

# Программный инструмент для исследования турбулентности приземного слоя атмосферы по измерениям с АМК-03

Иванов Егор Андреевич (eai17@tpu.ru), Ботыгин Игорь Александрович(bia@tpu.ru)

Представленный в настоящей работе программный комплекс разработан на высокоуровневом языке программирования Python, как 64-битовое Windows-приложение, которое может работать в любой из последних версий Windows, начиная с Windows 7. Ниже представлены основные функциональные модули комплекса.

- Динамическая загрузка метеоданных с сервера измерений АМК-03.
- Преобразование данных из байтового формата в числовой.
- Графическая визуализация и экспорт обрабатываемых данных.
- Вычисление и визуализация корреляционных коэффициентов Пирсона.
- Вычисление базовых параметров турбулентности приземного слоя атмосферы.
- Построение линейной регрессии для взаимосвязанных параметров.

Существует много теоретических соотношений для вычисления характеристик турбулентности атмосферы. В работе использовалась самая простая модель, базирующаяся на теории подобия Мони́на-Обухова. Ниже приведены формулам для вычисления параметров турбулентности приземного слоя:

1)  $E_v = (\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2)/2$  - полная энергия турбулентных движений (где  $\sigma_u^2$ ,  $\sigma_v^2$ ,  $\sigma_w^2$  - дисперсии турбулентных пульсаций трех компонент скорости ветра  $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$ ).

2)  $I_v = E_v/V_m^2$  - относительная интенсивность флуктуаций скорости ветра.

3)  $E_t = \sigma_t^2/2$  - энергия температурных флуктуаций, (где  $\sigma_t^2$  - дисперсия турбулентных пульсаций температуры  $T'$ ).

4)  $\langle u' * w' \rangle$ . - момент потока импульса.

5)  $\langle T' * w' \rangle$  - момент потока тепла.

6)  $\tau = -\rho \langle u' * w' \rangle$  - вертикальный поток импульса, где  $\rho$  - плотность воздуха.

7)  $H = c_p * \rho * \langle T' * w' \rangle$  - вертикальный поток тепла, где  $c_p$  - удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении.

8)  $v^* = \sqrt{-\langle u' * w' \rangle}$  - скорость трения (масштаб ветра).

9)  $T^* = -\langle T' * w' \rangle/v^*$  - масштаб температуры.

10)  $C_d = \left(\frac{v^*}{\langle V \rangle}\right)^2$  - коэффициент сопротивления потоку.

11)  $C_T^2 = \langle [T'(t + \Delta t) - T'(t)]^2 \rangle * (\langle V \rangle \Delta t)^{-2/3}$  - структурная постоянная температурных флуктуаций, где  $V$  – модуль среднего вектора скорости ветра,  $\Delta t$  – временной интервал между измерениями мгновенных метеорологических величин.

12)  $C_V^2 = \langle [u'(t + \Delta t) - u'(t)]^2 \rangle * (\langle V \rangle \Delta t)^{-2/3}$  - структурная постоянная ветровых флуктуаций.

13)  $C_{na}^2 = \frac{C_T^2}{4\langle T \rangle^2} + \frac{C_V^2}{\langle c \rangle^2}$  - структурная постоянная флуктуаций акустического показателя преломления, где  $T_k$  – температура воздуха в Кельвинах,  $c$  – скорость звука.

14)  $C_{no}^2 = \{8 * 10^{-5} * \langle P \rangle / \langle T \rangle^2\}^2 * C_T^2$  - структурная постоянная флуктуаций оптического показателя преломления, где  $P$  - атмосферное давление в гПа.

15)  $L^* = \langle T \rangle * (v^*)^2 / \chi * g * T^*$  - масштаб Монина-Обухова, где  $\chi = 0,4$  и  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

Для иллюстрации работы разработанного программного комплекса использовались измерения с ультразвукового термоанемометра АМК-03 (измерения 2020 г.), расположенного на полигоне ИМКЭС СО РАН. Интерфейс программного комплекса представлен на рис.1.

