



Объединенный Институт Ядерных Исследований

Измерения магнитной оптики в Бустере.  
Перспективы измерений в Коллайдере

*М. М. Шандов от лица коллектива*

Дубна, 2023

- 1 Введение
- 2 Методика эксперимента
- 3 Работа с ПО
  - Требования к ПО
  - Создание и отладка ПО
- 4 Измерение дифференциальных орбит
- 5 Анализ результатов
  - Полярность корректирующих магнитов
  - Матрица отклика орбиты (МОО)
  - Моделирование
  - Дисперсионная функция
  - Связь движений
  - Настройка проектной рабочей точки  $\nu_x/\nu_y = 4,80/4,85$
- 6 Выводы



**Цель:** измерение оптических функций и коррекция орбиты в инжекционном комплексе NICA в период ПНР №3 и 4

- Бустер
- Нуклотрон

**Задачи:**

- 1 Разработать методику эксперимента
- 2 Подготовить требуемое ПО
- 3 Отладка ПО и оборудования
- 4 Измерение дифференциальных орбит в горизонтальной и вертикальной плоскостях
- 5 Верификация математических моделей установки
- 6 Сравнение расчётных и экспериментальных данных



## Введём понятие дифференциальной орбиты

$$X_i^{diff} = X_i^{pert} - X_i^{init}, \quad (1)$$

где  $X^{pert}$  и  $X^{init}$  – возмущенная и невозмущенная орбиты, соответственно;  $i$  – номер цикла измерений.



## Введём понятие дифференциальной орбиты

$$X_i^{diff} = X_i^{pert} - X_i^{init}, \quad (1)$$

где  $X^{pert}$  и  $X^{init}$  – возмущенная и невозмущенная орбиты, соответственно;  $i$  – номер цикла измерений.

**Методика:**

- 1 измерить невозмущенную орбиту  $X_1^{init}$
- 2 создать возмущение
- 3 измерить возмущенную орбиту  $X_1^{pert}$
- 4 снять возмущение
- 5 измерить невозмущенную орбиту  $X_2^{init}$
- 6 создать возмущение противоположного знака
- 7 измерить возмущенную орбиту  $X_2^{pert}$
- 8 снять возмущение
- 9 проверка  $X_1^{diff} = -X_2^{diff}$



Автоматическая система управления (АСУ) Бустера реализована на базе системы *Tango-controls* в виде трёх уровней:

- ① уровень доступа к оборудованию
- ② сервисный уровень (сбор данных и первичная обработка)
- ③ клиентский уровень (предоставляет оператору средства для управления и диагностики)



Автоматическая система управления (АСУ) Бустера реализована на базе системы *Tango-controls* в виде трёх уровней:

- ① уровень доступа к оборудованию
- ② сервисный уровень (сбор данных и первичная обработка)
- ③ клиентский уровень (предоставляет оператору средства для управления и диагностики)

Необходимое ПО:

- показания мониторов положения пучка (МПП)
- управление корректирующими магнитами (корректорами)
- управление ускоряющей (ВЧ) системой
- интенсивность циркулирующего пучка (FCT, PCT)



Автоматическая система управления (АСУ) Бустера реализована на базе системы *Tango-controls* в виде трёх уровней:

- ① уровень доступа к оборудованию
- ② сервисный уровень (сбор данных и первичная обработка)
- ③ клиентский уровень (предоставляет оператору средства для управления и диагностики)

Необходимое ПО:

- показания мониторов положения пучка (МПП)
- управление корректирующими магнитами (корректорами)
- управление ускоряющей (ВЧ) системой
- интенсивность циркулирующего пучка (FCT, PCT)

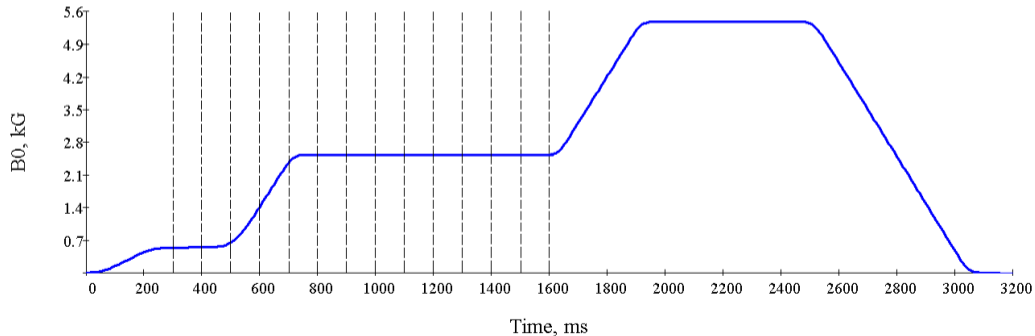
Требования к ПО:

