, а также вид атмосферных осадков, и вычислить значения их

интегральных характеристик: количество осадков (мм),
интенсивность осадков (мм/час).



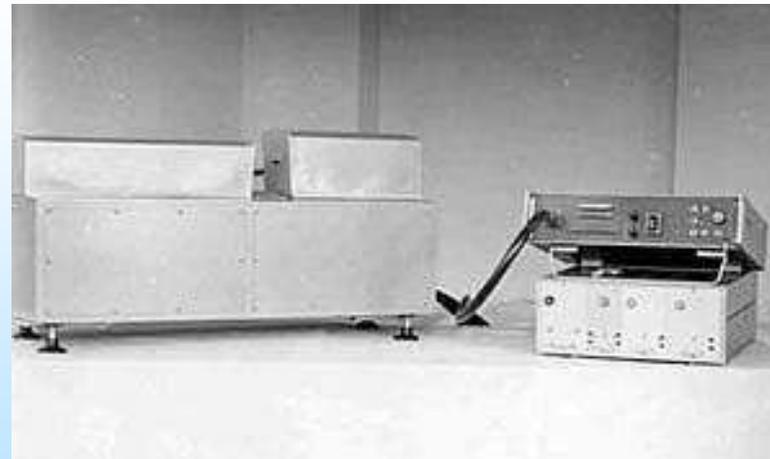
Joanneum Research (Германия)



Thies Clima (Германия)



Vaisala (Финляндия)



СКБ «Оптика» (СССР)



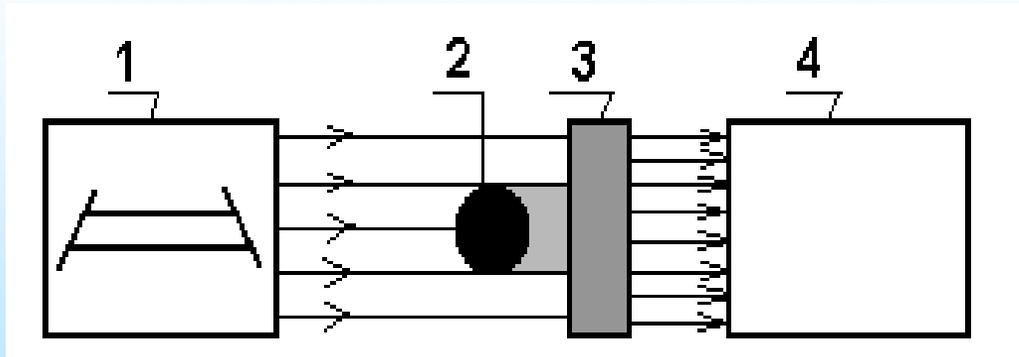
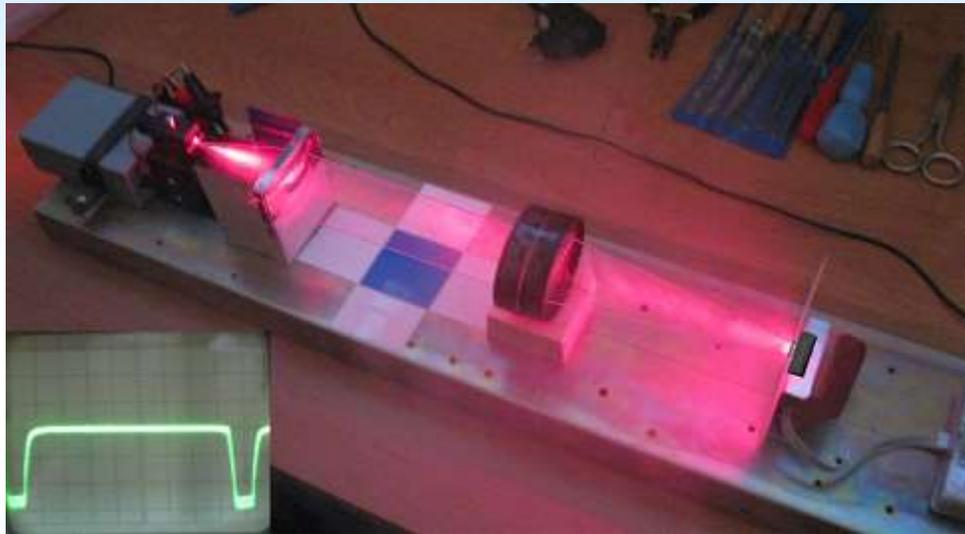
SPEC (США)