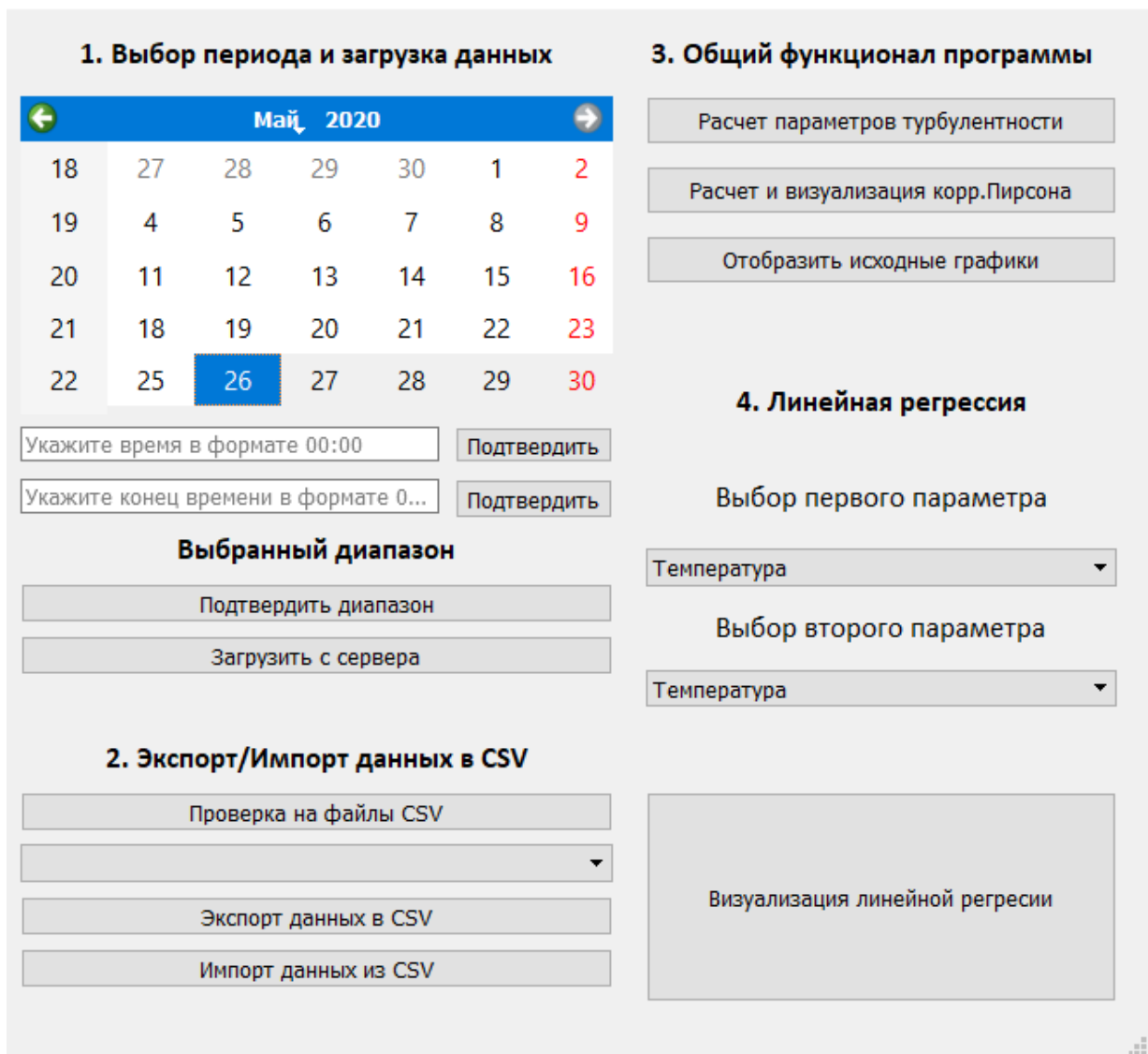


Рис.1. Главная оконная форма комплекса

Скриншот с вычисленными характеристиками приземного слоя атмосферы приведен на рисунке 2.

