



Институт мониторинга климатических и экологических систем
Сибирское отделение
Российской академии наук

г. Томск, пр. Академический, 10/3, ИМКЭС СО РАН
e-mail: tikhomirov@imces.ru, т. (3822) 492249, ф. (3822) 491950

**Ультразвуковая автоматизированная
метеорологическая станция АМК-03 и ее
возможности для локального краткосрочного
метеорологического прогноза**



Тихомиров Александр Алексеевич – зам. дир. по НР, проф., д.т.н.
Богушевич Александр Яковлевич – снс, к.ф.-м.н.
Корольков Владимир Александрович – снс, к.т.н.



Содержание доклада

- 2. Назначение УАМС АМК-03**
- 3. Основные измеряемые метеорологические величины**
- 4. Принцип действия акустического термоанемометра**
- 5. Основные составные части метеостанции АМК-03**
- 6. Переносной вариант метеостанции АМК-03П**
- 7. Бортовые варианты БМК**
- 8. Экспедиционный вариант «Эксметео-01»**
- 9. Программное обеспечение**
- 10. Примеры использования программного обеспечения**
- 11. Прототип региональной системы краткосрочного прогноза погоды**



1. Назначение УАМС АМК-03:

- автоматическое измерение и регистрация значений основных метеорологических величин (с задаваемым периодом усреднения): скорость и направление горизонтального ветра, скорость вертикального ветра, температура и относительная влажность атмосферного воздуха, давление;
- вычисление ряда стандартных статистических характеристик метеовеличин (среднеквадратические отклонения за период усреднения, коэффициенты асимметрии, эксцесса, корреляции и др.)
- вычисление ряда турбулентных характеристик полей метеовеличин;
- накопление измеренных и рассчитанных значений метеовеличин в базе данных;
- представление информации из базы данных в виде графиков изменения во времени, розы ветров за любой интервал времени, построение гистограммы вероятностного распределения значений любого параметра, сохраняемого в базе данных за любой интервал времени;
- оперативный краткосрочный (до 6 часов) локальный прогноз развития метеоситуации в реальном масштабе времени в режиме скользящей точки отсчета.

Комплексы автоматизированные измерительные
“Автономная метеорологическая станция АМК-03” АМЯ2.702.089 ТУ
зарегистрированы в Государственном реестре средств измерений под
№ 36115-07 (сертификат об утверждении типа средств измерений
RU.C.28.007.A № 29530).

Патент РФ на изобретение № 2319987



2. Основные измеряемые метеорологические величины

Измеряемая величина	Диапазон измерения	Погрешность
Температура воздуха (T), град С	минус 50...плюс 50	$\pm 0,3$ °С, при $T \leq +30$ °С $\pm 0,5$ °С, при $T > +30$ °С
Скорость горизонтального ветра (V), м/с	0,1...40	$\pm (0,1 + 0,02 V)$
Направление горизонтального ветра, град	0...360	± 4 °
Скорость вертикального ветра (W), м/с	-15...+15	$\pm (0,1 + 0,02 W)$
Относительная влажность воздуха, %	10...100	$\pm 2,5$ % при $T > 0$ °С; ± 5 % при $T \leq 0$ °С
Атмосферное давление, гПа	693...1067	$\pm 1,0$

Время усреднения измеряемых значений устанавливается оператором:

- при использовании компьютера – от 1 до 20 мин с дискретностью 1 минута;
- при использовании пульта управления (без компьютера) – 1; 2; 4 или 10 мин.

Предельная разрешающая способность:

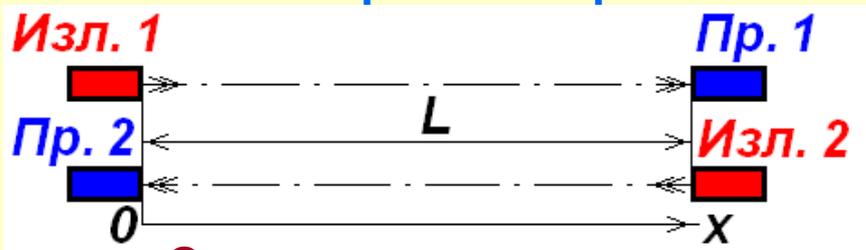
- при измерении температуры – не хуже 0,01 град;
- при измерении скорости ветра – не хуже 0,01 м/с.

Найдены технические решения, обеспечивающие расширение температурного диапазона до минус 70 °С.



3. Принцип действия акустического термоанемометра

Двухканальная система измерения скорости ветра



Скорость звука в воздухе

$$v_{зв} = 20,067 \sqrt{(1 + 0,3192 e/P) T_k}, \quad (1)$$

e – давление водяного пара, гПа;

P – атмосферное давление, гПа;

T_k – температура воздуха °K.

$$v_{зв} = L / t, \quad (2)$$

L – расстояние между излучателем (Изл.) и приемником (Пр.);

t – время распространения звука от Изл. до Пр.

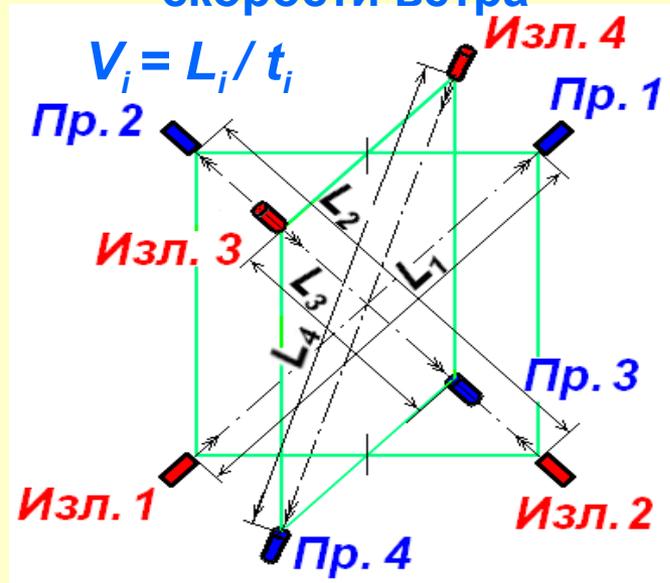
v_x – компонента скорости ветра по оси $0x$;

$t_1 = L / (v_{зв} + v_x)$ – время распространения звукового импульса вдоль оси $0x$;

$t_2 = L / (v_{зв} - v_x)$ – время распространения звукового импульса против оси $0x$;

$$v_x = 0,5 L (t_1 - t_2) / t_1 t_2; \quad (3)$$

4-х канальная система измерения скорости ветра



4 пары излучатель-приемник по вершинам куба

Такая система позволяет измерять 3-х компонентный вектор скорости ветра C и скорость звука в среде $v_{зв}$

Температура определяется из (1)

$$T_k = \left(\frac{v_{зв}}{20,067} \right)^2 / [1 + 0,3192(e/P)], \quad (4)$$

4. Основные составные части УАМС АМК-03

Частота ультразвуковых колебаний ~ 100 кГц.
Частота опроса датчиков – до 80 Гц обеспечивает измерение мгновенных значений метеовеличин.



Ультразвуковой термоанемометр ДСВ-16
Габариты: 520 × Ø230 мм;
Масса: 1,9 кг



Датчик метеовеличин ДСВ-15
Габариты: 380 × Ø230 мм;
Масса: 1,4 кг



Датчик давления и влажности ДДВ-12
150 × 80 × 80 мм;
0,6 кг



Блок питания БПН-52
200 × 100 × 80 мм; 2,2 кг



Пульт управления ППУ-25
130 × 72 × 30 мм; 0,4 кг

ДОПОЛНИТЕЛЬНО:

Комплект соединительных кабелей; диски CD с программным обеспечением; руководство по эксплуатации; инструкция по применению ПО; одиночный комплект ЗИП; метеомачта, тара.