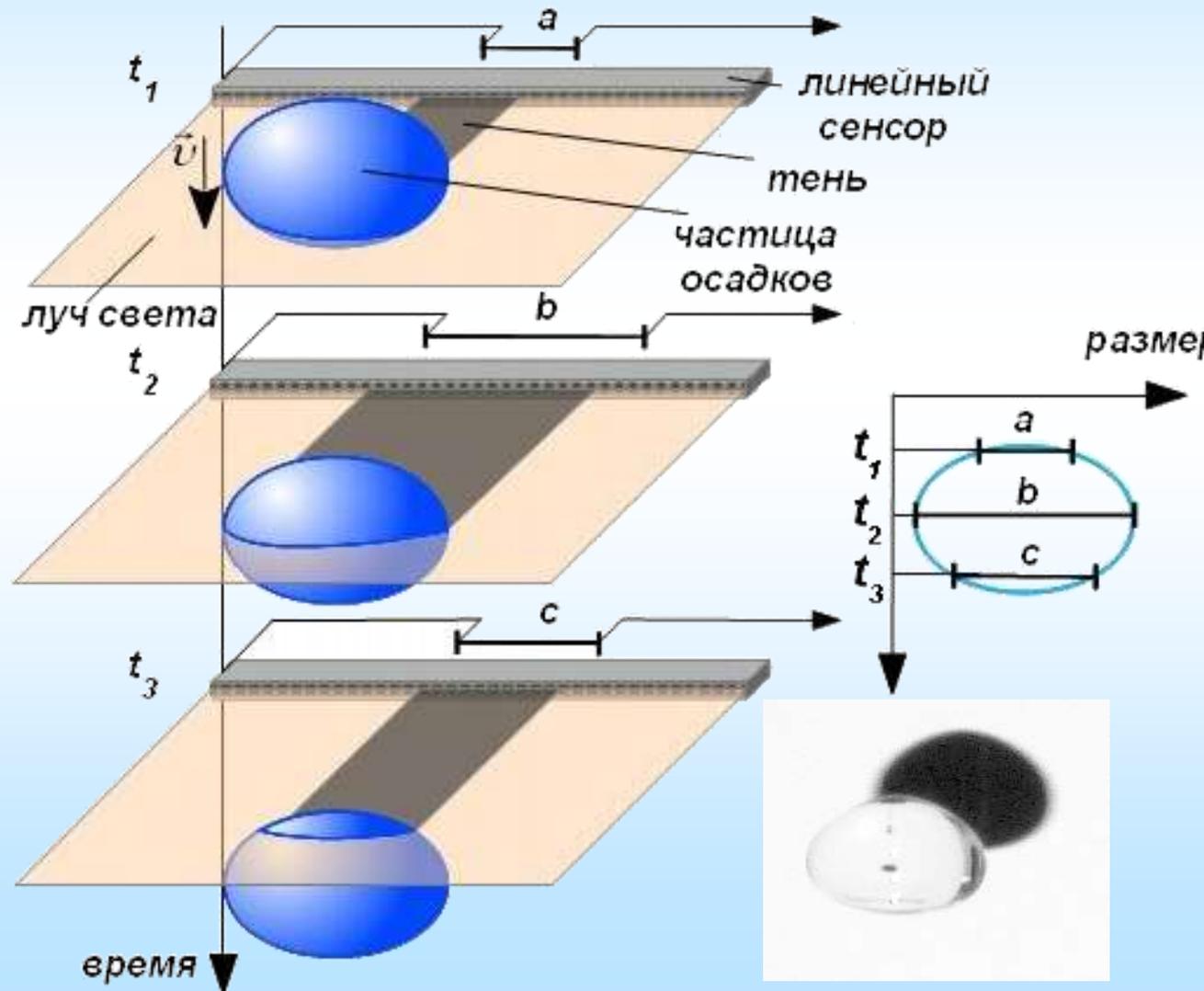
Optical Scientific (США)

