

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ» (НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)

Факультет **ФИЗИЧЕСКИЙ**

Кафедра \_\_\_\_\_

Направление подготовки **03.03.02 ФИЗИКА**

Образовательная программа: **БАКАЛАВРИАТ**

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

Шишкина Егора

(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы Диагностика для измерения турбулентных полей в плазме во время протекания РЭП на установке ГОЛ-3Т

**«К защите допущена»**

Заведующий кафедрой

д-р физ.-мат. наук,

Профессор, ИЯФ СО РАН

Иванов А. А./.....  
(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....2019г.

**Научный руководитель**

к. ф.-м.н., доцент

с.н.с лаб. № 10, ИЯФ СО РАН

Иванов И. А /.....  
(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....2019г.

Дата защиты: «.....».....2019г.

Новосибирск, 2019

## Оглавление

1. Введение.....	3
2. Теоретическая часть.....	4
2.1 Уширение спектральной линии эффектом Штарка .....	4
3. Экспериментальная часть.....	8
3.1 Описание установки .....	8
3.2 Калибровка спектральной системы.....	10
3.2.1 Равномерная освещенность .....	12
3.2.2 Линейность по напряжению .....	16
3.2.3 Шумы ФЭУ .....	17
3.3 Временное разрешение.....	19
4. Заключение .....	19
5. Приложение .....	21

## 1. Введение

С целью изучения вопросов, связанных с генерацией терагерцового излучения из плазмы в ИЯФ СО РАН, была создана установка ГОЛ-3Т. На ней плазма, помещенная в магнитное поле, нагревается по двухступенчатой схеме: в камеру напускается водород плотностью  $\sim 10^{15}$  см<sup>3</sup>. Затем включается магнитное поле (40 кГс в середине и до 80 кГс на торцах), и зажигается разряд, образующий плазменный шнур с плотностью ионов до  $5 \cdot 10^{14}$  см<sup>3</sup> и температурой 1 - 5 эВ. После этого с одного торца шнура в плазму инжектируется пучок электронов, разогнанный до околосветовых скоростей (сокращенно РЭП - релятивистский электронный пучок) ускорителем У-2, с энергией до 1 МеВ, который за счет коллективных явлений, происходящих в плазме, нагревает ее до высоких температур порядка 1,5 кеВ.

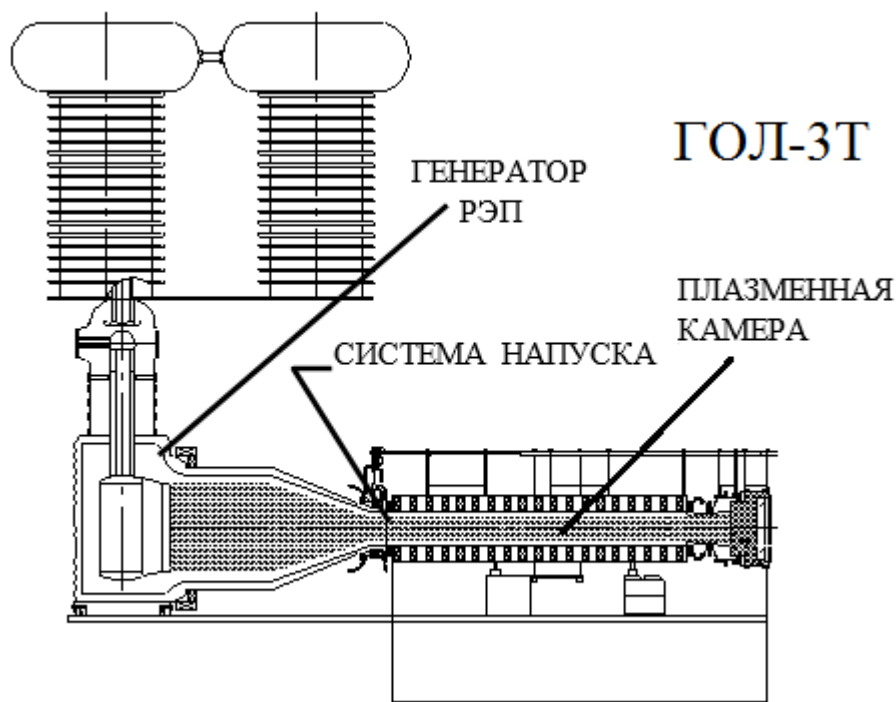


Рис. 1. Установка ГОЛ-3Т.

Нагретая плазма начинает излучать линейчатое излучение, и, используя это излучение, можно определять параметры плазмы. Основной задачей

данной работы является измерение средней амплитуды напряженности электрического поля в плазменной турбулентности с максимально возможным пространственным и временным разрешением методом спектроскопии линии  $H_\alpha$ . Можно было бы проводить измерения с помощью спектроскопии линии  $H_\beta$  или, например,  $H_\gamma$ . Но линия  $H_\alpha$  является наиболее яркой в спектральной серии по результату реальных измерений в эксперименте на установке ГОЛ-3Т. По этой причине и был сделан выбор в пользу данной спектральной линии.

## 2. Теоретическая часть

### 2.1 Уширение спектральной линии эффектом Штарка

Уровни энергии атома водорода, помещенного во внешнее постоянное и однородное электрическое поле  $E$ , подвержены линейному эффекту Штарка и расщепляются пропорционально приложенному полю. Соответственно спектральные линии расщепляются на ряд Штарковских компонент, расположенных симметрично относительно положения нерасщепленной линии. Если обозначить номер компоненты как  $s$ , то для линии  $H_\alpha$  индекс  $s$  пробегает целые значения в интервале  $-7 \leq s \leq 7$ . Смещение  $s$ -ой компоненты по частоте относительно центра линии дается выражением  $\Delta\omega = E \cdot s \cdot g$ , где  $g = 3 \cdot e \cdot a_0 / 2 \cdot \hbar$  – постоянная эффекта Штарка,  $a_0$  – Боровский радиус,  $s = -7, -6, \dots, 6, 7$  – номера Штарковских компонент линии  $H_\alpha$ . Количество Штарковских компонент обусловлено числом разрешенных переходов. Спектральная линия  $H_\alpha$  серии Бальмера – это переход в атоме водорода с главным квантовым числом  $n'=3$  на  $n=2$ . При этом орбитальное квантовое число при данном  $n$  меняется от 0 до  $n-1$ , а магнитное квантовое число пробегает значения от  $-\ell$  до  $\ell$  через единицу. Правила отбора для орбитального и магнитного квантового числа гласят, что их изменения должны быть следующие:  $\Delta\ell = \pm 1$ ,  $\Delta m = 0, \pm 1$ . По поляризации излучения штарковские компоненты делятся на  $\pi$

и  $\sigma$  компоненты. Излучение  $\pi$  компоненты обусловлено переходами без изменения магнитного квантового числа ( $m'=m$ ). Поэтому оно поляризовано линейно, причем таким образом, что электрический вектор электромагнитной волны колеблется вдоль проекции внешнего электрического поля  $E$ . Излучение  $\sigma$  компонент обусловлено переходами с изменением магнитного квантового числа на единицу. Соответственно излучаемые фотоны поляризованы по кругу. В соответствии с вышесказанным получаем следующие компоненты.

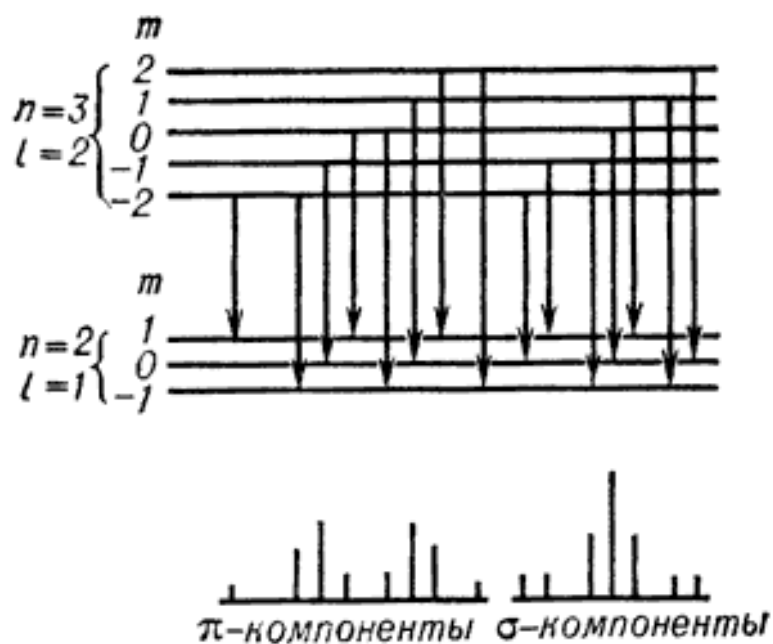


Рис. 2. Штарковские компоненты линии  $H_{\alpha}$ .

Относительные интенсивности каждой компоненты приведены в таблице ниже [4]:

$S_{\pi}$	$I_{S_{\pi}}$	$S_{\sigma}$	$I_{S_{\sigma}}$
$\pm 2$	0,04	0	0,52
$\pm 3$	0,14	$\pm 1$	0,17
$\pm 4$	0,16	$\pm 5$	0,0017
$\pm 7$	0,0001	$\pm 6$	0,0019

Таблица 1. Относительные интенсивности компонент линии  $H_{\alpha}$ .

Суммарная интенсивность всех компонент равна единице. Таким образом в расчетах теоретического профиля мы можем не учитывать компоненты с номерами  $S=5, 6, 7$ , так как они на порядок и более меньше остальных компонент и соответственно их вклад пренебрежимо мал.

По профилю спектральной линии обычно оценивают температуру и плотность плазмы. В нашем случае мы будем оценивать амплитуду модуля напряженности турбулентных электрических полей. Расчет профиля дается выражением:

$$I(\Delta\lambda) = \int I(\Delta\lambda, E) \cdot W(E) dE,$$

где  $W(E)$ - функция распределения Гаусса, нормирована условием  $\int W(E) dE=1$ ,  $I(\Delta\lambda, E)$  – ряд штарковских компонент, отдельные составляющие которого на самом деле является не  $\delta$ -функциями, а некоторыми функциями конечной ширины в силу следующих причин:

1. Естественное уширение линий.
2. Тепловое движение атома, приводящее к доплеровскому уширению, доплеровское уширение в случае максвелловского распределения частиц плазмы по скоростям имеет вид:

$$I(\delta\omega) = \sqrt{\pi\delta\omega_0} \cdot \exp\left(-\frac{(\delta\omega)^2}{(\delta\omega_0^2)}\right),$$

где  $\delta\omega_0 = \frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\frac{2RT_i}{\mu_i}}$  зависит от температуры атомов.

На практике удобно использовать формулу:

$$\Delta\lambda_{1/2}[\text{Å}] = 0,5 \cdot \sqrt{T[\text{ЭВ}]}.$$

В нашем случае для расчета теоретического профиля отдельные «пики», составляющие ряд штарковских компонент, моделировались профилем, взятым из эксперимента. А именно были использованы гауссовы распределения, с шириной на полувысоте такой же, как и у экспериментального профиля, полученного без инъекции РЭП. Так как предполагаем, что уширение за счет штарковского расщепления линии в турбулентных полях плазмы значительно больше всех остальных эффектов.

В экспериментах по взаимодействию РЭП с плазмой, проводившихся на установке ГОЛ-3Т, электронный пучок с энергией до 1 МэВ инжектируется в предварительную плазму, ( $n_e=10^{15}$  см<sup>-3</sup>,  $T_e=1$  эВ), нагревая плазменные электроны за счет коллективных явлений до температуры  $\sim 1$  КэВ. Таким образом, экспериментальные условия позволяют использовать линии бальмеровской серии водорода для исследования электрических полей ленгмюровской турбулентности. Теоретическая часть заключается в восстановлении этих электрических полей по зарегистрированной форме профиля спектральной линии.

## 2.2 Расчет теоретического контура

Расчет профиля линии проводился с помощью программы Wolfram Mathematica 11.1. Результаты расчета приведены на рис. 3.