	Значение
Полная энергия турбулентных движений	6.13709
Относительная интенсивность флуктуаций скорости ветра	0.84857
Энергия температурных флуктуаций	13.21109
Момент потока импульса	-0.90233
Момент потока тепла	2.30121
Вертикальный поток импульса	1.10536
Вертикальный поток тепла	2.81899
Скорость трения (масштаб ветра)	0.94991
Масштаб температуры	-2.42255
Масштаб Монина-Обухова	1.10196

Рис.2. Расчетные характеристики турбулентности

Результаты вычисления некоторых характеристик турбулентности со сменой диапазона измерений приведено в таблице 1.

Таблица 1. Масштабирование измерений

Диапазон	17.01.20 12:00 – 18:00	18.01.20 12:00 – 18:00	19.01.20 12:00 – 18:00	20.01.20 12:00 – 18:00
Модуль ср. вектора скорости ветра	5.920945823664853	2.289455807416715	3.136076776271273 6	3.602202004075949
Полная энергия турбулентных движений	5.78376806703739	3.766140080065457	5.101588854017524	3.876954720585440 7
Пульсация ветра	-0.90093818673289 89	-1.72576604521378 66	1.954124195113059	-2.36964243443264 97
Момент потока импульса	-0.65144907673583 85	-0.13483904486732 912	-0.16417432379476 368	-0.10302935918183 469

Результаты вычисления некоторых характеристик турбулентности со сменой шага измерений приведено в таблице 2. Стартовая дата: 17.01.2020 г. на временном отрезке с 12:00 до 18:00. Интервалы дискретизации: 5 минут, 10 минут, 30 минут, 1 час.

Таблица 2. Дискретизация измерений

Диапазон	5 минут	10 минут	30 минут	1 час
Модуль ср. вектора скорости ветра	731.1468873485421	731.2181161664399	731.1425034317754	731.121511373517 7

Полная энергия турбулентных движений	0.856372154582760 4	0.802551584699446 9	0.746854915433404 3	0.69726012145749 13
Пульсация ветра	0.58906977	-0.77442623	-0.37090909	-0.32025641
Момент потока импульса	-0.24865694970254 51	-0.33248059661381 435	-0.33061074380165 134	-0.33913280736357 293

Предоставляется возможность выбора отображения полученных значений (рис. 3).

