

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет  
Кафедра общей физики  
Кормушаков Тимур Юрьевич

КУРСОВАЯ РАБОТА  
**Измерение линейности фотоэлектронного  
умножителя**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19308

**Научный руководитель:**

к. ф.-м. н, Кравченко Евгений  
Анатольевич  
Оценка научного руководителя

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Преподаватель практикума**

Харламов Алексей Георгиевич  
Оценка преподавателя практикума

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Куратор практикума:**

к.т.н. В.Т. Астрелин  
Итоговая оценка

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Новосибирск 2020

## Оглавление

Введение .....	2
Оборудование .....	3
Теоретическая часть .....	3
Механизм работы фотоэлектронного умножителя .....	3
Ход работы .....	4
1. Измерение амплитудного распределения импульсов .....	4
2. Определение коэффициента усиления .....	4
3. Перспективы дальнейшей работы .....	6
Измерения .....	6
1. Амплитудное распределение импульсов .....	6
2. Коэффициент усиления .....	12
Результаты .....	19
Выводы и заключения .....	19
Список литературы .....	20

## Аннотация

В учебно-научной лаборатории новых методов регистрации ионизирующих излучений МЦФЭЧиАФФ изготавливаются детекторы космических частиц для гамма-обсерватории TAIGA. В данной работе определялся коэффициент усиления фотоэлектронного умножителя, используемых в конструкции детекторов в рамках подготовительного этапа к измерению линейности прибора. Были получены и обработаны амплитудные распределения сигнала ФЭУ при низкой интенсивности источника оптического освещения. На основе полученных данных был вычислен коэффициент усиления ФЭУ.

Ключевые слова: фотоэлектронный умножитель, коэффициент усиления, линейность.

## Введение

Исследование космических частиц является важной частью развития современной астрофизики. Для регистрации космического излучения используют сцинтилляционные счетчики, принцип работы которых основывается на излучении фотонов, при попадании заряженных частиц или электромагнитного излучения в сцинтиллятор. Приближенная пропорциональность поглощенной энергии и количества фотонов позволяет получать энергетические спектры излучения. Регистрация испущенных фотонов осуществляется при помощи фотоэлектронного умножителя, который преобразует энергию квантов электромагнитного поля в электрически импульс и усиливает его. Отношение сигнала на входе усилителя к сигналу на выходе называется коэффициентом усиления.

В некотором диапазоне интенсивности зависимость между световым потоком, падающим на фотокатод фотоэлектронного умножителя, и числом зарегистрированных анодных импульсов тока с высокой точностью можно считать линейной. Однако при высокой интенсивности освещения ряд эффектов, включающий в себя искажение поля диодов пространственным зарядом, влияет на отклонение от линейности. Важно определить, как изменяется коэффициент усиления в зависимости от интенсивности освещения для разных диапазонов интенсивности.

Данная работа является подготовкой к измерению нелинейности ФЭУ, её задача заключается в определении коэффициента усиления для малых величин интенсивности путем анализа гистограмм распределения амплитуд сигнала ФЭУ.

***Цель работы*** — измерение коэффициента усиления фотоэлектронного умножителя в низкоинтенсивном режиме работы светодиода.

## Оборудование

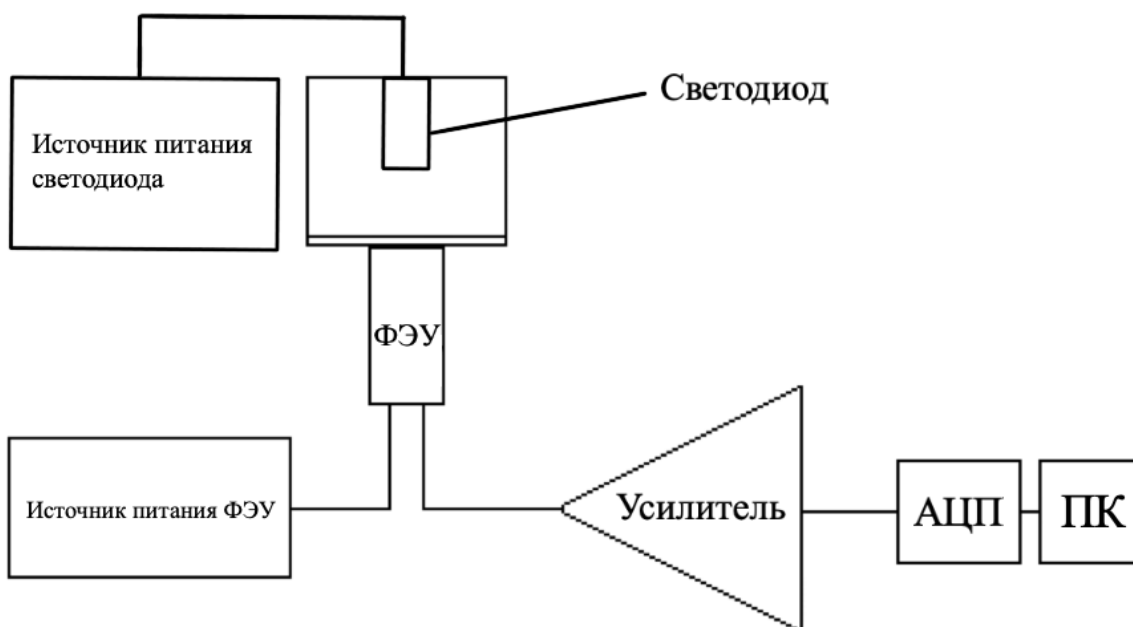


Рис. 1 Схема экспериментальной установки

Экспериментальная установка состоит из фотоэлектронного умножителя, блока питания; светодиода, осуществляющего засветку ФЭУ; аналого-цифрового преобразователя DT 5720A.