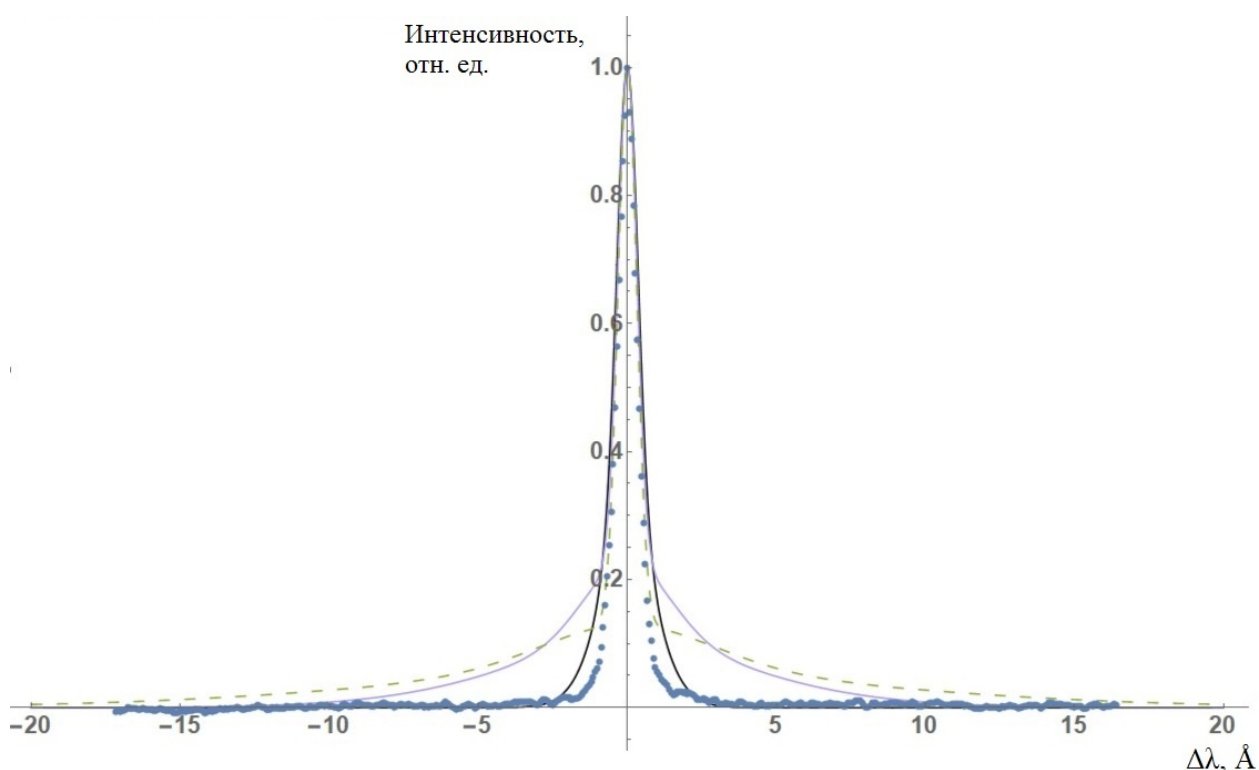


Рис. 3. Профиль спектральной линии  $H_\alpha$ . Точками показан профиль из эксперимента без инжекции РЭП. С целью избавления от темновых шумов «крылья» экспериментального профиля были усреднены и смещены в «0» на величину усреднения. Гладкими кривыми – профили,

вычисленные в предположении, что контуры линии формируются в результате расщепления штарковских компонент линии  $H_\alpha$  в электрическом поле, распределенным по Гауссу. Черным цветом с  $\langle E \rangle = 10$  кВ/см, серым цветом с  $\langle E \rangle = 50$  кВ/см и пунктиром с  $\langle E \rangle = 100$  кВ/см. Два вышеперечисленных профиля имеют выделенный центральный пик, обусловленный несмещенной компонентой и «крылья», сформированные в результате расщепления остальных компонент в электрическом поле.

Таким образом, сопоставляя рассчитанные профили с профилями из эксперимента, мы можем оценивать турбулентные электрические поля в плазме.

### **3. Экспериментальная часть**

#### **3.1 Описание установки**

Для измерения профиля спектральной линии служит система, основанная на спектрометре ДФС-24.



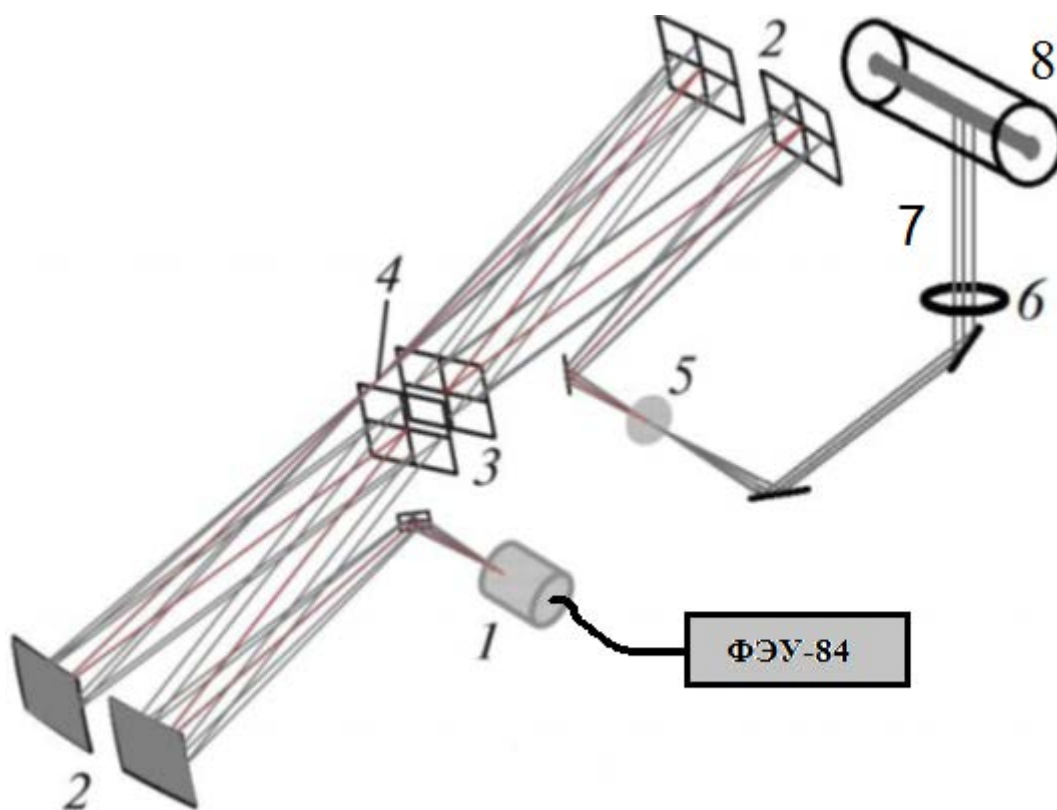


Рис. 4. Оптическая схема, основанная на ДФС-24: 8 - плазменный столб, 7 - распространение света, 6 - объектив + поляризационный фильтр, между 6-5 – поворотные зеркала, 5 – входная щель с фокусирующей линзой, 4 - промежуточная щель (в этом месте расположена калибровочная система), 3 – дифракционная решетка, 2 - параболические зеркала, 1 – многоканальный коллектор световодов.

Излучение из плазмы (7) фокусируется на входную щель монохроматора объективом (6), на одном из торцов которого расположен поляризационный фильтр. Так как плазма удерживается в магнитном поле, то происходит зеемановское расщепление уровней (одна  $\pi$ - и две  $\sigma$  поляризации, не путать с  $\pi$ - и  $\sigma$  поляризациями штарковского расщепления!). Поскольку разрешения ДФС-24 достаточно для разделения образованного триплета на отдельные линии, при проведении эксперимента необходимо выбрать одну из поляризаций для облегчения дальнейшей обработки. В нашем случае планируется проводить измерение  $\pi$  поляризации (с  $\mu_z = 0$ ), соответствующую излучению, поляризованному по полю (вдоль плазмы). После объектива с

поляризационным фильтром свет поворотными зеркалами (на участке 6-5) направляется на входную щель спектрометра. Отражаясь от параболических зеркал (2) и в промежутке дифрагируя на первой решетке, свет проходит через промежуточную щель, отражается от второй пары зеркал и дифрагирует уже на второй решетке, затем, разложенный в спектр, попадает на набор из световодов, набранный из оптоволоконна, который разбивается на 16 каналов, и далее по оптоволоконным кабелям на фотоэлектронные умножители и на АЦП. Условная схема выглядит следующим образом:

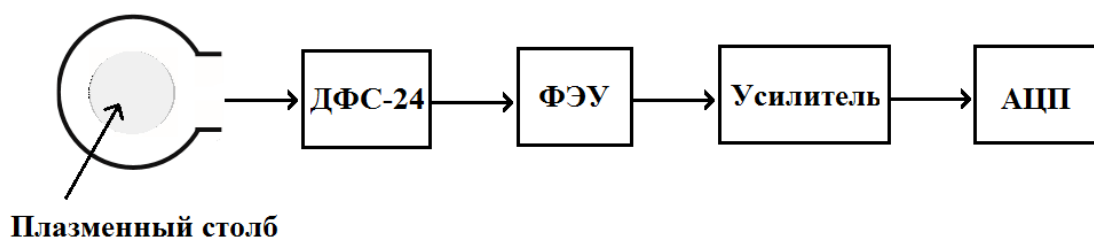


Рис. 5. Условная схема оптической системы.

### 3.2 Калибровка спектральной системы

Разложенный в спектр свет, исходящий от плазмы разбивается по световодным коллекторам (всего их 16 шт.), устройство их выглядит следующим образом:

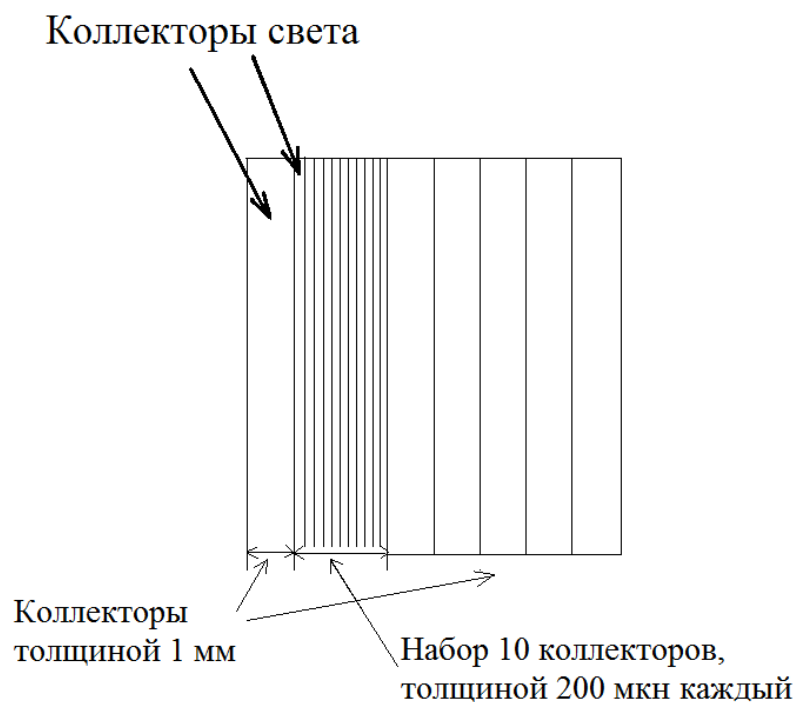


Рис. 6. На рисунке показано фронтальное изображение световодных коллекторов. Свет падает на коллекторы перпендикулярно плоскости рисунка.

Измеряемый профиль спектральной линии имеет резко спадающий центр и плавно спадающие крылья. Поэтому спектральное разрешение центра профиля должно быть выше крыльев. Набор из узких коллекторов предназначен для сбора света с центра профиля, а коллекторы, толщиной 1 мм собирают свет с крыльев профиля.

Далее свет по световодным каналам направляется на фотоэлектронные умножители (ФЭУ). В нашем случае используется фотоэлектронный умножитель ФЭУ-84. Этот прибор преобразует световой сигнал в электрический с некоторым коэффициентом усиления, зависящим от поданного напряжения питания.

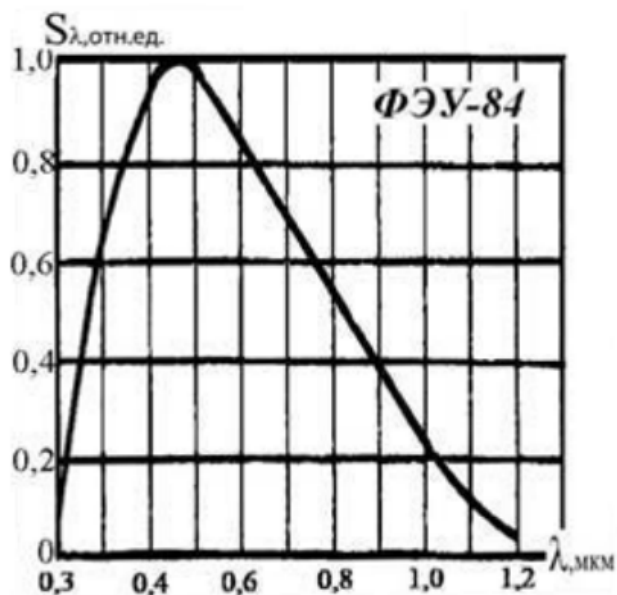


Рис.7. График относительной спектральной чувствительности фотокатода ФЭУ-84.