- отображение текущего состояния устройства управления
- сохранение данных в файл





- Разработка *Tango*-устройства записи показаний 24 МПП в каждой из плоскостей
- запись данных каждые 100 мсек за время рабочего цикла
- устранение пульсаций источников питания (ИП) корректоров на малых токах
- работа с ПО управления ИП корректоров в ручном режиме
- разработка *Tango*-устройства автоматического управления ИП корректоров для реализации алгоритма снятия диф. орбит



Измерение дифференциальных орбит

## Главные цели:

- ПНР №3: апробация методики, подготовка и отладка ПО, оборудования и систем диагностики
- ПНР №4: отработка методики, проверка ПО, набор данных, измерения на Нуклотроне

*Возмущающая сила:* корректирующие дипольные магниты (ток питания обмоток  $\pm 0,7 \div 1$  А) или ускоряющая система

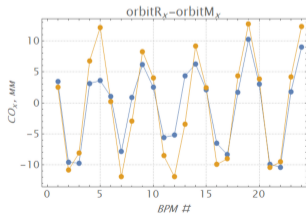


## Главные цели:

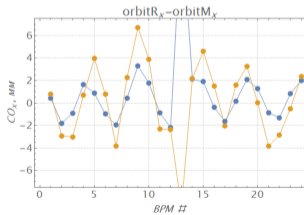
- ПНР №3: апробация методики, подготовка и отладка ПО, оборудования и систем диагностики
- ПНР №4: обработка методики, проверка ПО, набор данных, измерения на Нуклотроне

*Возмущающая сила:* корректирующие дипольные магниты (ток питания обмоток  $\pm 0,7 \div 1$  A) или ускоряющая система

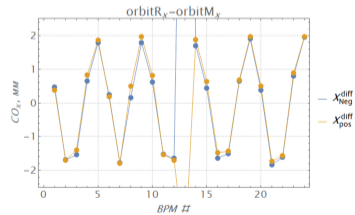
Корректор 2S1H. Рабочая точка:  $\nu_x/\nu_y = 4,88/5,39$



Шаг 1



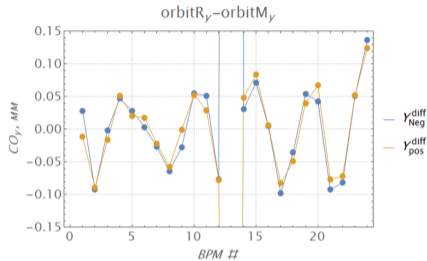
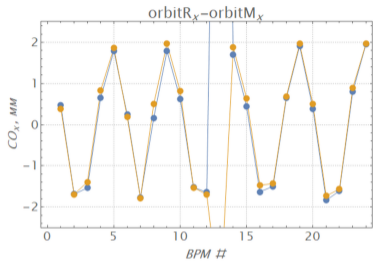
Шаг 3



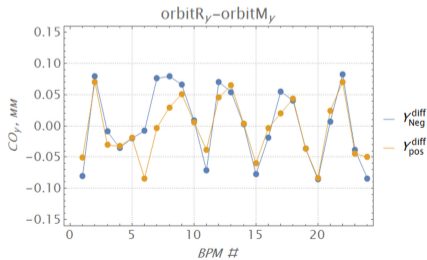
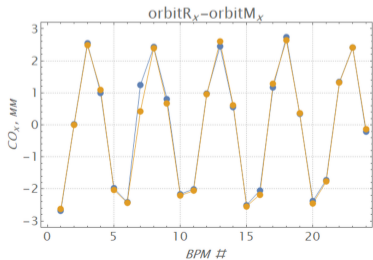
Шаг 5