А.А. Азбукин, А.Я. Богушевич, В.И. Ильичевский и др.
Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 // Метеорология и гидрология, 2006, № 11, с. 89-97.



5. Переносной вариант метеостанции АМК-03П



Метеостанция в развернутом положении



Транспортирование



Датчик УГИ



Пульт ВиИ



Укладка метеостанции в ранце

Переносной вариант метеостанции АМК-03
(с 4-х метровой разборной мачтой), масса укладки - 18,6 кг.
Индикация средних значений метеорологических величин
выполняется через пульт управления (ПГУ-25)
со временем усреднения 1; 2; 4 или 10 мин.
В комплект входят аккумулятор и зарядное устройство.
Время разворачивания метеостанции из походного
положения в рабочее – не более 10 минут

6. Бортовые варианты БМК



БМК-01 с телескопической метеомачтой.

Устанавливается на корпусе транспортного средства (управление развертыванием мачты с пульта управления)



БМК-02 на машине радиационной и химической разведки. (Стадия развертывания метеомачты). Контейнеры, в которых размещается ДСВ-15, обеспечивают проведение процесса самокалибровки датчиков скорости ветра и температуры.



Пульт управления работой БМК и индикации усредненных значений измеряемых метеовеличин (вариант исполнения)



6. Новый бортовой вариант БМК-2Б



Процесс развертывания, измерений и свертывания БМК-02

А.А. Тихомиров, А.Я. Богусевич, В.А. Корольков и др. // Вестник Академии военных наук, 2008, № 3, с. 144-148.

01.04.10

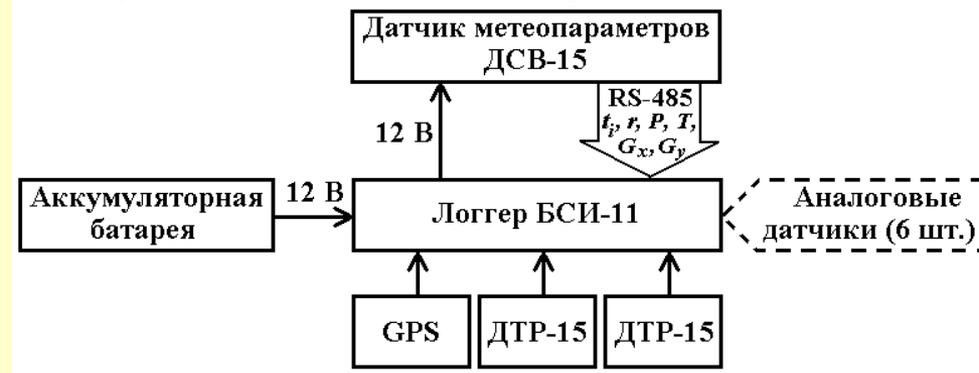
Семинар в Новосибирске



7. Экспедиционный вариант «Эксметео-01»

Модификация переносного варианта АМК-03П для регистрации и накопления результатов измерений мгновенных значений метеорологических величин

В этом варианте результаты измерений мгновенных значений метеорологических величин записываются в логгере БСИ-11 на флэш-карточку, объемом не менее 256 Мбайт. Частота измерений в ДСВ-15 равна 40 Гц. GPS-навигатор используется для автоматической привязки регистрируемых данных к времени и географическим координатам точки измерений.



Блок-схема метеостанции «Эксметео-01»



Логгер БСИ-11 со снятой крышкой



GPS-навигатор

Входящие в комплект «Эксметео-01» термометры ДТП-15 используются как датчики температуры почвы и/или воды. Кроме того, имеется возможность подключения дополнительных 6-ти аналоговых датчиков для регистрации их показаний в логгере. Дополнительная аккумуляторная батарея обеспечивает режим непрерывной работы метеостанции в течение 96 часов.

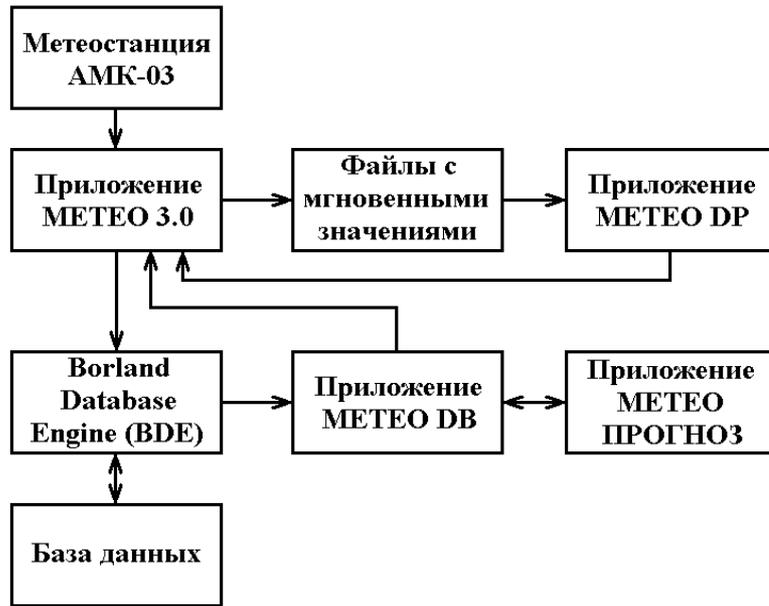
А.А. Азбукин, А.Я. Богушевич, В.А. Корольков и др. // ПТЭ, 2008, № 3, с. 181-182.



8. Программное обеспечение (ПО)

Базовое программное обеспечение “МЕТЕО 3.0” (свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002610297 от 03.12.2002);

Дополнительные приложения: “МЕТЕО DB”; “МЕТЕО DP”; “МЕТЕО ПРОГНОЗ”



При выполнении измерений АМК-03 в базе данных автоматически накапливается информация о 60 характеристиках атмосферы, включая:

- средние значения: температура воздуха, атмосферное давление, скорость и направления ветра;
- вторые, третьи и четвертые статистические моменты температуры и компонент вектора скорости ветра, минимальные и максимальные значения температуры, влажности и давления, скорости ветра, включая их взаимные корреляционные моменты;
- 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).

ПО “МЕТЕО 3.0” считывает первичные данные АМК-03 через последовательный СОМ порт и непрерывно вычисляет из них значения метеорологических величин.

ПО “МЕТЕО DB” сохраняет измеренные значения метеовеличин в базе данных компьютера.

ПО “МЕТЕО DP” предназначено для поддержки выполнения научных исследований атмосферы на основе выходных данных АМК-03.

ПО “МЕТЕО ПРОГНОЗ” позволяет проводить оперативный краткосрочный (на 3-6 часов) прогноз развития метеоситуации в реальном масштабе времени в режиме «скользящей точки отсчета».



9. Примеры использования ПО “МЕТЕО 3.0”

Средние значения метеовеличин, вычисляемые с помощью ПО “МЕТЕО 3.0”

А) для срока наблюдения (от 1 до 20 минут)

характеристики воздуха

- *1) T - средняя температура воздуха, °С;
- *2) $\sigma[T]$ - стандартное отклонение температуры, °С;
- *3) P - атмосферное давление, мм.рт.ст. / гПа;
- *4) r - относительная влажность воздуха, %;
- *5) e - упругость (давление) водяного пара, гПа;
- *6) E_d - дефицит влажности, гПа;
- *7) T_d - температура точки росы, °С;
- 8) q - абсолютная влажность воздуха, г/м³;
- 9) m - массовая концентрация влаги, о/оо
- 10) ρ - плотность воздуха, г/м³.