В силу того, что каналы регистрации имеют разную чувствительность, необходимо произвести их взаимную относительную калибровку. С этой целью была собрана система светодиодов, представленная на рис. 8. Эта система установлена в промежуточной щели спектрометра (рис. 4), и представляет из себя 4 быстродействующих светодиода. Подробнее об этой системе написано ниже.

### 3.2.1 Равномерная освещенность

В связи с неоднородностью заполнения на поверхности торца световода (торцы световодов представляют из себя набор оптоволоконных полос), разными коэффициентами усиления ФЭУ и по ряду других причин, необходимо создание источника равномерного освещения, для калибровки системы каналов. С этой целью была создана система, показанная на рисунке.

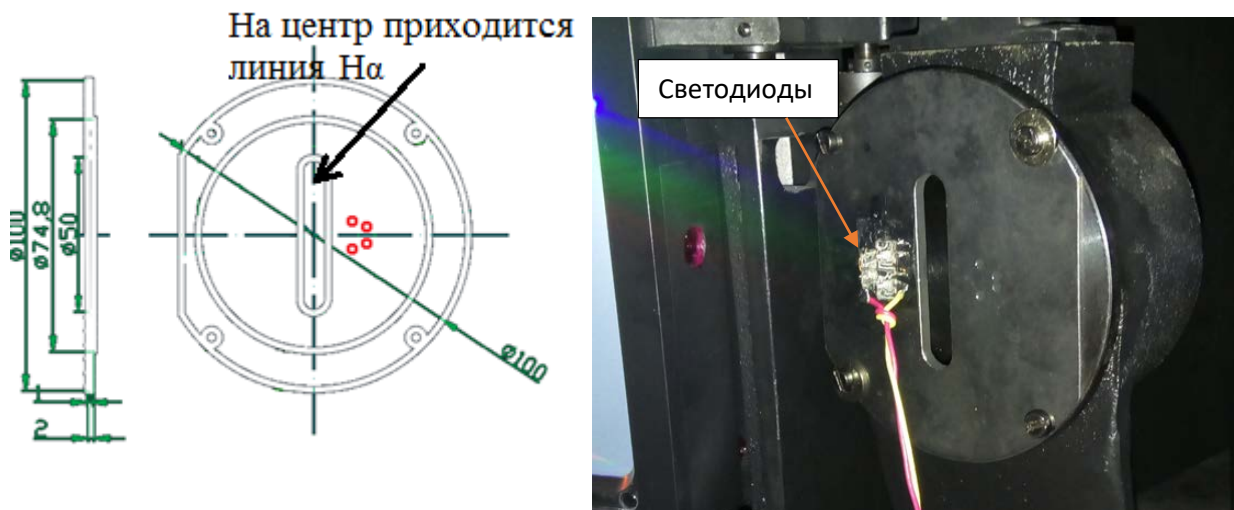


Рис. 8. Слева представлен чертеж промежуточной щели, красными кружками обозначены светодиоды. На фото справа - как это выглядит в спектрометре.

Данная система расположена таким образом, что линия  $H_\alpha$  приходится на ее центр. В силу того, что у калибрующих светодиодов спектры излучения не совпадают с линией  $H_\alpha$ , необходимо сместить их от центра на расстояние, определяемое дисперсией дифракционной решетки, расположенной во второй половине спектрометра:

$$D_{\text{лин}} = \Delta\lambda/\Delta l$$

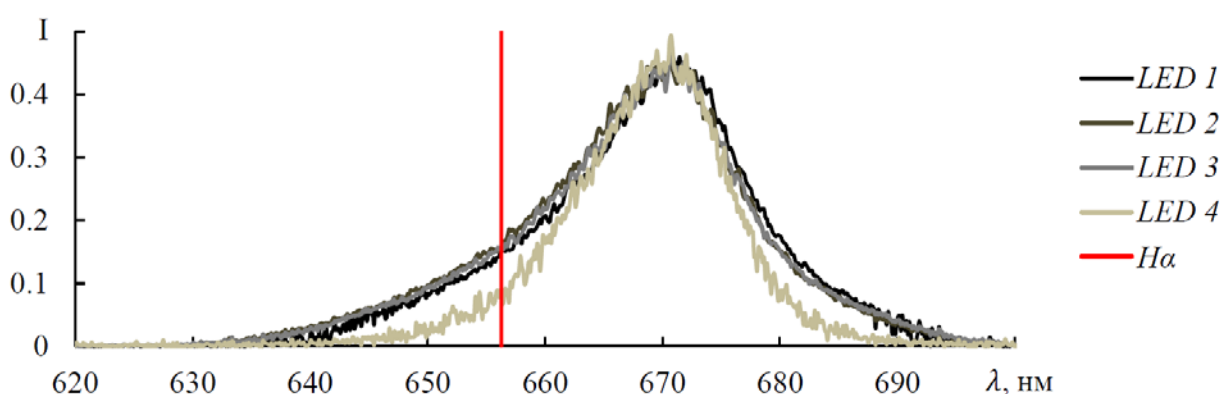


Рис.9. Спектры калибрующих светодиодов и линия  $H_\alpha$ .

Таким образом учитывая формулу  $D_{\text{лин}} = \Delta\lambda/\Delta l$ , и зная, что линейная дисперсия для одной дифракционной решетки спектрометра составляет  $D_{\text{лин}} =$

8,6 Å/мм находим, что ближнюю к центру промежуточной щели пару светодиодов нужно расположить на 13,5 мм, а дальнюю пару – на 18 мм от центра промежуточной щели, как показано на рис. 8. Дальнейшей целью становится распределить светодиоды так, чтобы они однородно осветили приемник (квадрат 1x1 см<sup>2</sup>). Для калибровки система помещается на место промежуточной щели спектрометра. Профиль, показывающий освещенность коллекторов представлен на рисунке 10.

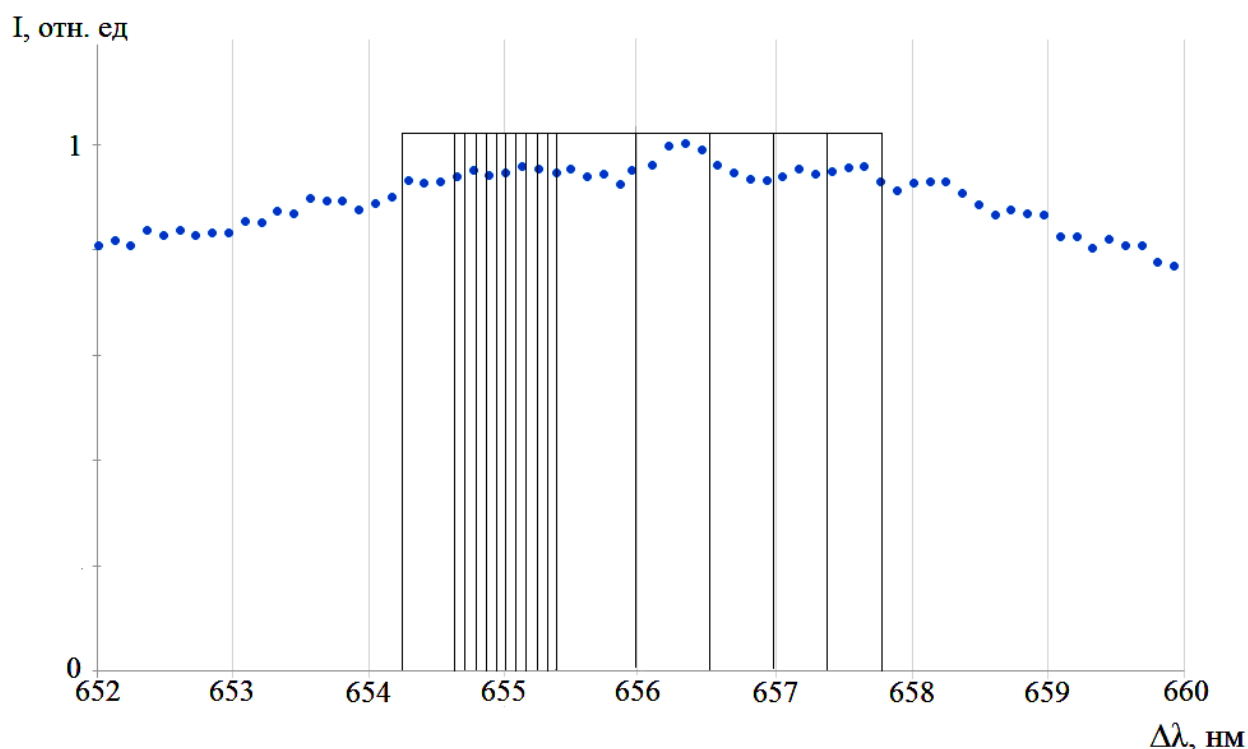


Рис. 10. Интенсивность освещения, создаваемая калибрующим устройством на приемнике. Фотоприемник состоит из вертикальных полос, набранных из оптоволокна. Их размещение показано на графике полосами.

Система каналов регистрации является оптической системой, и как всякой оптической системе, ей свойственны различного рода aberrации, связанные с неидеальностью системы, такие как астигматизм, поглощение света средой отсутствие соосности элементов и т. д. Поэтому нужно убедиться в том, что световодные коллекторы равномерно освещаются приходящим из плазмы излучением. Для калибровки системы астигматизм играет на руку таким

образом, что свет от калибровочных светодиодов на световодных коллекторах расплывается в пятно, таким образом для полного равномерного освещения требуется меньшее число светодиодов. Равномерная освещенность по пространству, была проверена путем последовательного одиночного закрывания каждого из 4 светодиодов. Такая процедура проведена для каждого канала регистрации (см. приложение). Результат для одного из каналов приведен на рисунке ниже:

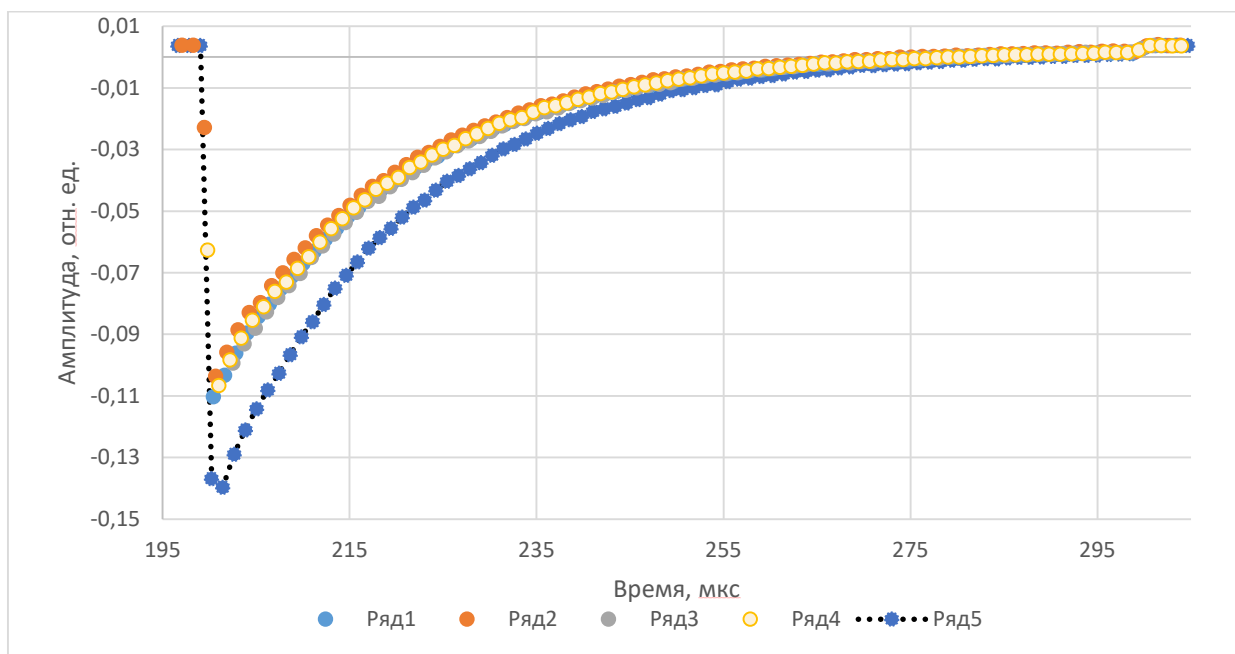


Рис. 11 Равномерная освещенность канала. Пунктир с точкой обозначено при всех открытых светодиодах. Для избавления от шумов, каждый из графиков был усреднен по 20 точкам

Также был найден корень из квадрата дисперсии по четырем отнормированным и усредненным данным:

№ канала	1	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	3.1	3.2
$\sqrt{\sigma^2/\langle Y \rangle}$	0,0424	0,0914	0,0095	0,0743	0,042	0,046	0,037	0,051
№ канала	3.3	3.4	3.5	4	5	6	7	8
$\sqrt{\sigma^2/\langle Y \rangle}$	0,0306	0,0208	0,0714	0,0419	0,0591	0,0679	0,0463	0,0452

Таблица 2. Каналы 2.1-3.5 – это десять 200 - микронных каналов (Рис. 16).