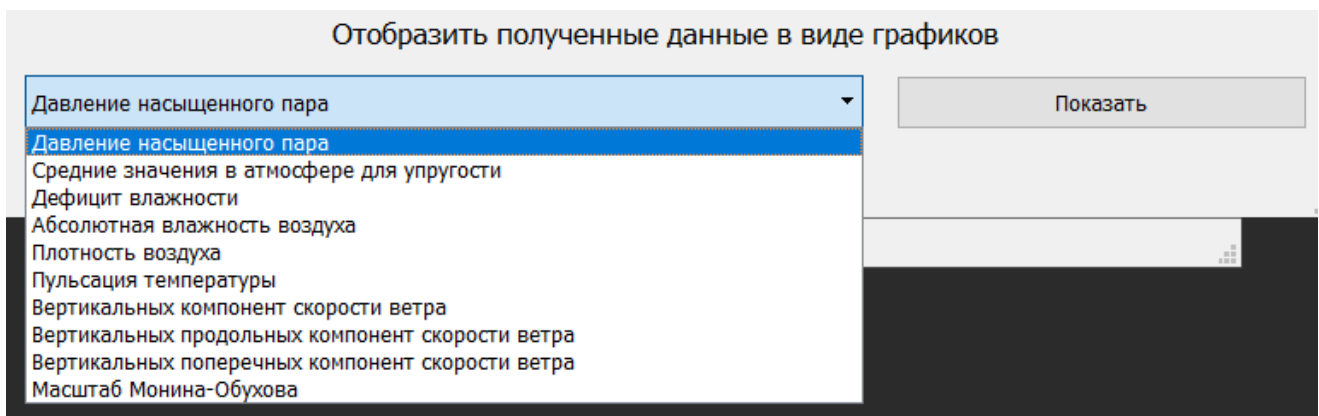


Рис. 3. Настройка визуализации полученных данных

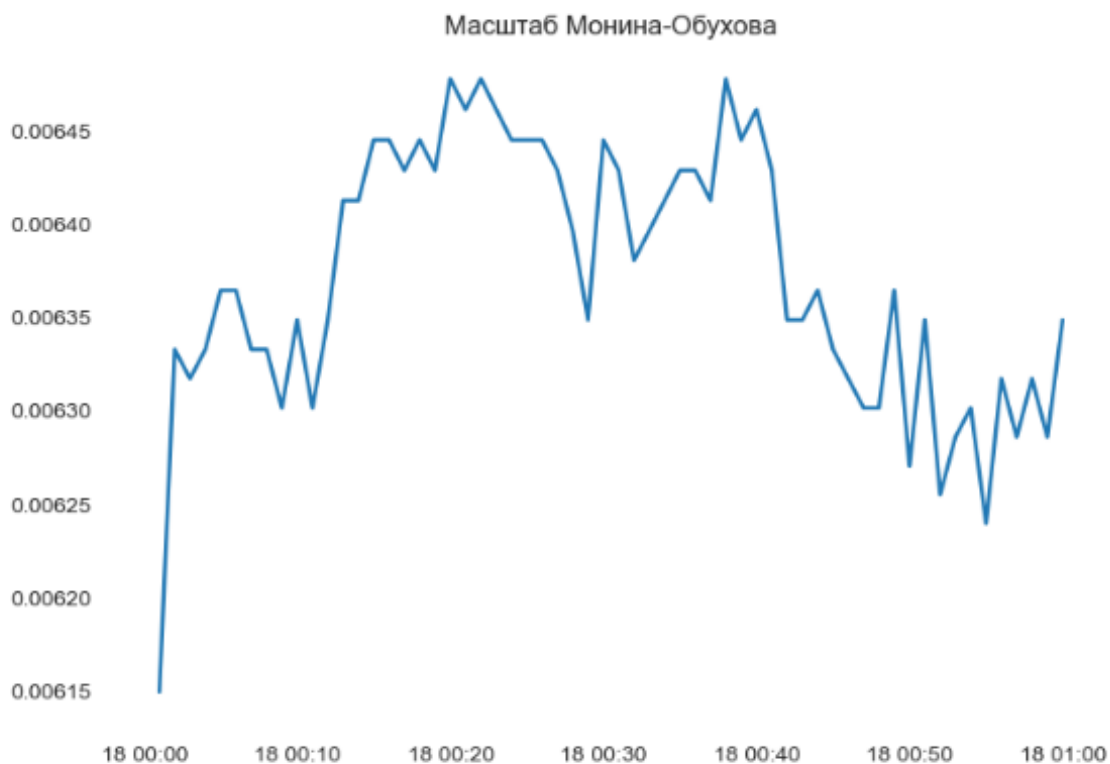


Рис. 4. Визуализация полученных значений за час.

Как сервис в программном комплексе реализована функция, позволяющая работать с ранее загруженными и обработанными данными. При запуске программы, открывается диалоговое окно, в котором необходимо установить требуемый временной интервал. Затем необходимо подтвердить установленный диапазон и загрузить данные. После сообщения об успешной загрузке данных предоставляется набор инструментов для их функциональной обработки. В противном случае необходимо вернуться к выставлению нового запроса данных.

### **Заключение**

Разработан инструментарий для экспериментальных исследований мелкомасштабной турбулентной структуры приземного слоя атмосферы. Программное обеспечение позволяет уточнить и детализировать атмосферные процессы, степень изменчивости, выявить признаки изменения погоды и предпосылки возникновения опасностей по данным, полученным с помощью ультразвукового термометра АМК-03.