характеристики ветра

- *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.

Б) для интервала между сроками наблюдения

- *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.

Примечания:

1. Символом (*) здесь отмечены стандартные параметры, требуемые к измерению Росгидрометом.
2. Скорости мгновенного ветра - скорость ветра с текущим 2-х секундным усреднением.

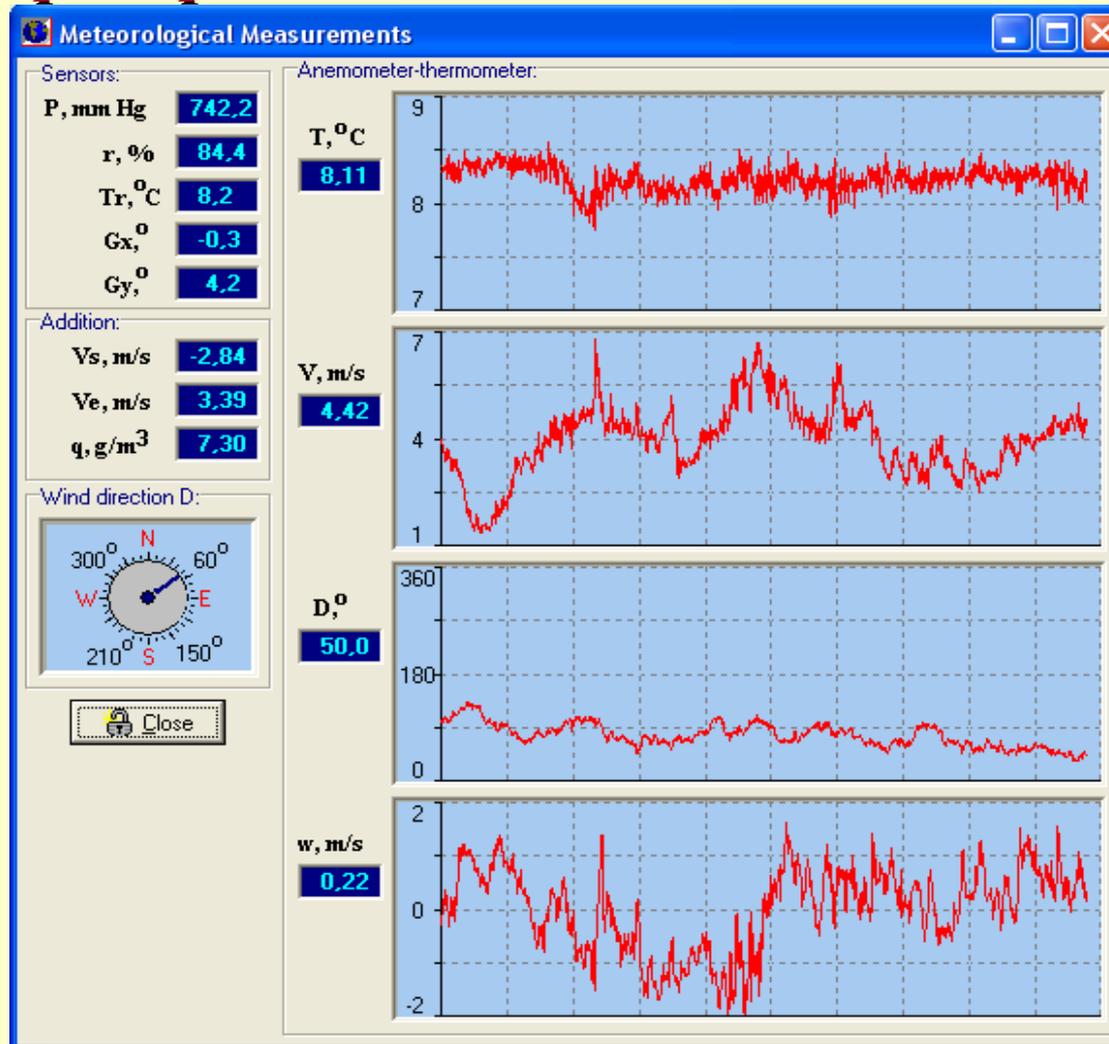


9. Примеры использования ПО “МЕТЕО 3.0”

Программа “МЕТЕО 3.0” позволяет вычислять следующие параметры турбулентности:

- $E_v = (\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2)/2$ - полная энергия турбулентных движений ($\sigma_u^2, \sigma_v^2, \sigma_w^2$ - дисперсии турбулентных пульсаций трех компонент скорости ветра u', v', w');
- $I_v = E_v/V_m^2$ - относительная интенсивность флуктуаций скорости ветра (V_m – модуль среднего вектора скорости ветра);
- $E_T = \sigma_T^2/2$ - энергия температурных флуктуаций (σ_T^2 - дисперсия турбулентных пульсаций температуры T);
- $\langle u' \cdot w' \rangle$ - момент потока импульса (касательного напряжения) ($\langle \rangle$ - символ статистического усреднения);
- $\langle T' \cdot w' \rangle$ - момент потока тепла (потока температуры);
- $\tau = -\rho \langle u' \cdot w' \rangle$ - вертикальный поток импульса (ρ - плотность воздуха);
- $H = C_p \rho \langle T' \cdot w' \rangle$ - вертикальный поток тепла (C_p - удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении);
- $v^* = (-\langle u' \cdot w' \rangle)^{1/2}$ - скорость трения (масштаб ветра);
- $T^* = -\langle T' \cdot w' \rangle / v^*$ - масштаб температуры;
- $L^* = \langle T \rangle (v^*)^2 / (\chi g T^*)$ - масштаб Монина-Обухова ($\chi = 0,4$ и $g = 9,81$ м/с²);
- $C_d = (v^* / \langle V \rangle)^2$ - коэффициент сопротивления потоку;
- $C_T^2 = \langle [T'(t+\Delta t) - T'(t)]^2 \rangle / (\langle V_m \rangle \Delta t)^{-2/3}$ - структурная постоянная температурных флуктуаций (Δt - временной интервал между измерениями мгновенных метеовеличин);
- $C_v^2 = \langle [u'(t+\Delta t) - u'(t)]^2 \rangle / (\langle V_m \rangle \Delta t)^{-2/3}$ - структурная постоянная ветровых флуктуаций;
- $C_{na}^2 = C_T^2 / (2\langle T_k \rangle)^2 + C_v^2 / (\langle c \rangle)^2$ - структурная постоянная флуктуаций акустического показателя преломления (T_k – температура воздуха в Кельвинах; c - скорость звука);
- $C_{no}^2 = C_T^2 \{ 8 \cdot 10^{-5} \langle P \rangle / \langle T_k \rangle^2 \}^2$ - структурная постоянная флуктуаций оптического показателя преломления (P - атмосферное давление в гПа).

9. Примеры использования ПО “МЕТЕО 3.0”



Окно отображения мгновенных значений метеорологических величин
(развертка сменяется через 30 секунд)



9. Примеры использования ПО “МЕТЕО DB”

The screenshot displays the main window of the 'METEO DB' software. The title bar reads 'Ultrasonic meteorological system: DATABASE'. The interface includes a menu bar (Table, Graphics, Help), a toolbar with various icons, and a main data table. On the left side, there are control panels for 'Data' (with date and time selection), 'View' (with radio buttons for different data views), and 'Information' (with a parameter dropdown and statistical values). The data table shows meteorological data for December 26, 2002, with columns for Date, Time, Wind direction, Temperature, Wind speed, Humidity, Pressure, Relative humidity, and other parameters.