### 3.2.2 Линейность по напряжению

Для проверки линейности системы по напряжению, на ФЭУ подавался с помощью быстродействующего светодиода световой импульс экспоненциально затухающей формы по току длительностью  $\sim 100$  мкс. При калибровке предполагается, что мощность света, исходящего со светодиода пропорциональна текущему через светодиод току.

Свет, попадая на ФЭУ преобразуется в электрический сигнал, который пропорционален, во-первых, интенсивности света, попадающего на ФЭУ, а, во-вторых, приложенному на ФЭУ напряжению. Затем, усиливаясь предварительно усилителем, сигнал с ФЭУ попадает на АЦП. С повышением напряжения начинается зашкаливание, как можно видеть на рисунке ниже (горизонтальный участок графика при значениях напряжения 1300 и 1500 В). Как видно итоговый сигнал выглядит как затухающая экспонента с характерным временем  $\tau \sim 10$  мкс. Это как раз соответствует разрядке конденсатора, используемого в системе питания светодиода. Заметим, что эти экспоненциальные «хвосты» графиков для разных напряжений питания ФЭУ совпадают. Это доказывает линейность системы относительно приложенного на ФЭУ напряжения. Графики были инвертированы относительно горизонтальной оси и усреднены по 20 точкам с целью избавления от шумов.



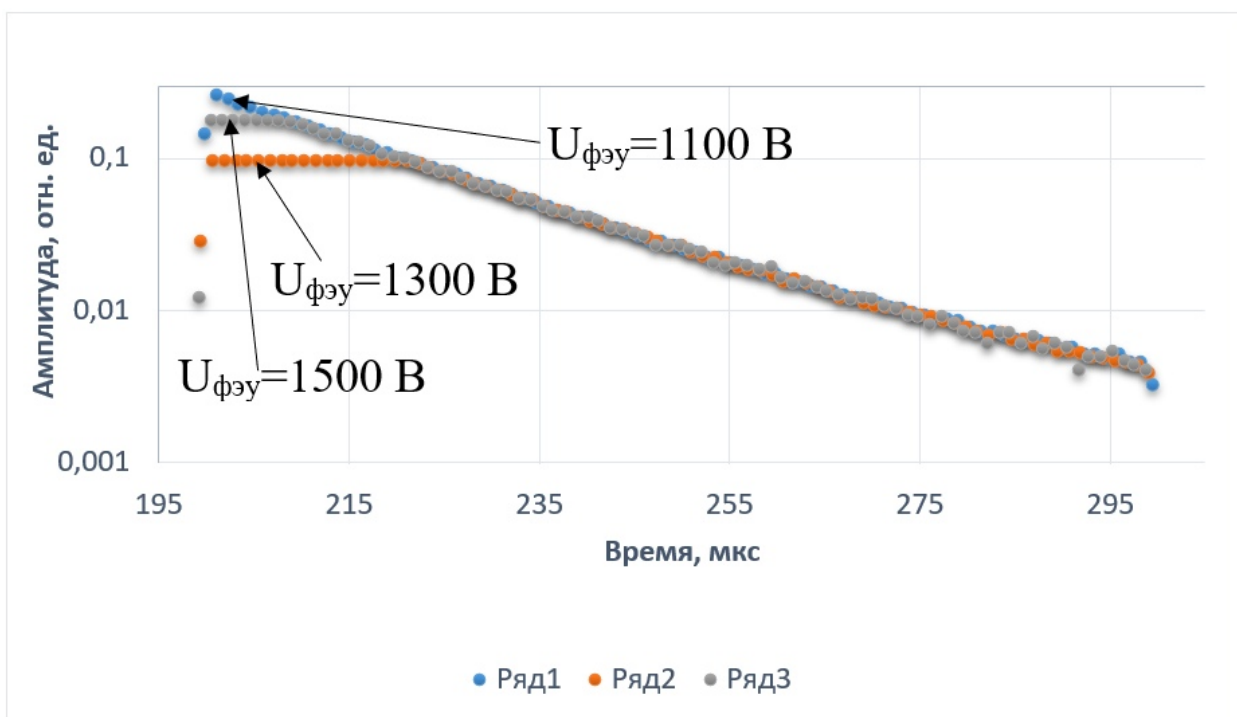


Рис. 12. Линейность канала регистрации.

### 3.2.3 Шумы ФЭУ

Ошибка измерения интенсивности на краю профиля линии при одинаковых сигналах в каналах регистрации профиля линии будет определяться по формуле:

$$\text{Относительная ошибка} = \frac{\sigma}{\sqrt{KN}}$$

где K- относительный коэффициент усиления ФЭУ в периферийном к центральному каналу, который задается перепадом интенсивности в профиле линии.  $N \approx 50$  - эффективное число точек в интервале  $\tau$ , связанное с шумами. В результате относительная ошибка определения интенсивности на краю профиля (при питании ФЭУ 1,8 кВ, взято из эксперимента) будет равна  $5 \times 10^{-4}$ .

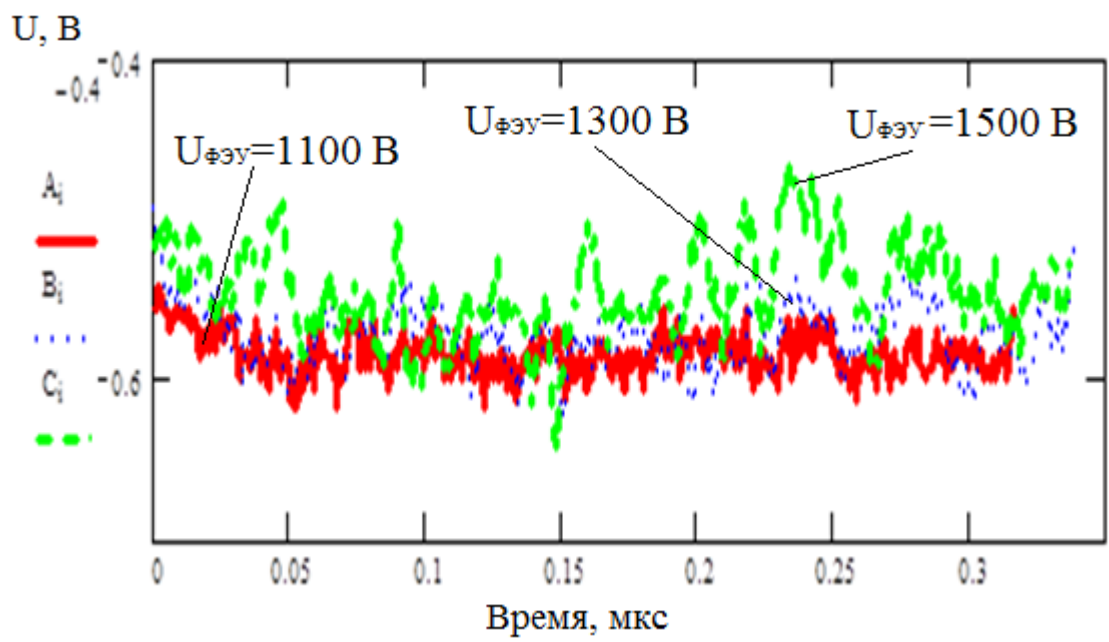


Рис. 13. Шумы с ФЭУ.

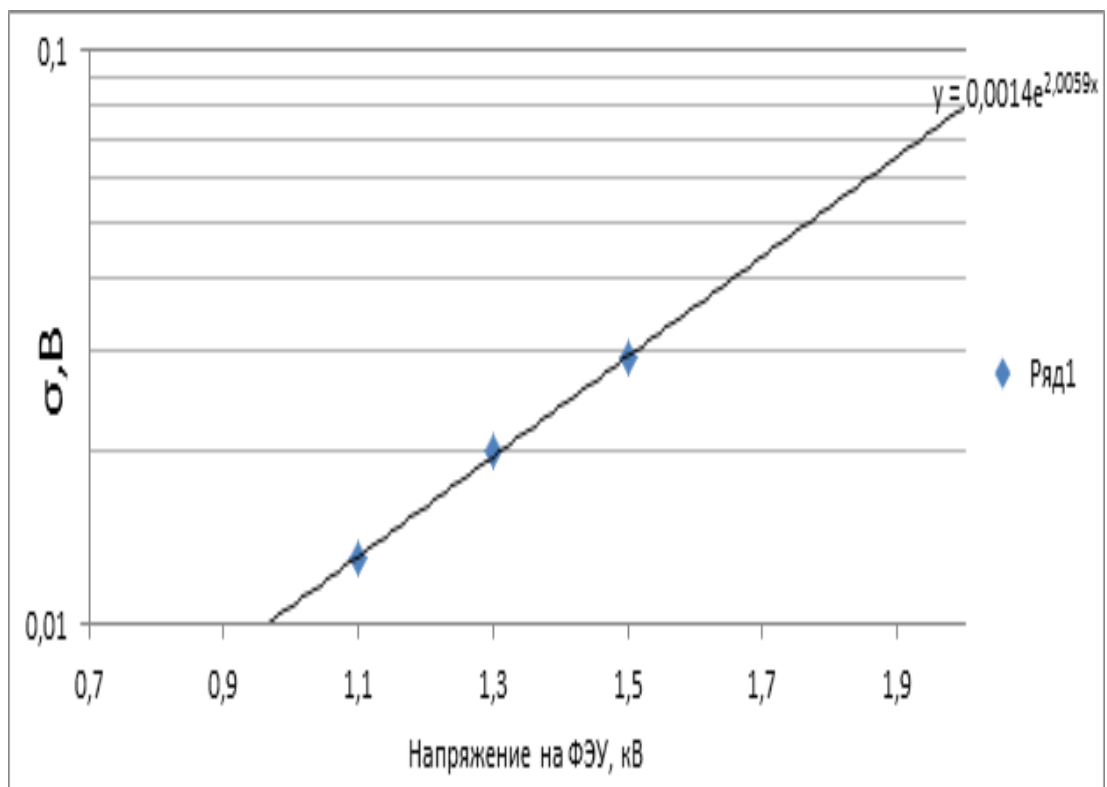


Рис.14. Данный график построен по данным, приведенным на рис. 13.

### 3.3 Временное разрешение

В силу того, что временной масштаб изучаемого явления составляет  $\sim 100$  нс, необходимо, чтобы быстродействие системы регистрации соответствовало данному времени. С целью повышения быстродействия каналов регистрации была разработана собрана и протестирована схема трансимпедансного усилителя, которая позволила уменьшить фронт нарастания сигнала до  $\sim 100$  нс. Трансимпедансный усилитель был использован по следующей причине. Сопротивление на выходе с ФЭУ составляет  $\sim 1$  МОм, а сопротивление АЦП  $\sim 50$  Ом. Таким образом усилитель согласует ток с ФЭУ с АЦП.

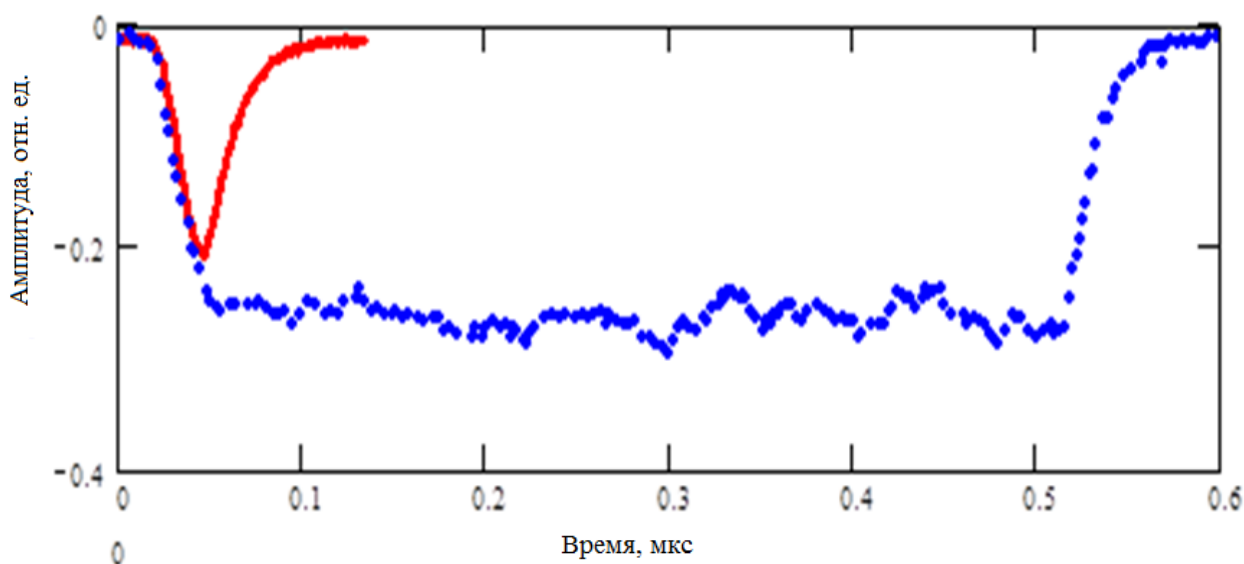


Рис. 15. График для определения временного разрешения системы регистрации. Синим изображен сигнал с системы регистрации от светового импульса длительностью 0,5 мкс, красным – сигнал от светового импульса длительностью 50 нс.