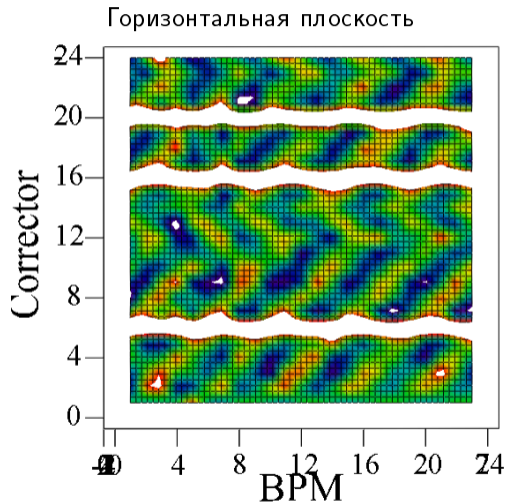
## 2S1H, шаг 5

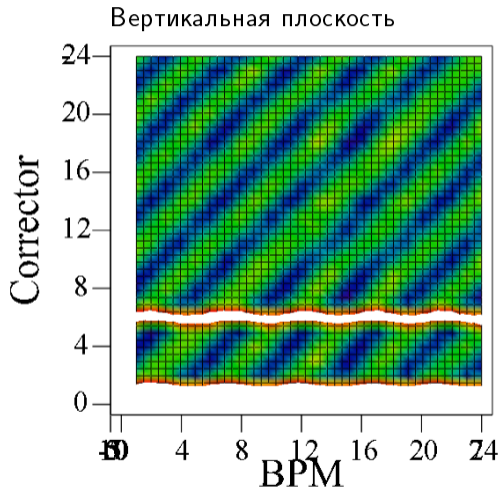
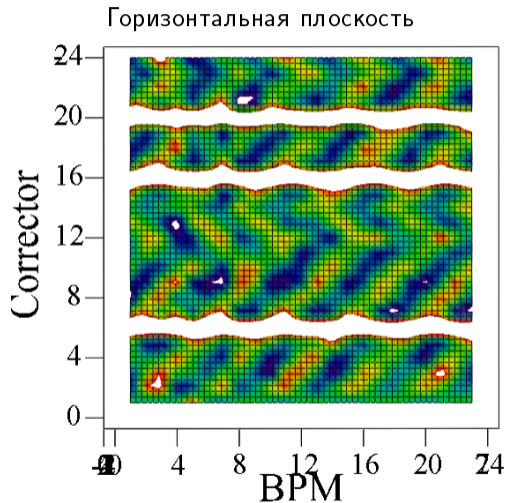


## 1S1V, шаг 5



# Анализ результатов







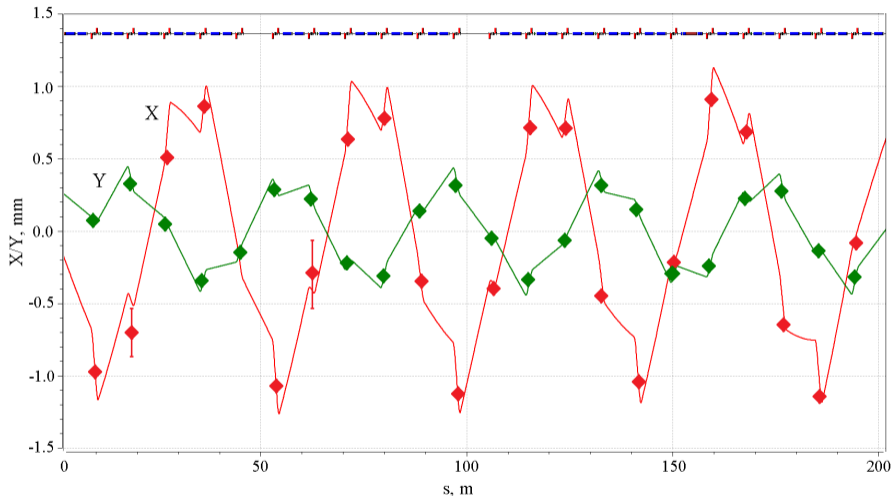
По определению:

$$\begin{pmatrix} R_{xx} & R_{xy} \\ R_{yx} & R_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_x \\ \theta_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \text{ или } \vec{z} = \mathbf{R}\vec{\Theta},$$

$$\text{где } R_{zz,ij} = \frac{Z_i^{diff}}{\theta_{z;j}}, R_{xy,ij} = \frac{X_i^{diff}}{\theta_{y;j}}, R_{yx,ij} = \frac{Y_i^{diff}}{\theta_{x;j}}$$