Data	Time	<t>, min	T, deg.C	V, m/s	D, deg	P, mm Hg	r, %	q, g/m ³	e, mBar
26.12.02	08:10	19,24	-15,48	1,77	88,3	756,3	99,3	1,45	1,83
26.12.02	08:10	19,24	-15,56	1,77	88,2	756,3	99,0	1,44	1,81
26.12.02	07:49	19,14	-15,45	2,47	84,0	756,1	98,6	1,45	1,82
26.12.02	07:29	19,14	-13,18	3,20	67,2	756,4	100,0	1,77	2,22
26.12.02	07:10	19,14	-13,02	2,89	68,7	756,6	100,0	1,79	2,25
26.12.02	06:50	19,14	-13,01	2,98	67,7	756,8	100,0	1,79	2,25
26.12.02	06:30	19,14	-12,99	2,63	69,6	757,1	100,0	1,80	2,26
26.12.02	06:10	19,14	-13,08	2,98	68,7	757,3	100,0	1,78	2,24
26.12.02	05:50	19,13	-13,10	2,21	65,0	757,5	100,0	1,78	2,24
26.12.02	05:30	19,13	-13,71	1,97	60,4	757,7	100,0	1,69	2,13
26.12.02	05:10	19,13	-13,68	1,68	61,9	757,9	99,8	1,69	2,13
26.12.02	04:50	19,13	-13,47	1,59	67,0	758,2	100,0	1,73	2,17
26.12.02	04:29	19,13	-13,27	1,62	67,6	758,4	100,0	1,76	2,21
26.12.02	04:10	19,13	-13,07	1,78	67,5	758,6	100,0	1,78	2,24
26.12.02	03:50	19,12	-13,28	1,95	64,6	758,8	100,0	1,75	2,20
26.12.02	03:30	19,12	-13,07	1,86	62,2	758,9	100,0	1,78	2,24
26.12.02	03:10	19,12	-13,98	1,53	73,9	759,1	100,0	1,66	2,08
26.12.02	02:49	19,12	-14,38	1,47	75,1	759,3	100,0	1,60	2,02
26.12.02	02:30	19,12	-13,81	1,27	86,9	759,3	100,0	1,68	2,11
26.12.02	02:09	19,13	-13,16	1,57	101,1	759,4	100,0	1,77	2,23

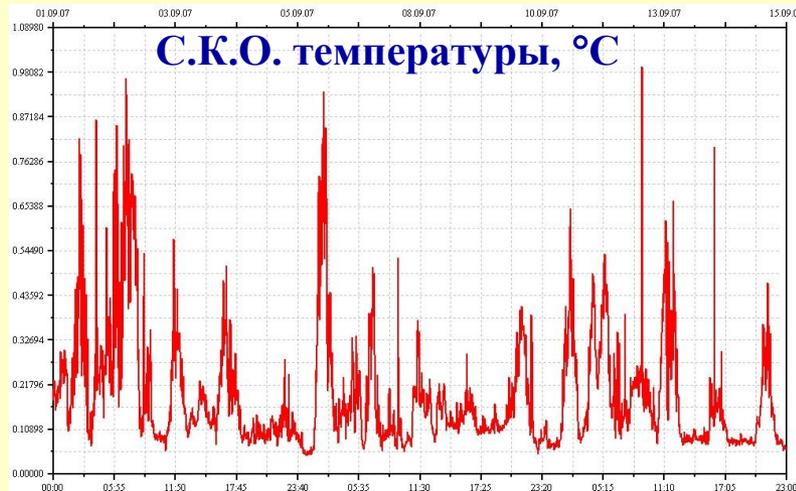
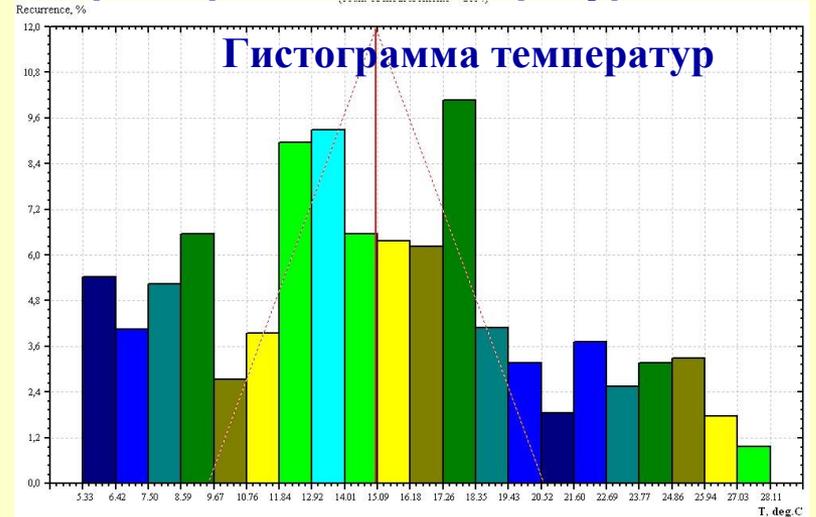
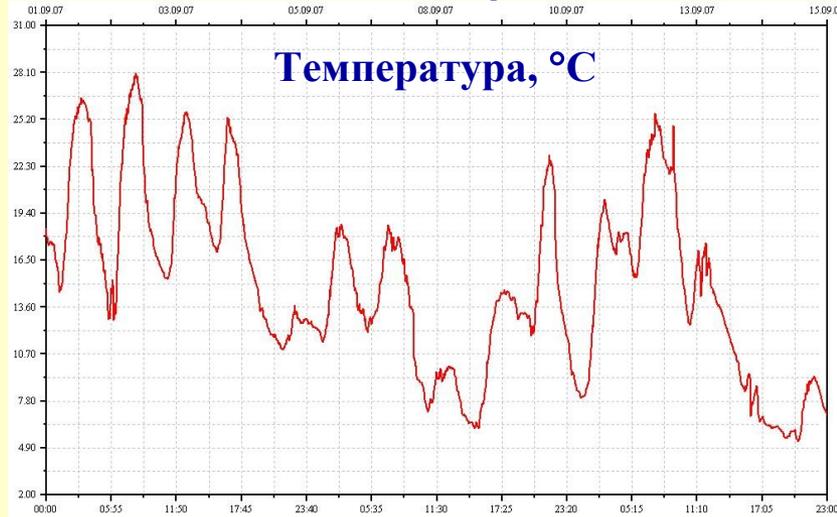
Главное окно программы “МЕТЕО DB”



9. Примеры использования ПО "МЕТЕО ДВ"