### 4. Заключение

Была собрана и налажена система регистрации излучения из плазмы, позволяющая с высоким временным разрешением,  $\sim 100$  нс, измерять профиль спектральной линии  $H_{\alpha}$ , а также написана программа, позволяющая по наблюдаемым профилям линии  $H_{\alpha}$  оценить усредненное значение амплитуды электрических полей вдоль хорды наблюдения плазменного шнура.

## Список литературы

- [1] H.R. Griem. *Principles of Plasma Spectroscopy*. Cambridge Monographs on Plasma Physics (2). Cambridge University Press, 1997.
- [2] А. В. Аржанников, А. В. Бурдаков, В. С. Бурмасов, И. А. Иванов, К. Н. Куклин, К. И. Меклер, С. В. Полосаткин, В. В. Поступаев, А. Ф. Ровенских, В. Ф. Складов Плазменная система установки ГОЛ-3Т. – с. 4.
- [3] A.V. Burdakov, A.V. Arzhannikov, V.T. Astrelin, I.A. Ivanov, M.V. Ivantsivsky, V.S. Koidan, K.I. Mekler, S.V. Polosatkin, V.V. Postupaev, A.F. Rovenskikh, S.L. Sinitsky, Yu.S. Sulyaev Plasma heating and confinement in the Gol-3 multiple mirror trap, 2004.
- [4] Березин А.Б., Люблин Б.В., Яковлев Д.Г. Штарковская спектроскопия водородных линий в турбулентной плазме. Низкочастотная турбулентность. Препринт К-0609. Л., НИИЭФА, 1983, с. 4-16.

## 5. Приложение

Каналы регистрации имеют нумерацию, как показано на рисунке:

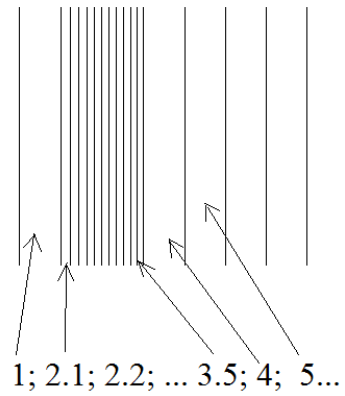
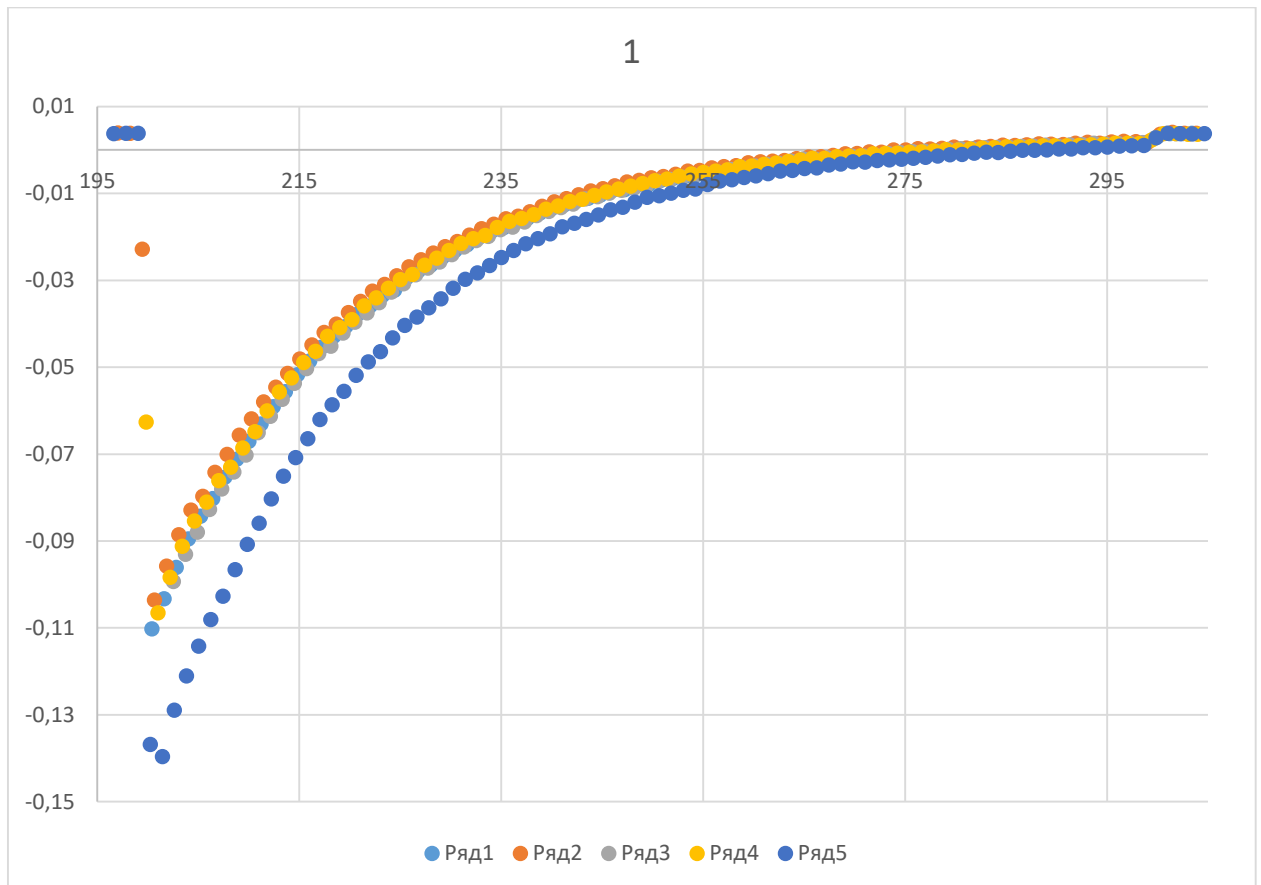
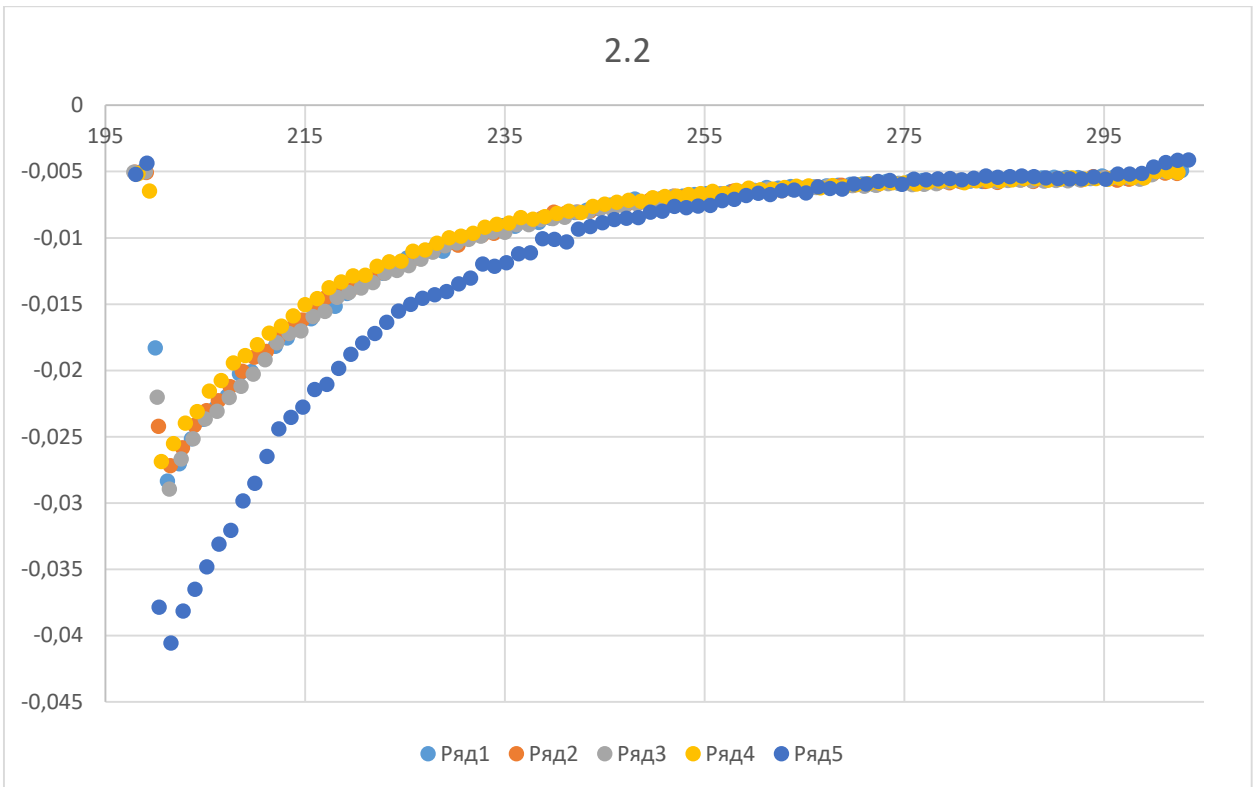
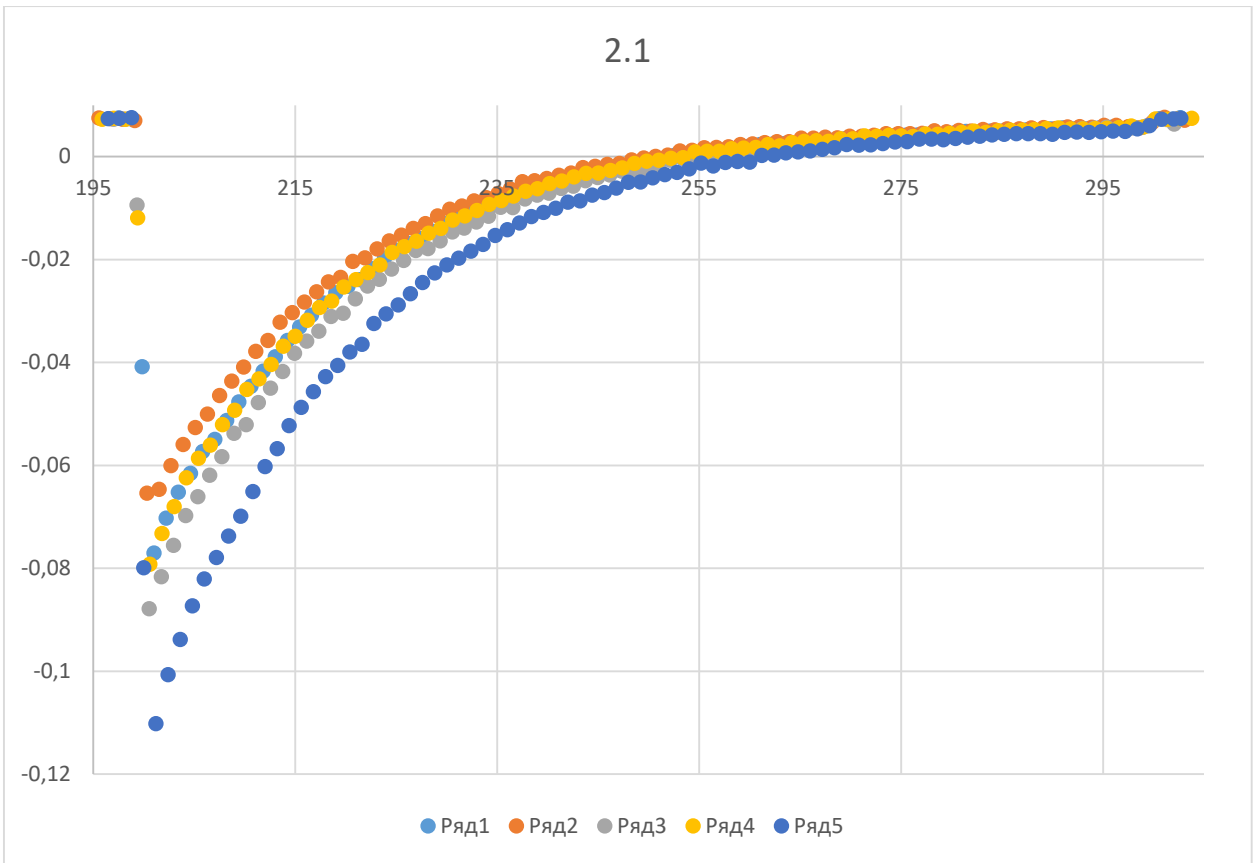
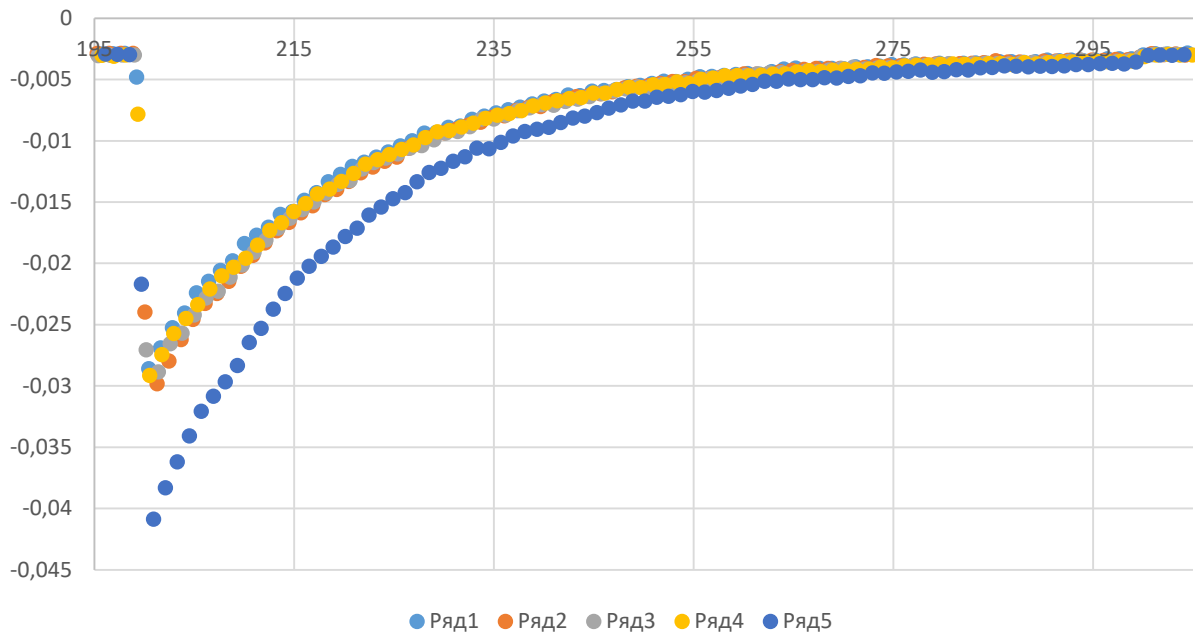