- Реализовано и апробировано ПО для автоматического измерения МОО
- Время измерений на Бустере составило  $\approx 30 \div 40$  мин

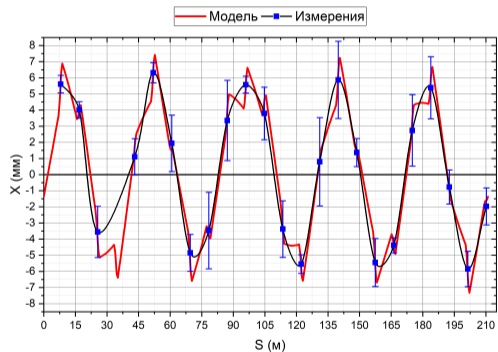




- согласованность с моделью с точностью  $< 1\%$
- $L_{eff}^{corr} = 0,25$  м согласуется с 3Д-моделированием

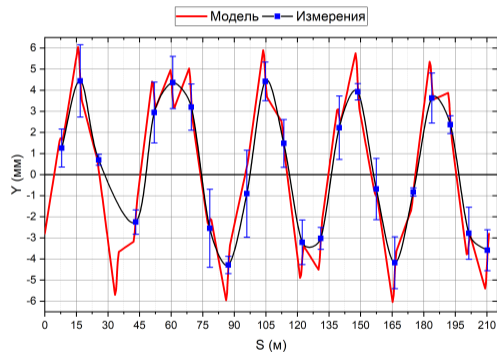


## 2S5H

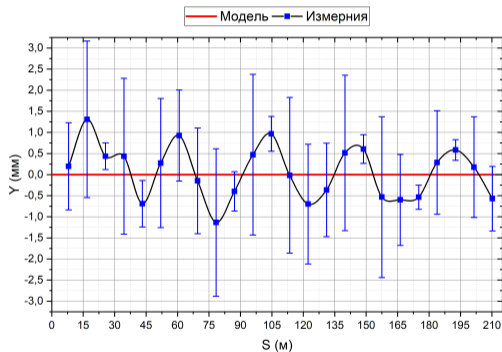


Рабочий ток 1 A

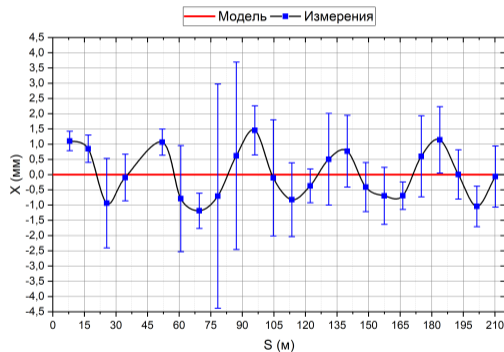
## 2S1V



## 2S5H



## 2S1V



Анализ результатов позволяет определить источники связи поперечных движений



В линейном приближении:

$$\Delta x(s) = D_x(s) \frac{\Delta p}{p}, \quad (2)$$

$$D_x(s) = -\eta \frac{\Delta x(s)}{\Delta f/f_0}, \quad (3)$$

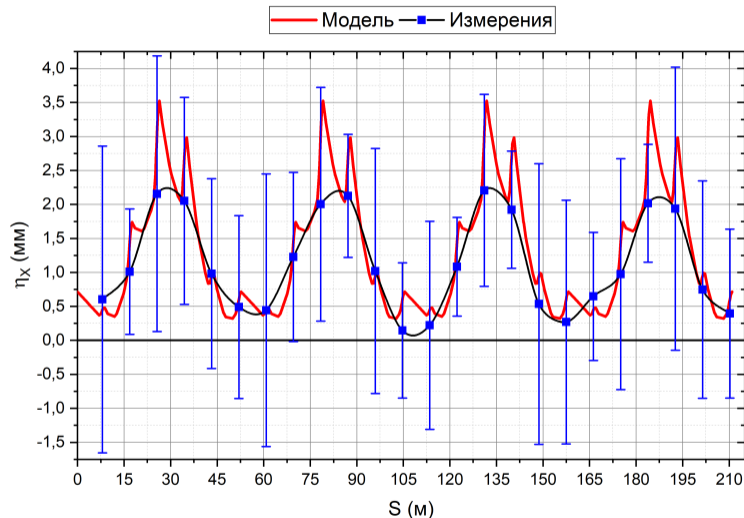
где  $\eta = \alpha - 1/\gamma^2$ ;  $\Delta f/f_0$  – изменение частоты обращения;  $\alpha$  – коэффициент расширения орбит.