Построение графиков и гистограмм

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

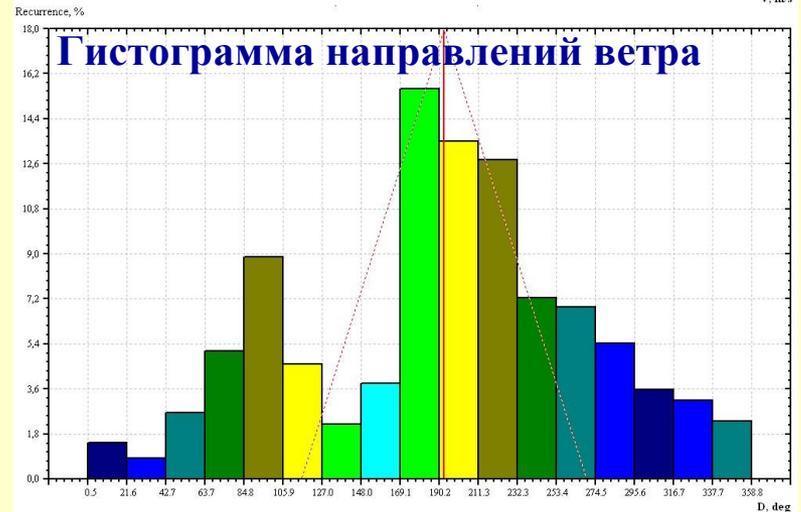
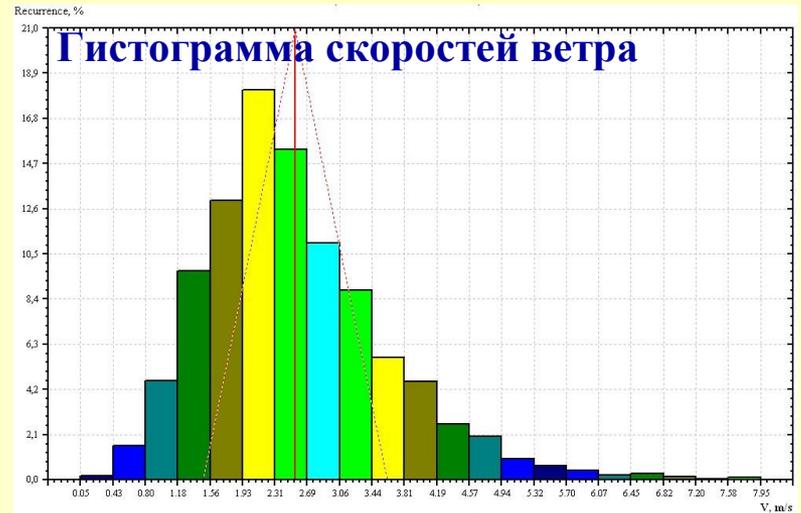
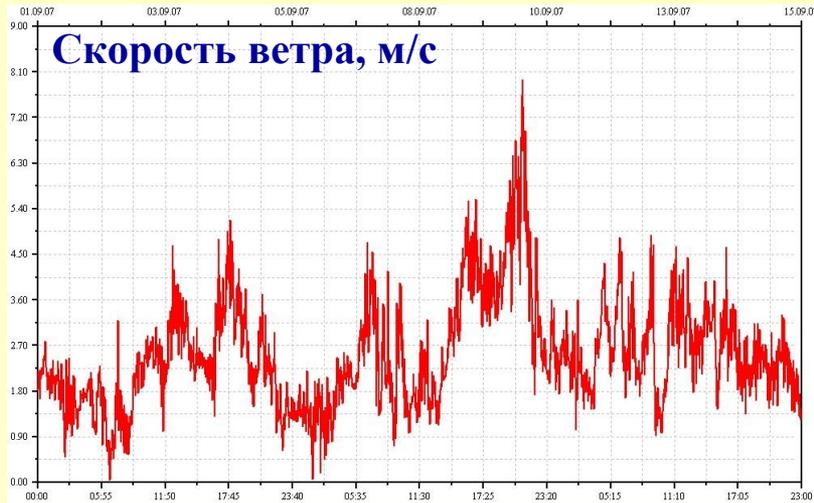




9. Примеры использования ПО "МЕТЕО ДВ"

Построение графиков и гистограмм

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





9. Примеры использования ПО “МЕТЕО ДВ”

Построение графиков

с 1 по 15 сентября 2007 г., г.Томск – давление и влажность



Атмосферное давление, мм.рт.ст.



Относительная влажность, %



Частичное давление водяного пара, гПа



Температура точки росы, °С



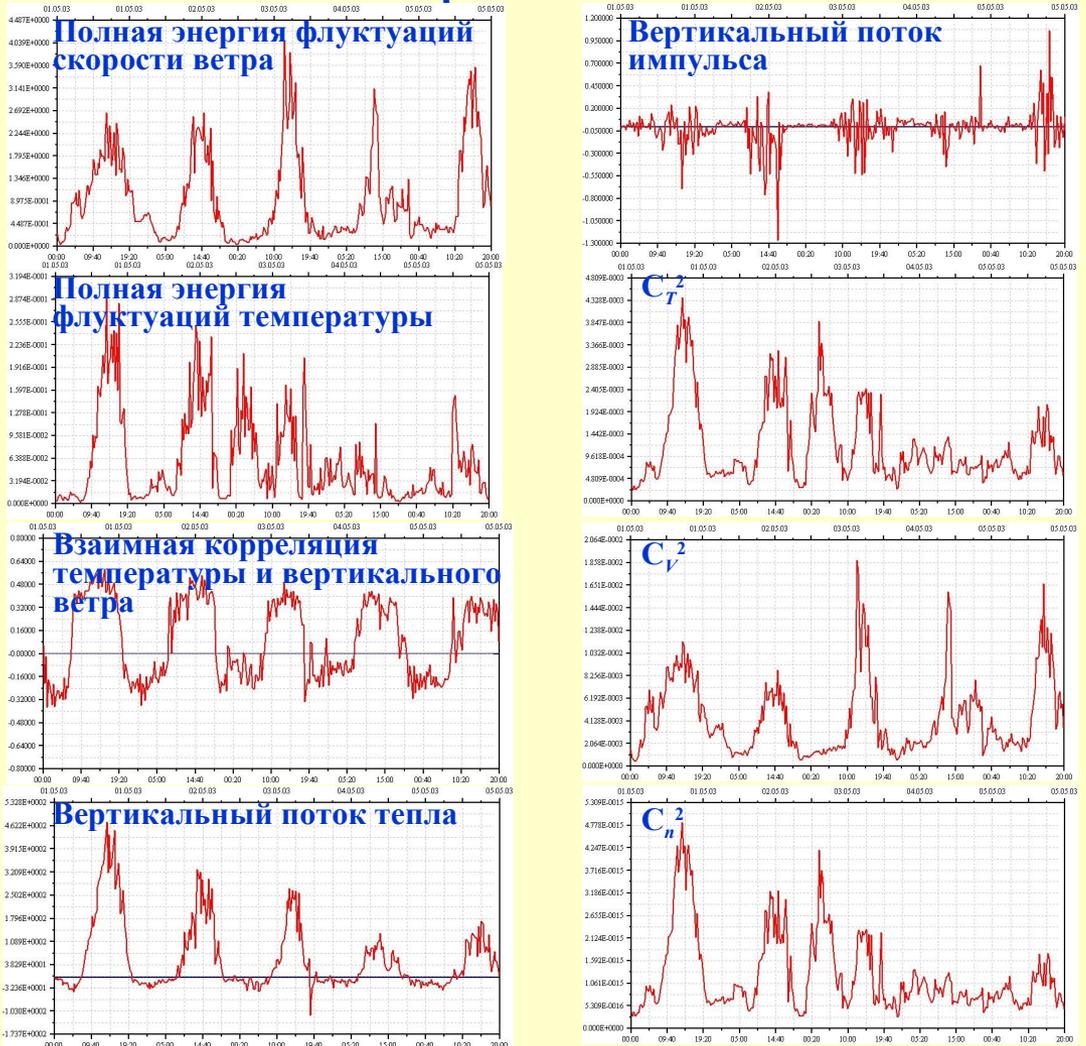
9. Примеры использования ПО "МЕТЕО ДВ"