Принцип действия оптических измерителей осадков

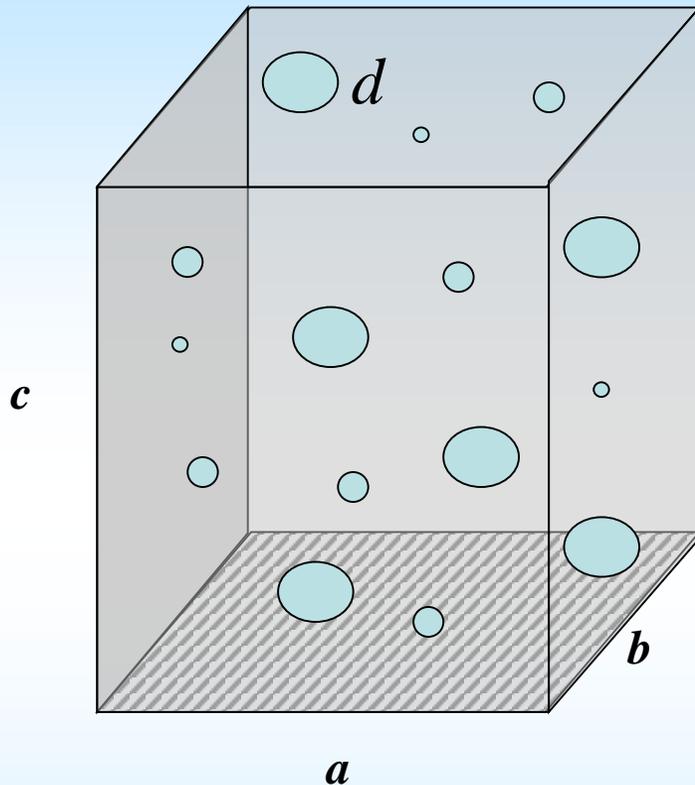
1 Формирование оптического измерительного канала



2 Регистрация теней частиц осадков



Расчет интегральных характеристик



$$S = a \cdot b$$

$$c = \Delta t \cdot v, \Delta t = t_1 - t_2$$

$$V_{abc} = S \cdot \Delta t \cdot v$$

$$\rho(d_s) = \frac{1}{S \Delta t d_i} \sum_{j=1}^n \frac{1}{v_j} \quad [\text{M}^{-3} \text{MM}^{-1}]$$

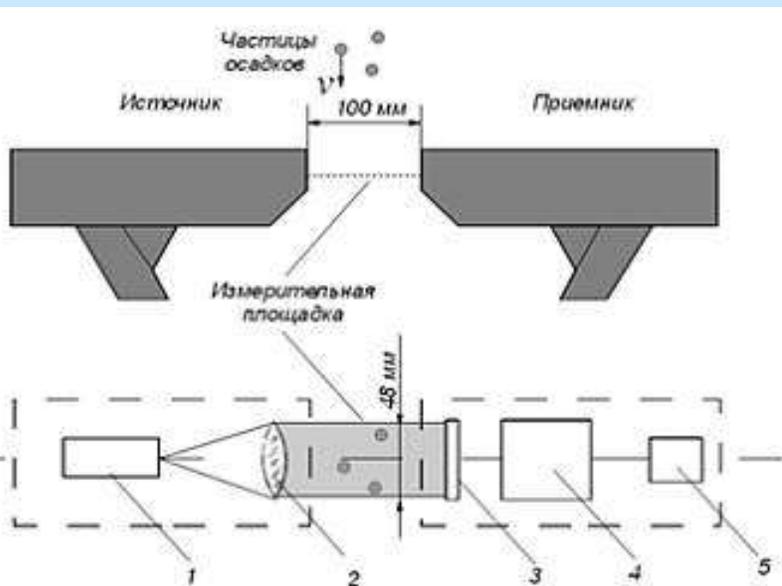
где $\rho(d_s)$ – функция распределения частиц осадков в единице объема воздуха по эквивалентным диаметрам, d – эквивалентный диаметр, v – скорость падения частицы, S – размер измерительной площадки, n – количество зарегистрированных частиц, Δt – время регистрации

$$N = \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \rho(d_s) d(d) \quad [\text{M}^{-3}]$$

$$I = 6\pi \cdot 10^{-4} \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \rho(d_s) \rho(d_s^3) V(d_s) d(d_s) \quad [\text{MM/Ч}]$$

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I(t) d(t) \quad [\text{MM}]$$

Оптические измерители параметров осадков ОДИО, ОПТИОС-1, ОПТИОС-2



Характеристика	Значение
1. Диапазон размеров частиц осадков	от 0.3 мм до 10 мм
2. Погрешность измерения размеров частиц осадков	± 0.1 мм
3. Чувствительность по количеству выпавших осадков	не хуже 10^{-4} мм
4. Погрешность измерения количества осадков	не более $\pm 5\%$
5. Погрешность измерения скорости частиц осадков	не более $\pm 3\%$

1 – источник излучения; 2 – линза; 3 – линейный сенсор; 4 – блок формирования измерительной информации; 5 – интерфейсный модуль