Рис. 16. Нумерация каналов регистрации.

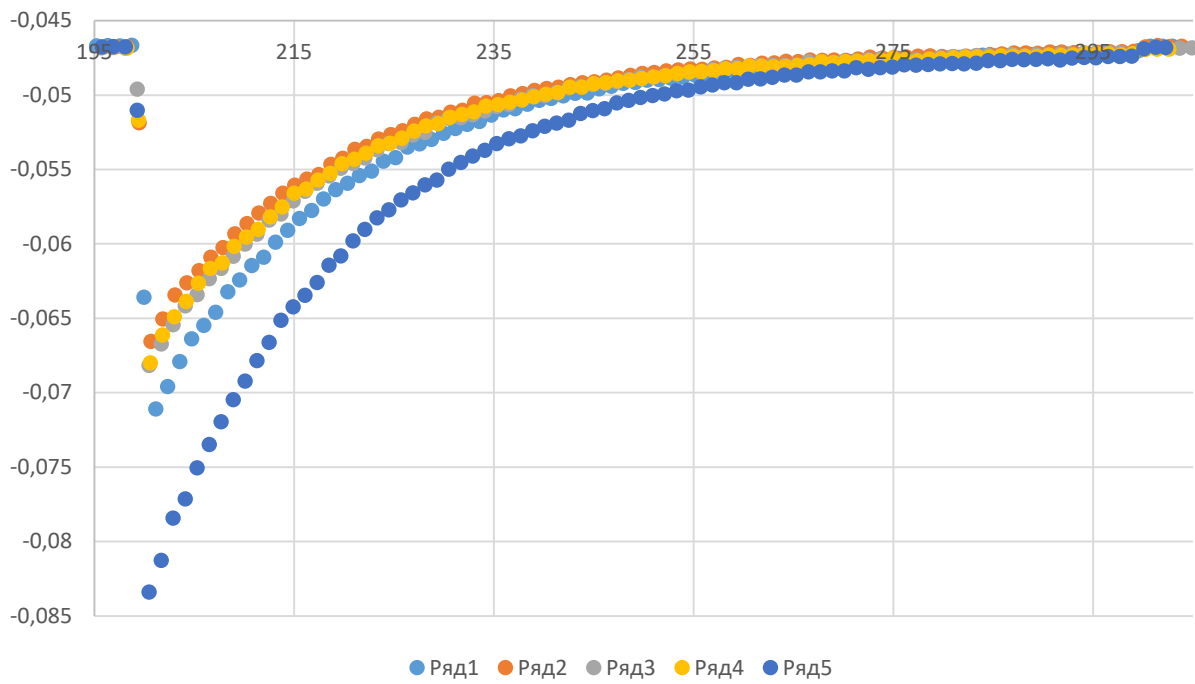


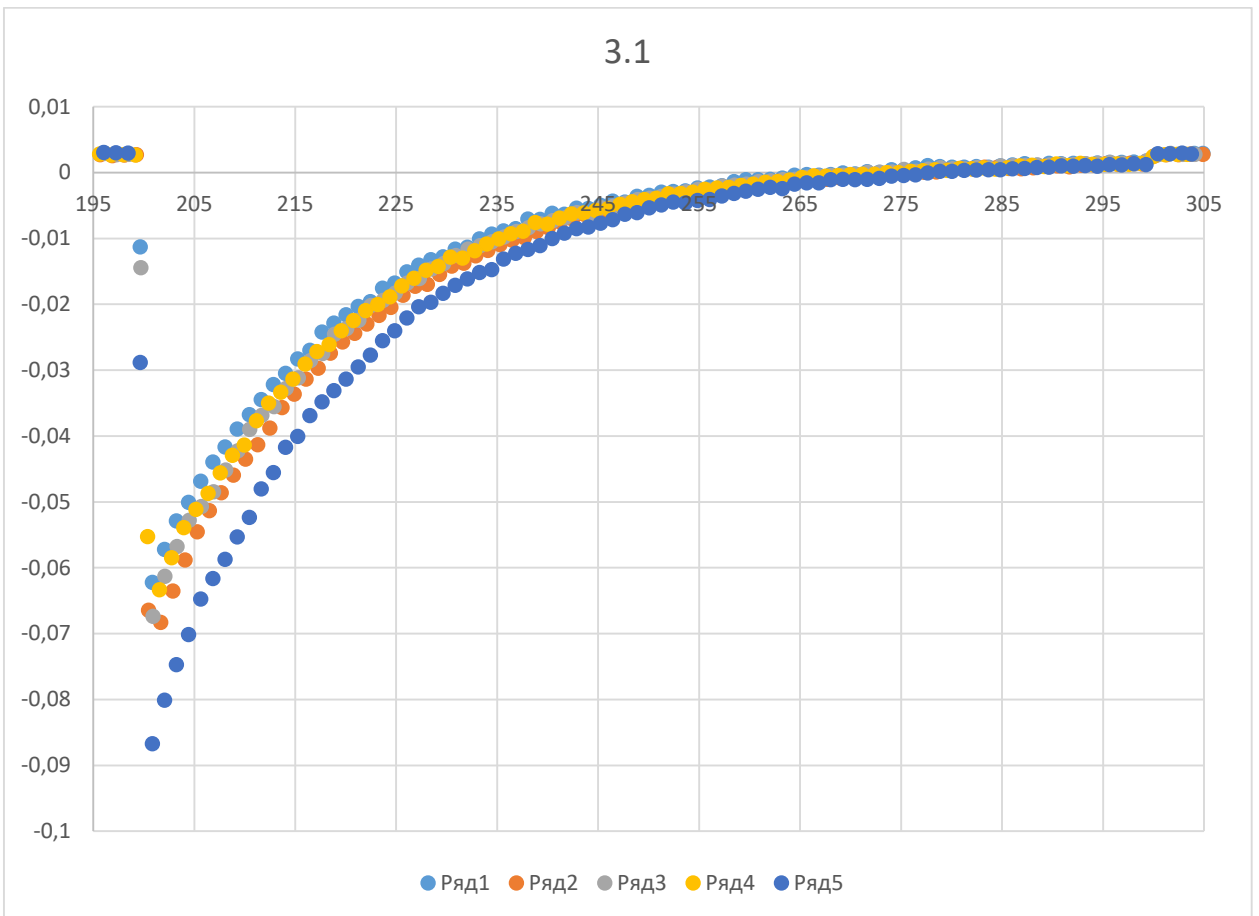
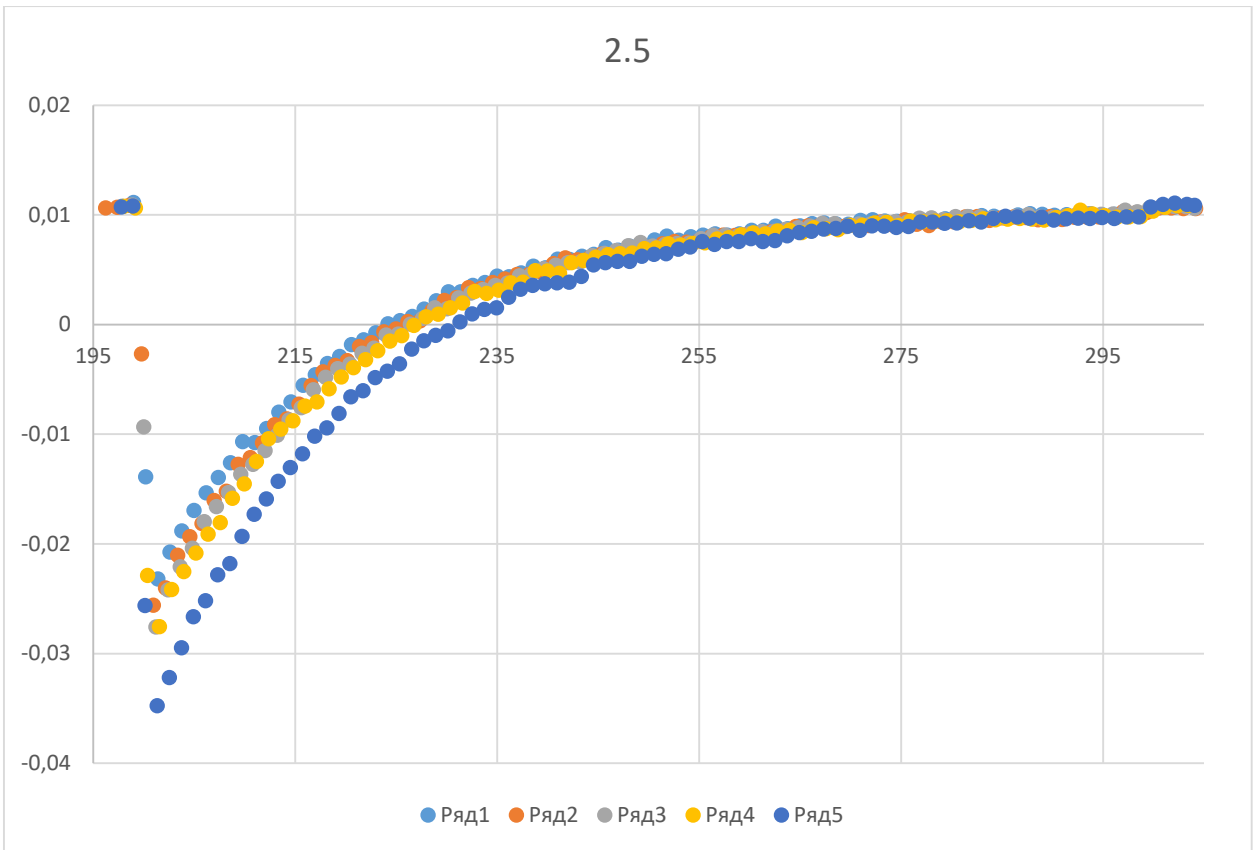