Первые дни мая 2003 г

Средние значения

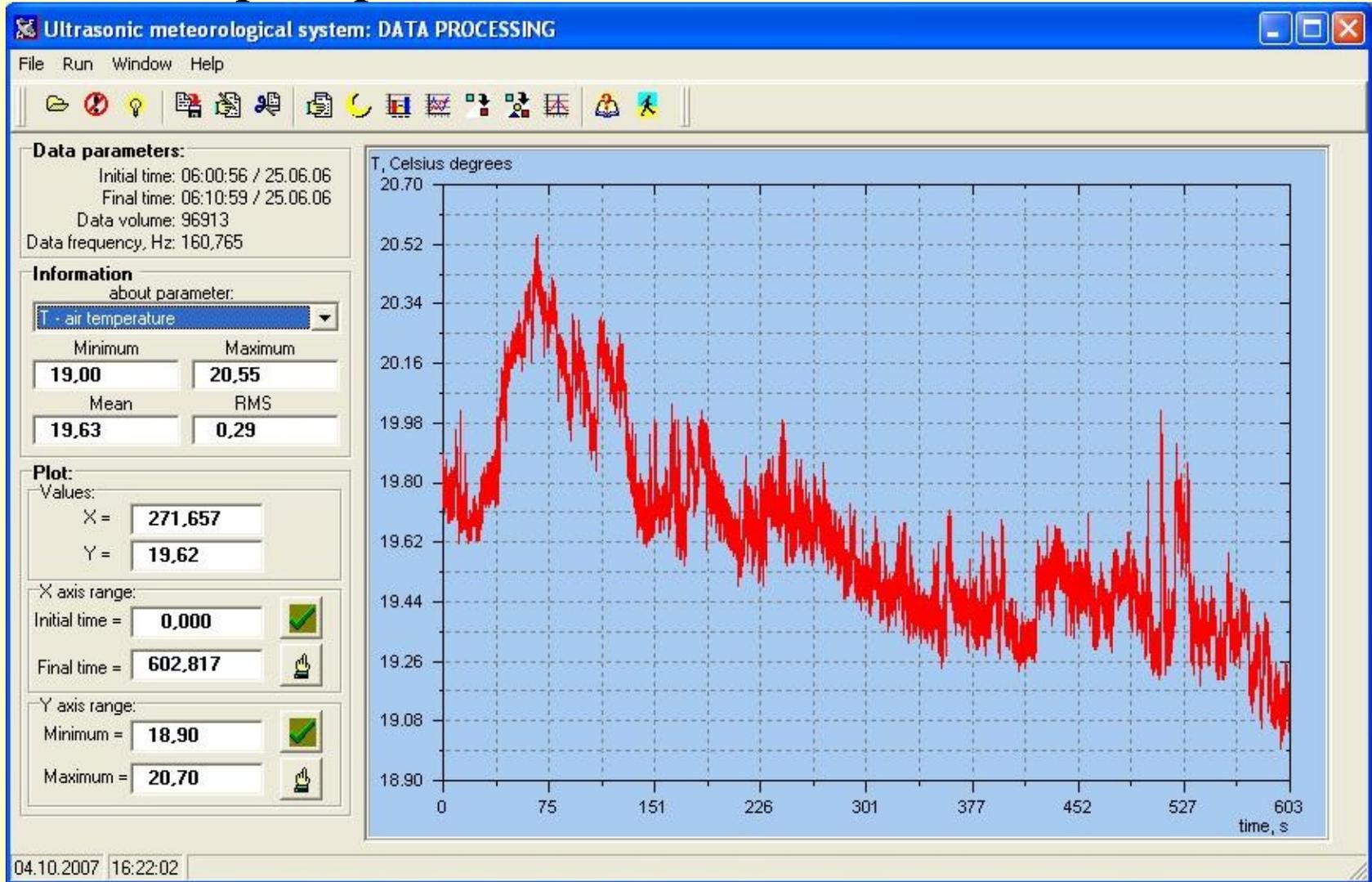


Вторые моменты





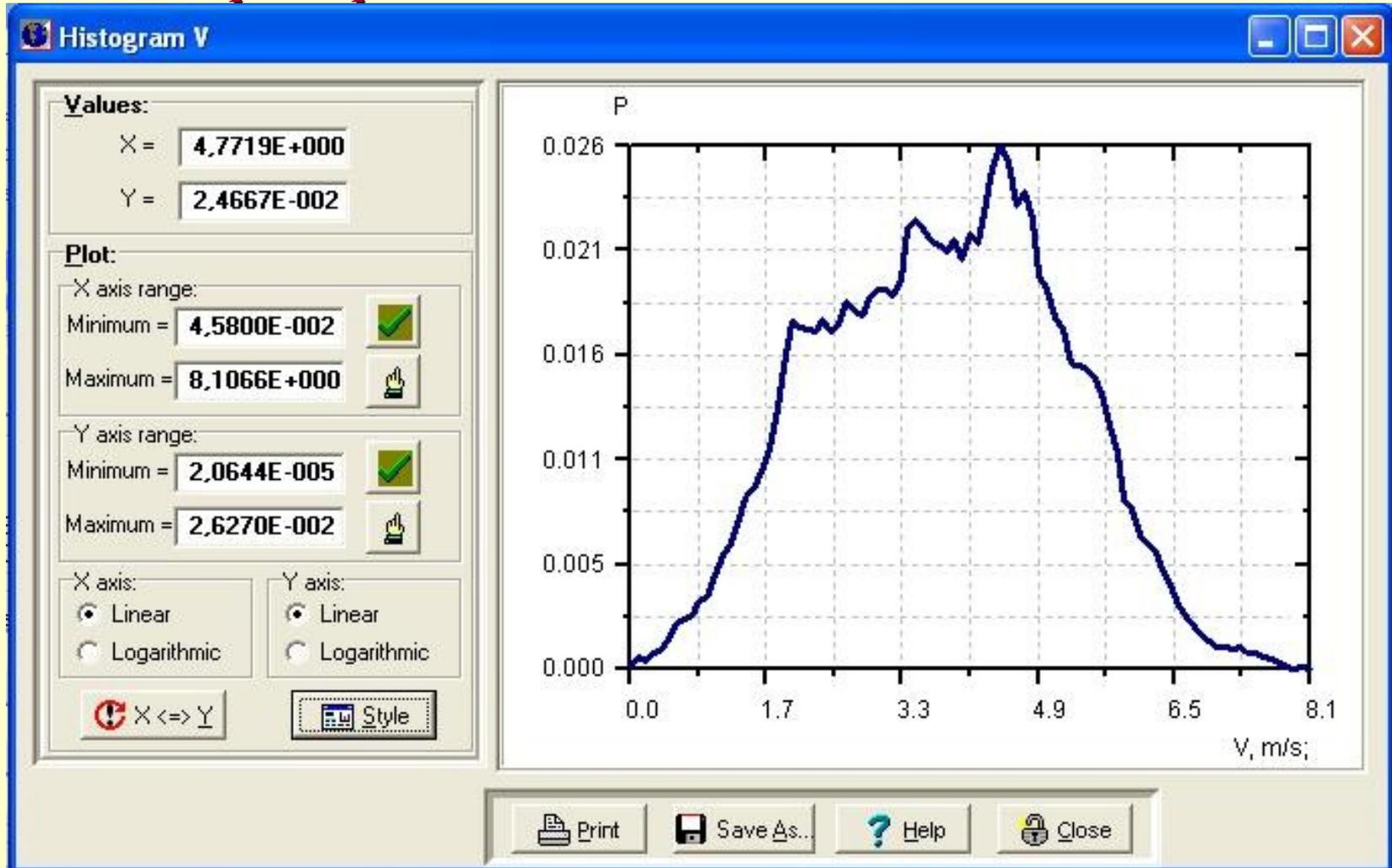
9. Примеры использования ПО "МЕТЕО ДР"