**Пример:** для пучка ионов  $^{12}\text{C}^{4+}$

Изменение частоты при измерениях:  $580,25 \pm 1,58$  кГц с шагом 0,53 кГц.

Соответствует изменению энергии:  $3,144 \pm 0,018$  МэВ/нуклон с шагом 0,006 МэВ/нуклон





- согласованность с моделью в областях  $D_x > 1$  м с точностью  $< 1\%$ .  
Коррекция ЗО повышает точность измерений и сходимость с моделью

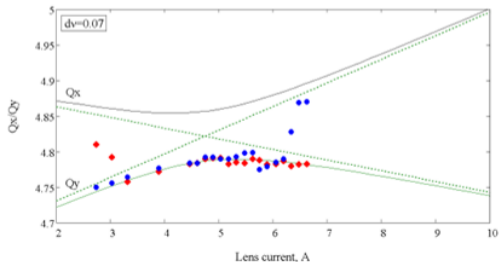
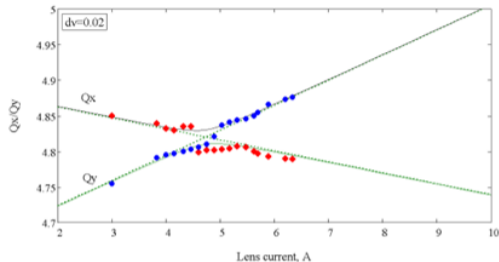


В линейном приближении:

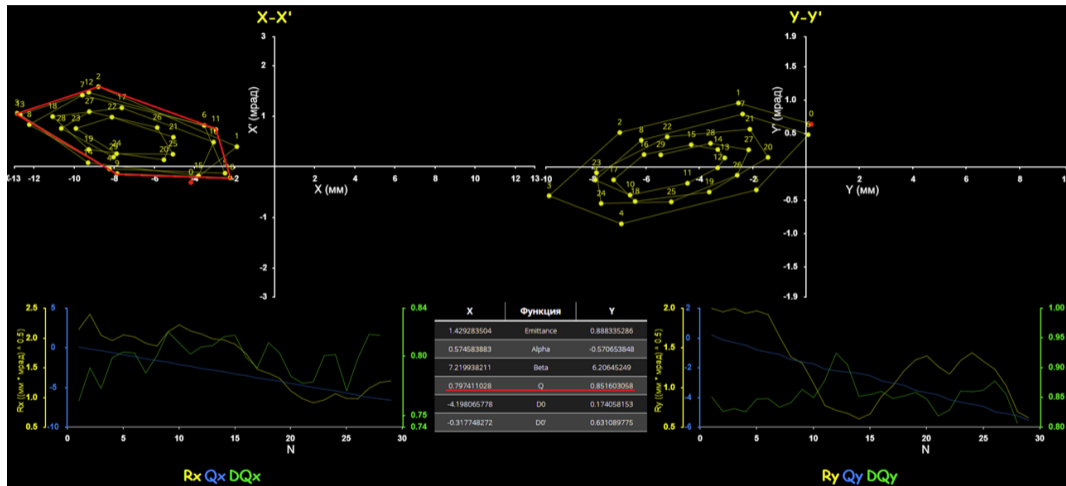
$$Q_{x,y} = \frac{1}{2} \left( Q_x + Q_y \pm \sqrt{\Delta^2 + |d\nu|^2} \right),$$

где  $\Delta = Q_x - Q_y$  – разность частот бетатронных колебаний в отсутствии связи движений;  $d\nu$  – параметр связи.