### 2.3

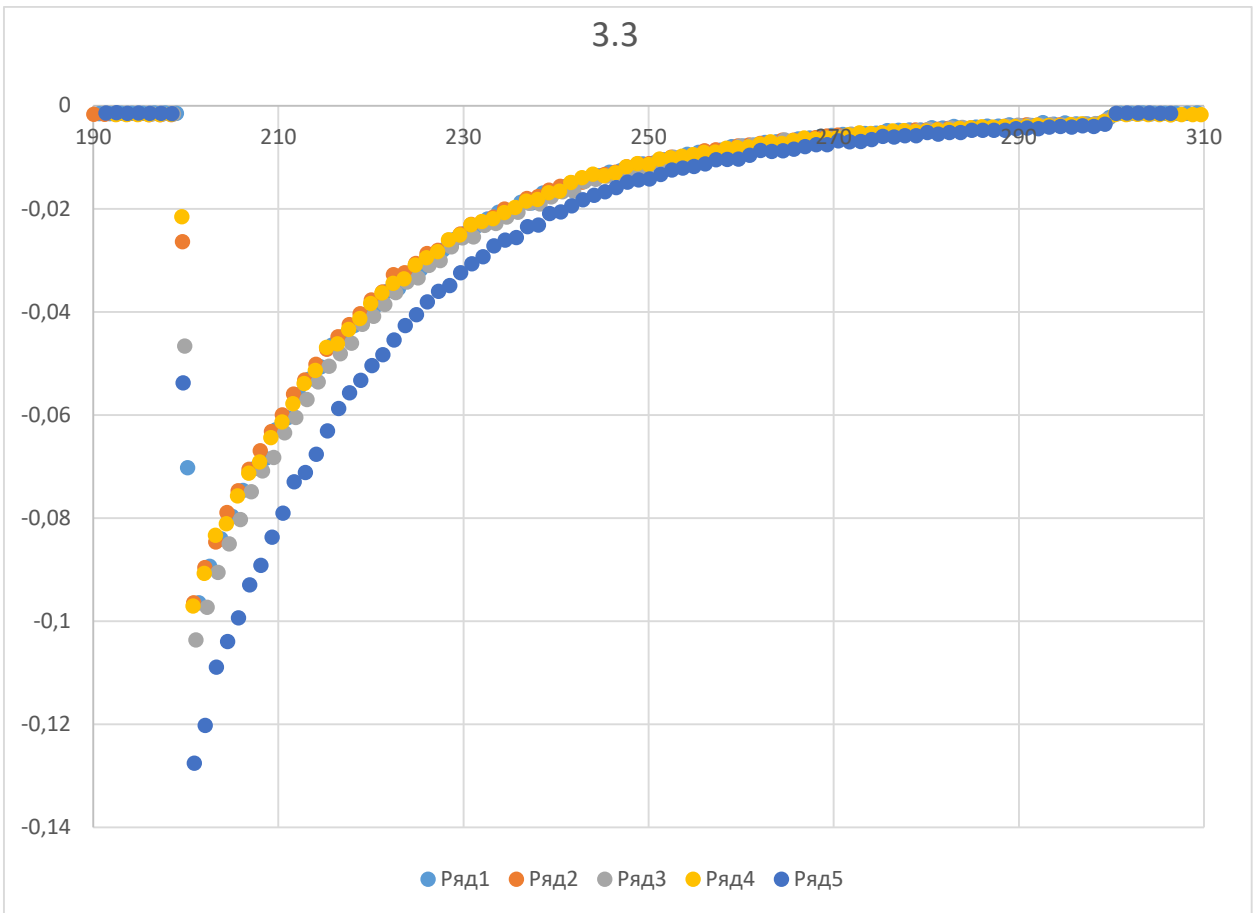
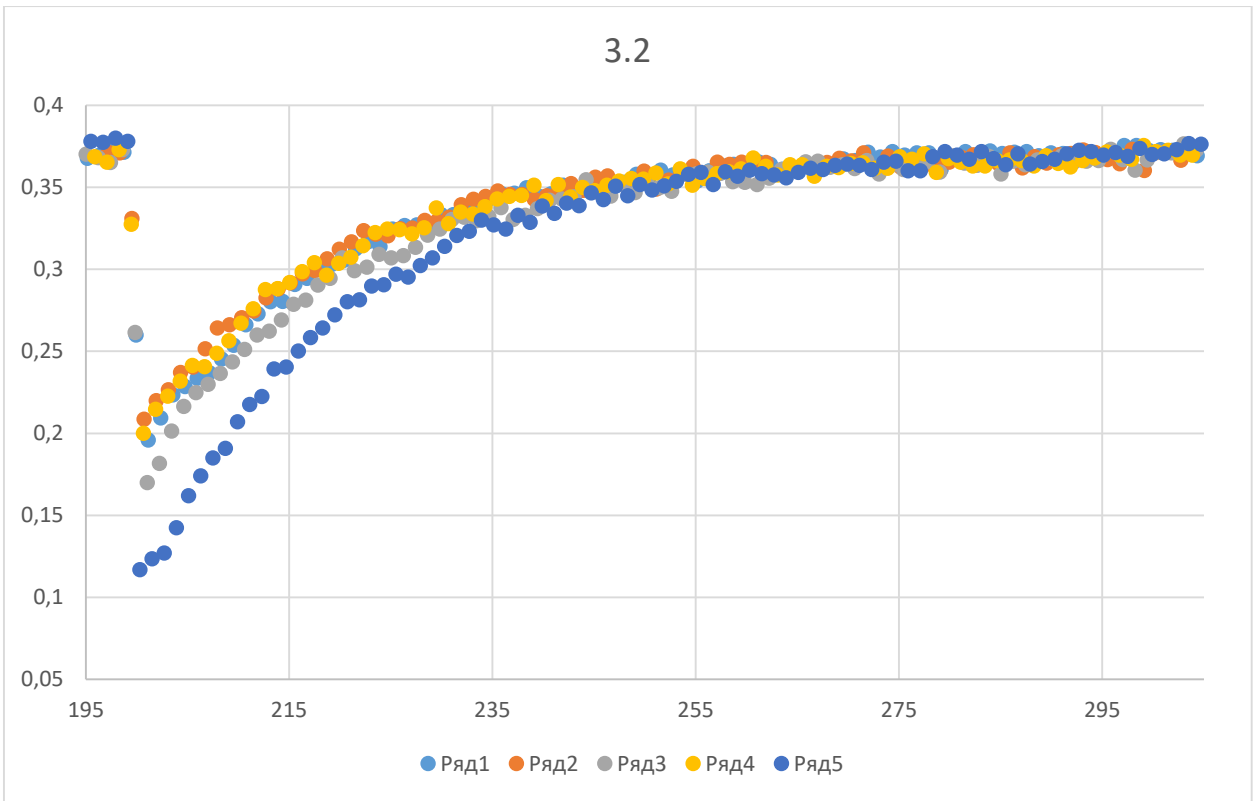


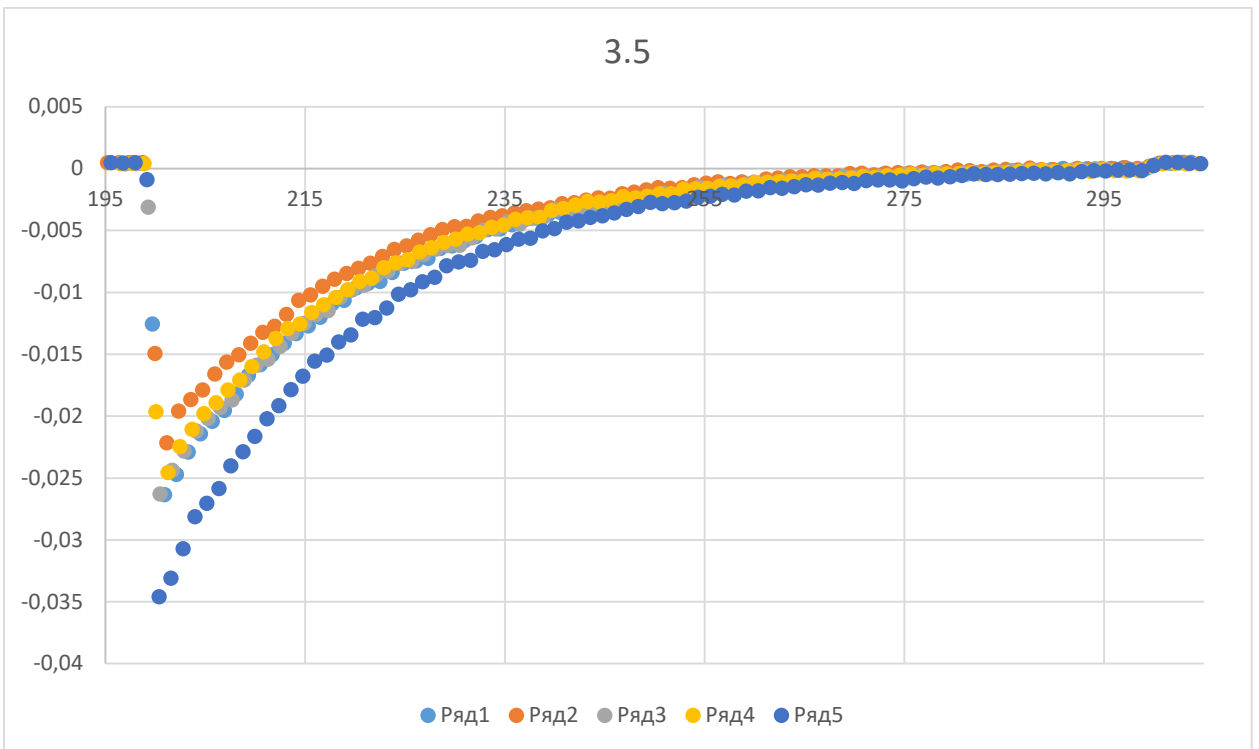
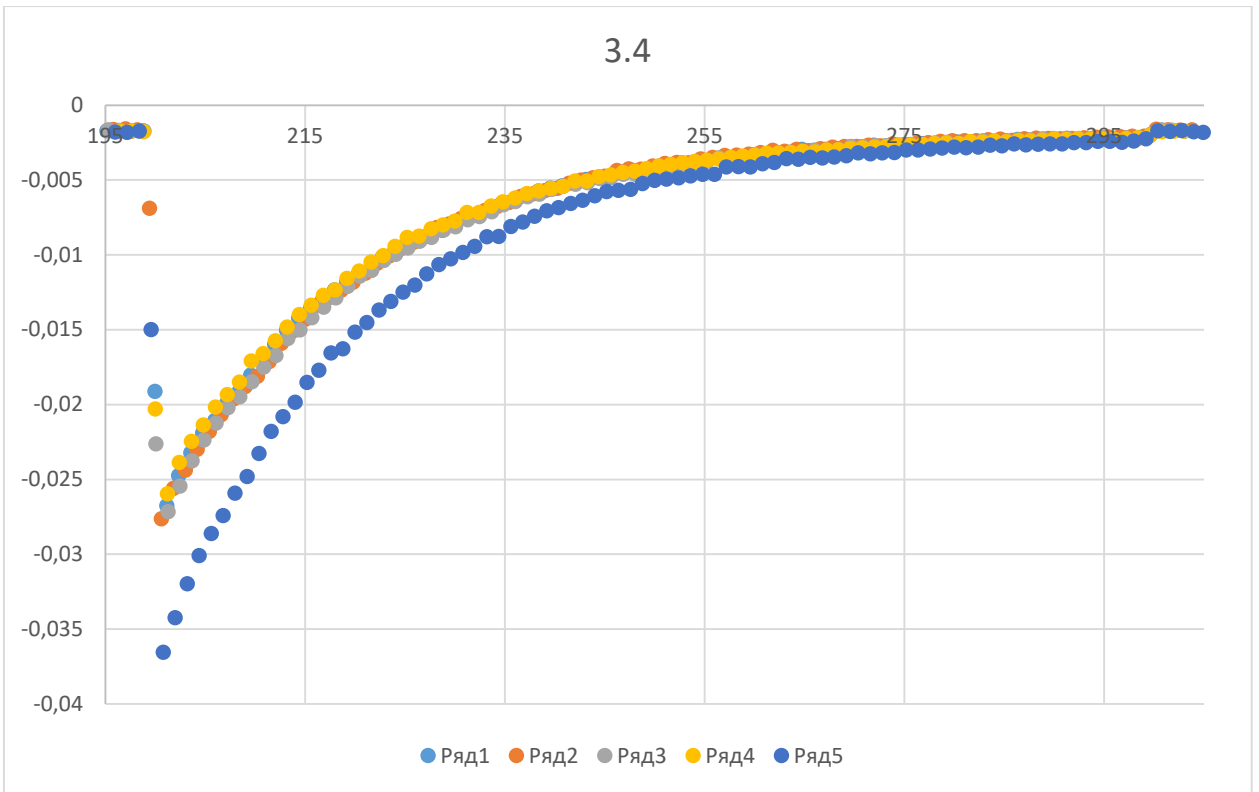
### 2.4