Главное окно программы после загрузки данных из файла



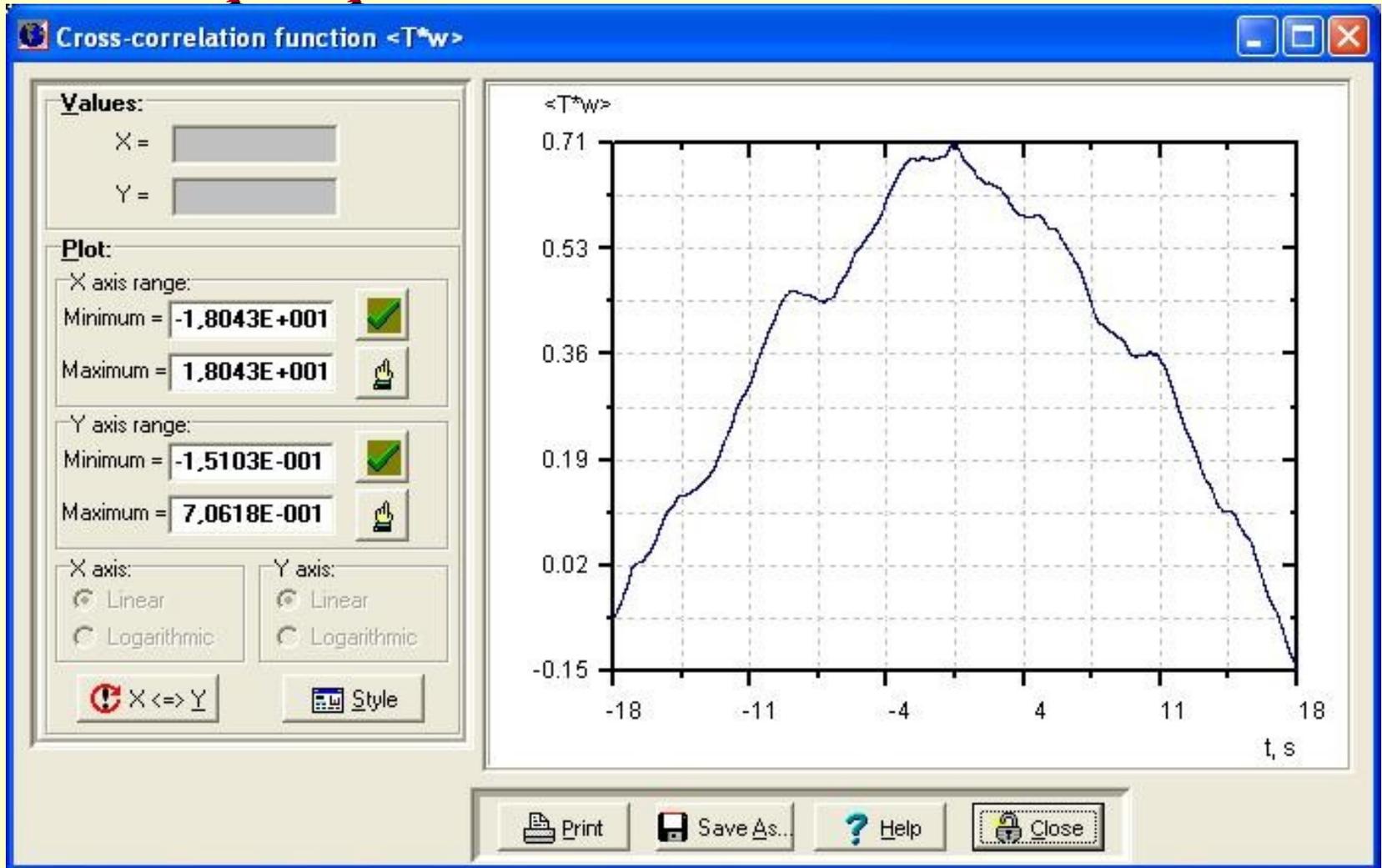
9. Примеры использования ПО “МЕТЕО ДР”



Вычисление и графическое отображение статистической гистограммы для турбулентных флуктуаций скорости горизонтального ветра



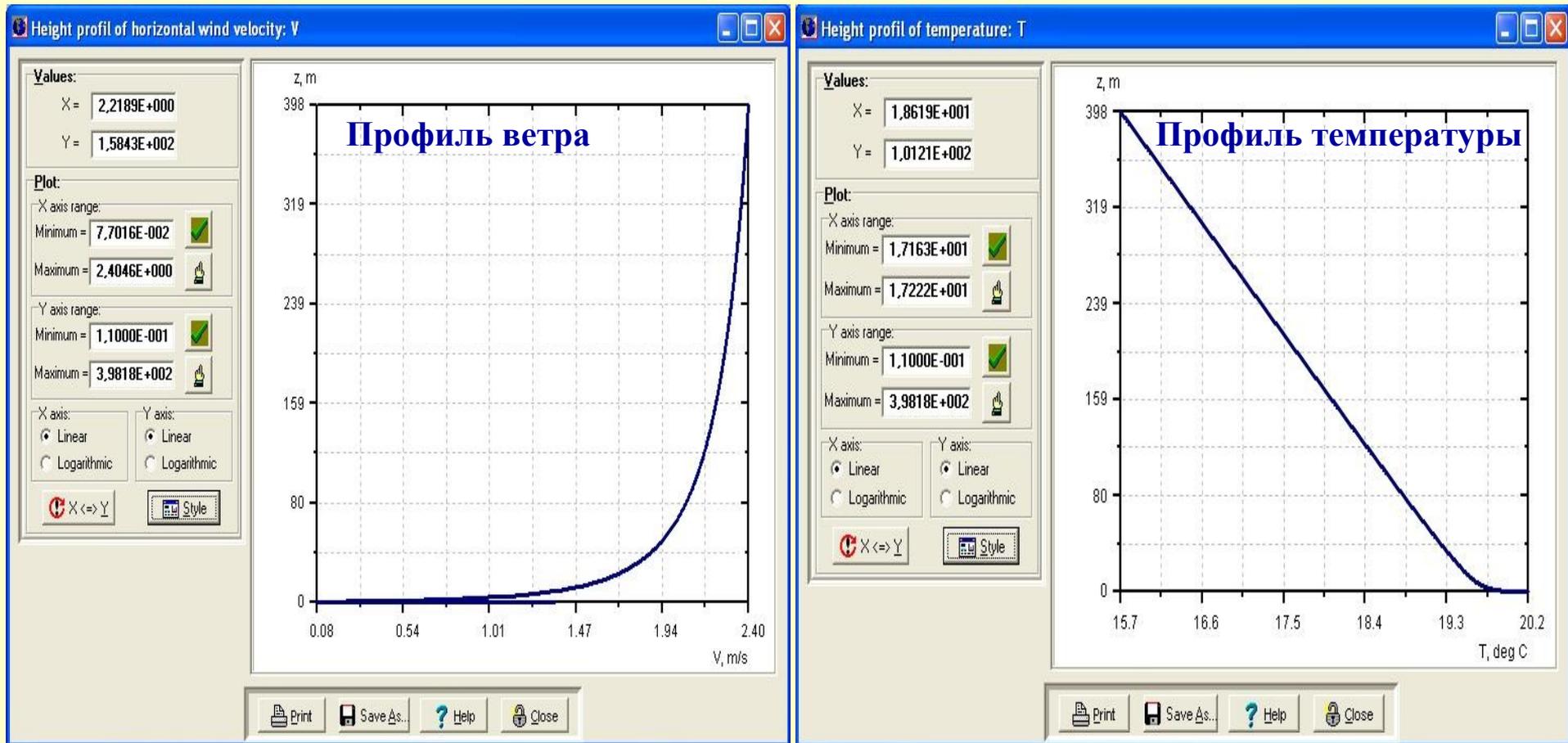
9. Примеры использования ПО "МЕТЕО ДР"



Вычисление и графическое отображение взаимной корреляционной функции для турбулентных флуктуаций температуры и скорости вертикального ветра