- оценка проводилась по фазовым профилям пучка
- соленоид СЭО выкл.  $d\nu = 0,02$
- соленоид СЭО 0,5 Гс  $d\nu = 0,07$ , теоретические оценки ( $d\nu = -0,02$ )
- диф. орбиты позволяют определить источники связи движений
- **необходим** Q-метр



# Настройка проектной рабочей точки $\nu_x/\nu_y = 4,80/4,85$



Настройка положения рабочей точки в ПНР №4 выполнена по модели

$$\nu_x/\nu_y \approx 5,17/5,20$$





Выводы

**Бустер Достижения:**

- ✓ Разработано и внедрено ПО для измерения дифференциальных орбит и МОО. Работает довольно стабильно
- ✓ Повторяемость показаний МПП в пределах  $\pm 0,2$  мм
- ✓ Tango-устройства адаптированы для работы с мониторингом ЗО на протяжении всего цикла ускорения и для коррекции ЗО во всех требуемых режимах
- ✓ Реализованы измерения дифференциальных орбит и МОО (время измерений составило  $\approx 30 \div 40$  мин)
- ✓ Проведена проверка полярности корректоров:
  - Ошибки в подключении (распайка/коммутация)
  - *Возможность и необходимость* аналогичных исследований на других установках ускорительного комплекса
- ✓ Получена МОО для дальнейших работ по коррекции орбиты
- ✓ Выполнено сравнение измеренных дифференциальных орбит с моделью:
  - Согласованность с точностью  $< 1\%$ ;
  - $L_{eff}^{corr} = 0,25$  м вместо 0,32 м согласно ТЗ



**Бустер Достижения:**

- ✓ Выполнены измерения и сравнения с расчетами всех режимов коррекции (включая работу корректоров электронного пучка СЭО), экспериментально показана возможность коррекции ЗО (доклад Николайчука И.Ю.)
- ✓ Измерена функция дисперсии. Согласованность с моделью при  $D_x > 1$  м с точностью  $< 1\%$
- ✓ Для оценки коэффициента связи движений **необходимо** дополнительное исследование с использованием Q-метра. Измеренные дифференциальные орбиты позволяют определить источники связи движений
- ✓ Показана возможность настройки рабочей точки используя разработанную модель:
  - Проектная рабочая точка  $\nu_x/\nu_y = 4,80/4,85$  в ПНР №3
  - Рабочая точка в ПНР №4  $\nu_x/\nu_y \approx 5,17/5,20$
  - *Невозможность настройки проектной рабочей точки при работе с пучками тяжелых ионов в текущей конфигурации системы электропитания*



### Бустер Проблемы:

- 1 Источники питания корректоров работают нестабильно. Нет возможности их использования в течение длительного времени
- 2 Корректор 1S6 отсутствует, 4S2 не работал на протяжении всего сеанса. Их отсутствие ограничивает возможности коррекции
- 3 Для коррекции орбиты на энергии инжекции до 1—2 мм необходима возможность работы с токами в корректорах 0,1—0,2 А



Имеющиеся достижения по настройке установки получены с использованием разработанного ПО и модели магнитооптической структуры, учитывающей результаты магнитных измерений, что в значительной мере сэкономило рабочее время. Для дальнейших работ по настройке проектных параметров инжекционного комплекса и Коллайдера NICA необходимо развитие имеющихся и построение аналогичных моделей для всех элементов



Имеющиеся достижения по настройке установки получены с использованием разработанного ПО и модели магнитооптической структуры, учитывающей результаты магнитных измерений, что в значительной мере сэкономило рабочее время. Для дальнейших работ по настройке проектных параметров инжекционного комплекса и Коллайдера NICA необходимо развитие имеющихся и построение аналогичных моделей для всех элементов

Для этого **требуется**:

- 1 закончить подготовку сводного протокла магнитных измерений элементов Бустера для всего диапазона рабочих токов (сейчас имеется данные только для магнитной жесткости 1,6 и 25,0 Тл·м)
- 2 дальнейшее развитие ПО для применения на всех элементах инжекционного комплекса
- 3 подготовить сводный протокол магнитных измерений элементов Коллайдера для всего диапазона рабочих энергий (сейчас имеется данные только для 1,0, 3,0 и 4,5 ГэВ/нуклон ионов  $^{197}\text{Au}^{31+}$ )
- 4 создание модели магнитооптической структуры Коллайдера, учитывающей результаты магнитных измерений
- 5 разработка аналогичного ПО для Коллайдера



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !!!