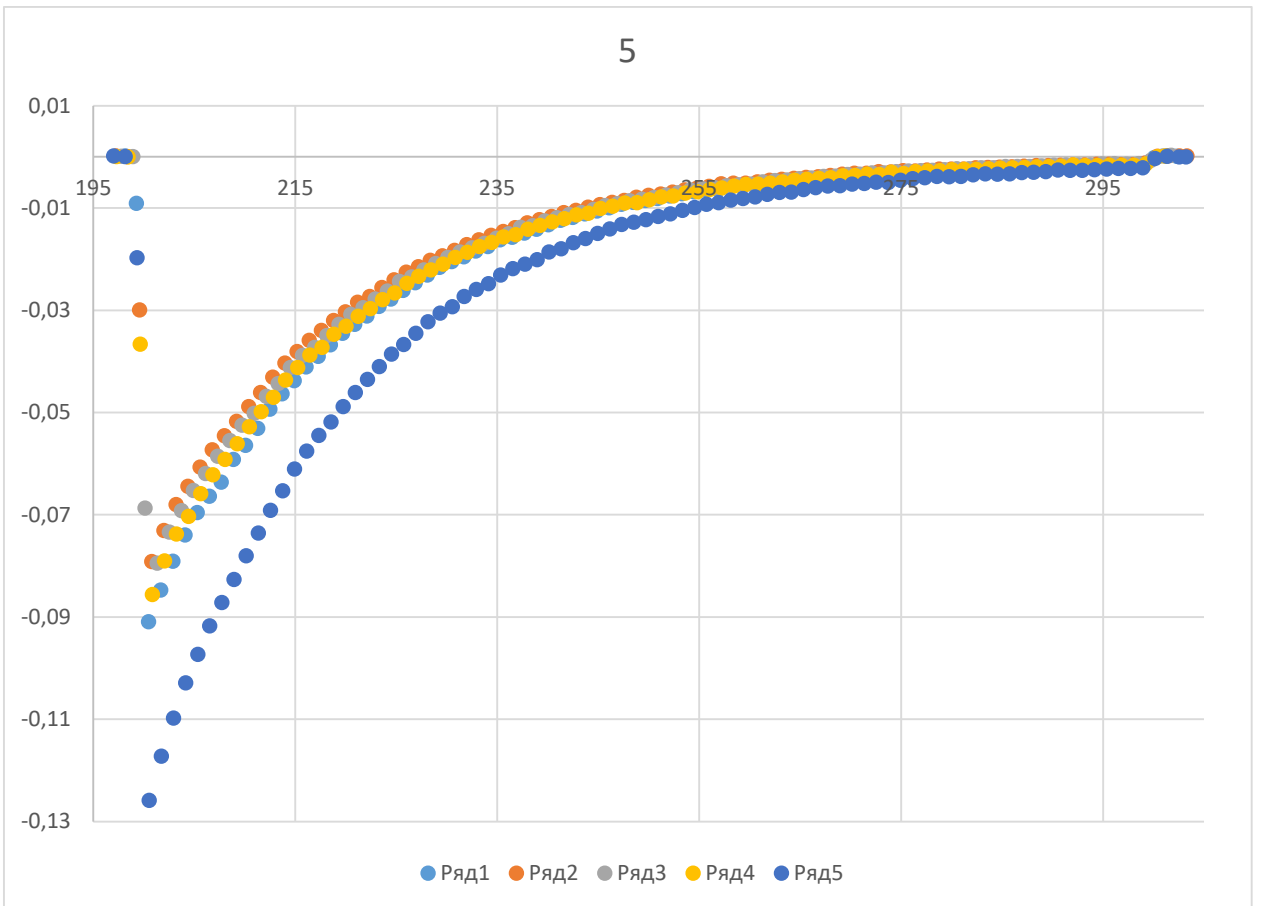
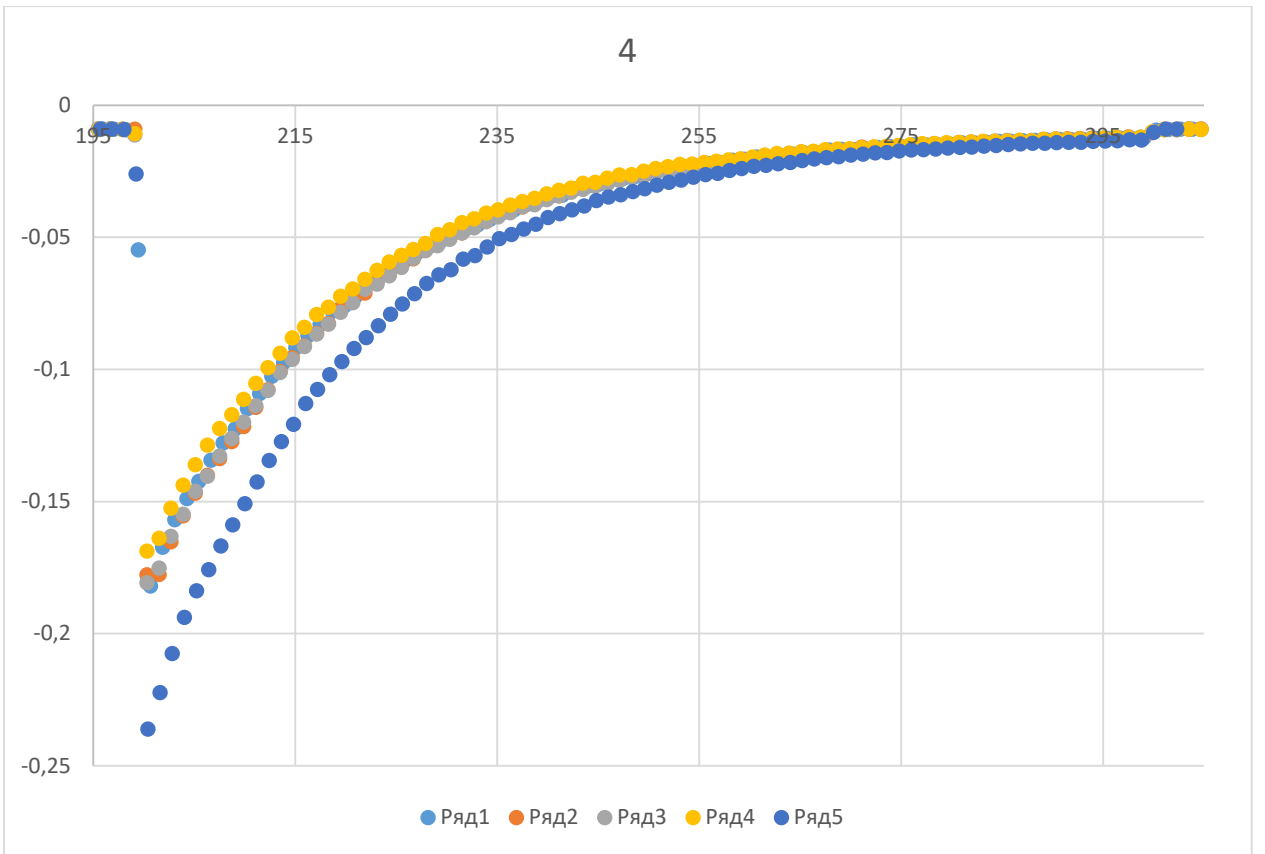


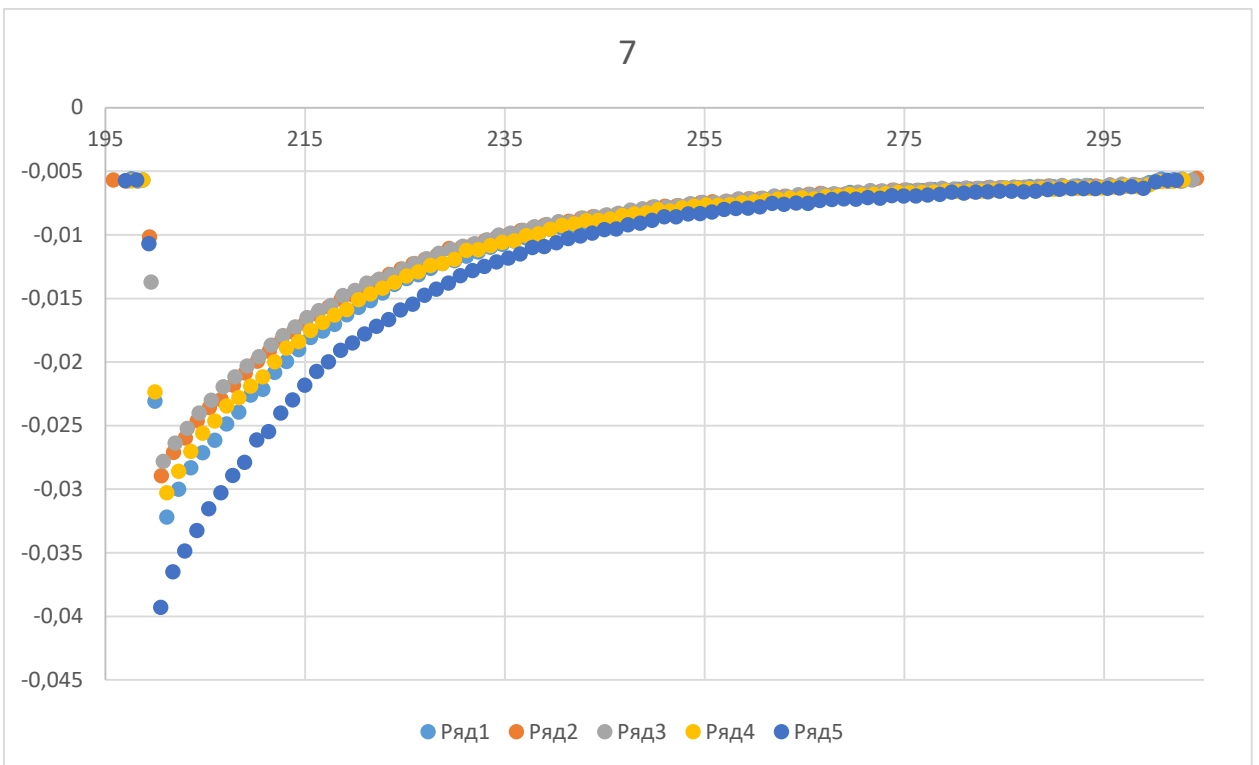
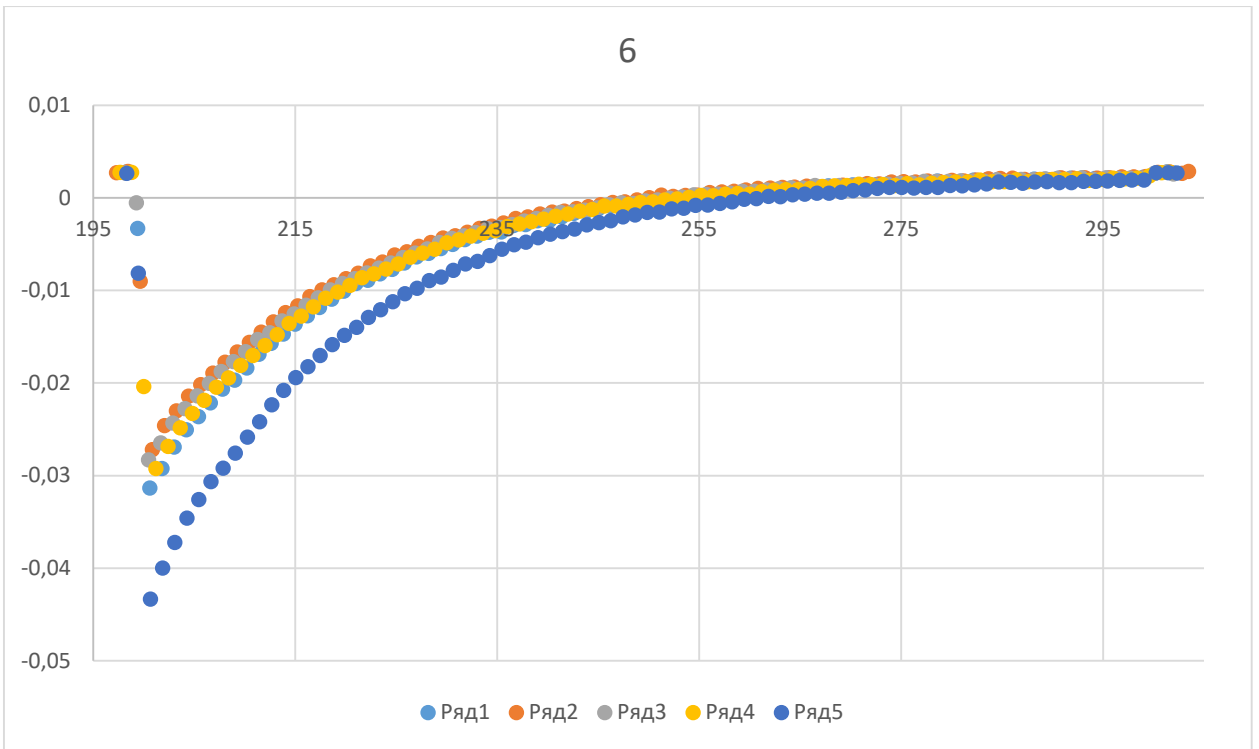












8