9. Примеры использования ПО "МЕТЕО DR"

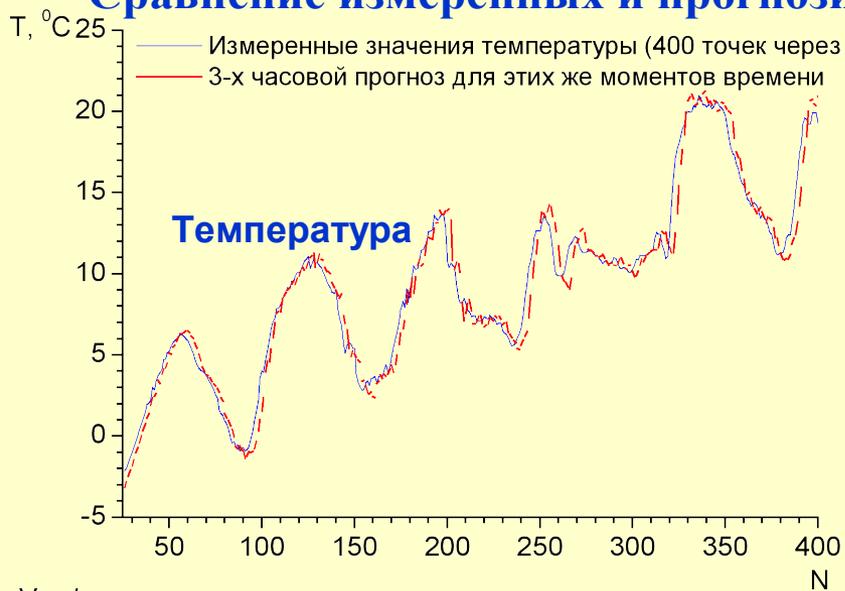


Модельное восстановление высотных профилей скорости ветра и температуры из данных АМК-03 в одной точке на основе универсальных функций подобия Монина-Обухова



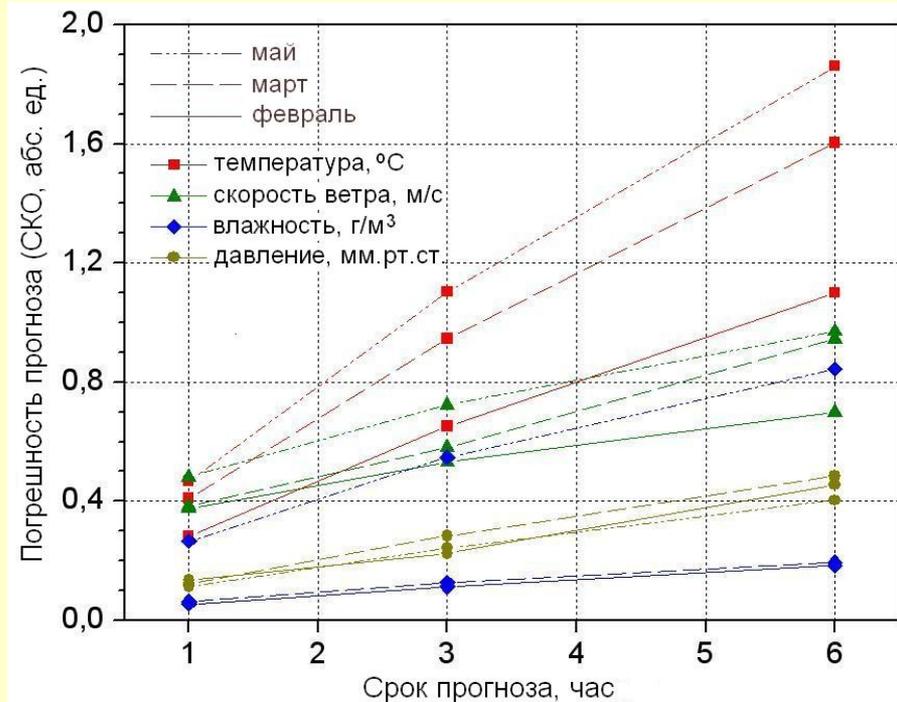
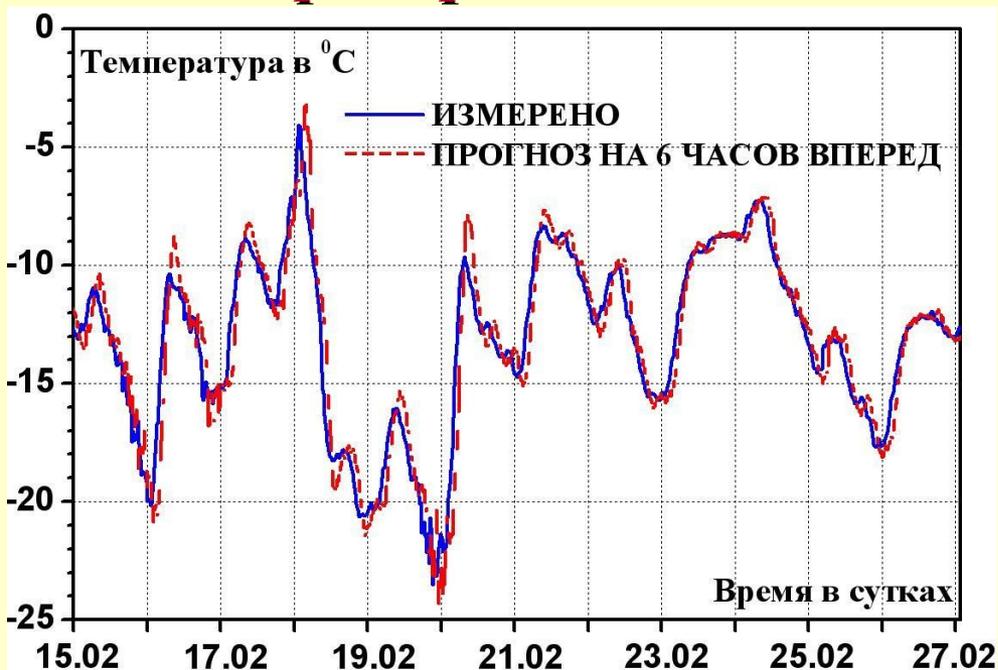
9. Примеры использования ПО “МЕТЕО ПРОГНОЗ”

Сравнение измеренных и прогнозируемых значений метеовеличин за 5,5 суток





9. Примеры использования ПО “МЕТЕО ПРОГНОЗ”



Разработан и апробирован метод локального сверхкраткосрочного (на срок до 6 часов вперед) прогноза значений основных метеорологических величин (температуры воздуха, атмосферного давления, абсолютной влажности воздуха, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра) из результатов регулярных измерений ультразвуковой метеостанции АМК-03 в предыдущие сроки. Метод основан на полиномиальной математической модели их временной эволюции и на применении алгоритмов Калмановской фильтрации к изменяющимся во времени коэффициентам этой модели.



10. Прототип региональной системы краткосрочного прогноза погоды



Схема размещения сети локальных УАМС АМК-03

Инструментальная основа системы:
-сеть локальных УАМС АМК-03;
-сервер для сбора информации с сети;
-система связи между УАМС и сервером.

Методическая основа системы:
-метод локального прогнозирования на основе Калмановской фильтрации на срок до 6 часов вперед;
-информационно-вычислительные веб-системы;
-современные мезомасштабные метеорологические модели WRF с высоким пространственным разрешением.



*Датчик
метеорологических
величин ДСВ-15*



*Датчик давления и
влажности ДДВ-12*



*Логгер БСИ-11 со
снятой крышкой*



Метеостанция БМК-2Б

Спасибо за внимание