### Теоретическая часть

#### *Механизм работы фотоэлектронного умножителя*

Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) – это вакуумный прибор, в основе работы которого лежит явления фотоэффекта и вторичной электронной эмиссии. Он включает в себя светочувствительный катод и систему электродов с последовательно увеличивающимся потенциалом. Фотон, попавший на фотокатод, передает свою энергию отдельным электронам вещества. Поглощенная энергия приводит к эмиссии электронов, которые под действием поля динода разгоняются и попадают на последующий электрод, вызывая вторичную эмиссию. Проходя систему динодов поток фотоэлектронов лавинообразным образом растет и сигнал

на выходе усиливается в сотни тысяч и миллионы раз. Последний процесс характеризуется коэффициентом усиления ФЭУ, который равен отношению числа испущенных фотоэлектронов к числу электронов, попавших на анод.

Схема ФЭУ показана ниже.

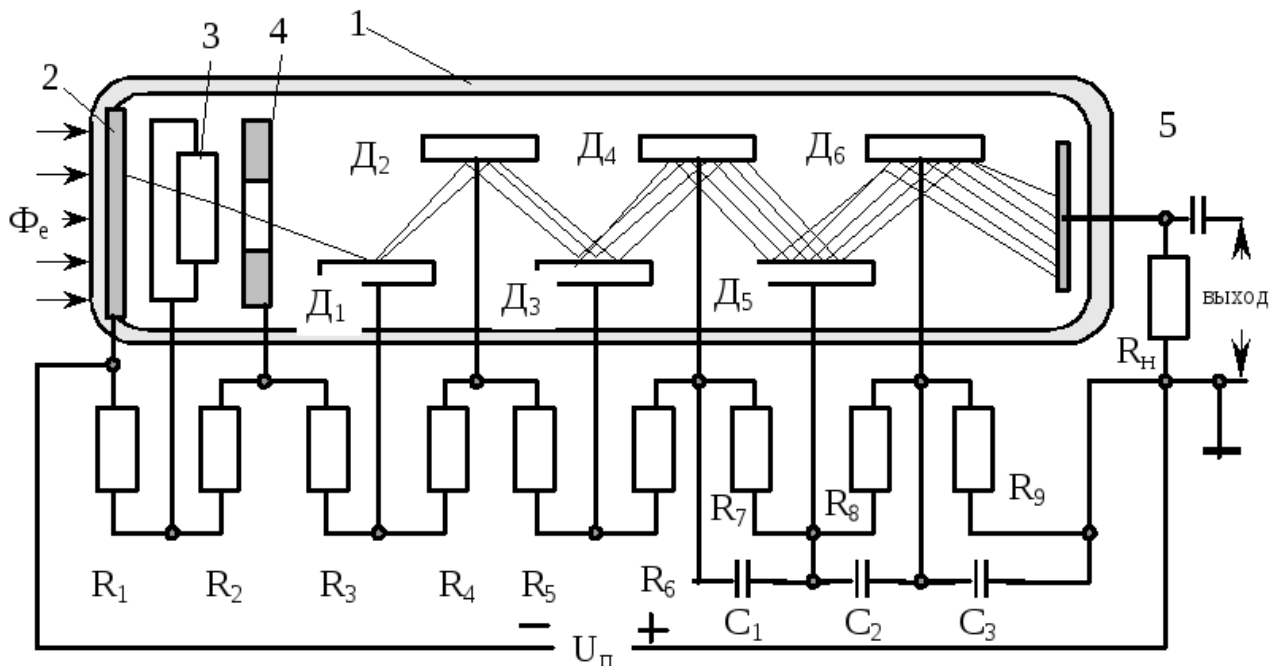


Рис. 2 Схема устройства фотоэлектронного умножителя

1. Стеклоянная колба с вакуумом
2. Полупрозрачный фотокатод
3. Фокусирующий электрод
4. Диафрагма
5. Анод

## Ход работы

### 1. Измерение амплитудного распределения импульсов.

При фиксированном напряжении питания ФЭУ измерим амплитудное распределение импульсов (АРИ) при засветке светодионом под напряжением 5 В, 5,125 В и 5,25 В. Дополнительно измеряются шумовые сигналы таким образом, чтобы количество записей во всех случаях совпало. Выставив соответствующие настройки в программном обеспечении CAEN WaveDump на ПК, формируем файлы гистограмм.

### 2. Определение коэффициента усиления.

Для ФЭУ, оптимальных для использования метода счета фотонов, характерен так называемый одноэлектронный пик. Однако в работе встречаются ФЭУ с размытыми или отсутствующим одноэлектронным пиком. В таком случае

можно использовать среднее значение амплитудного распределения. Эта величина точнее определяется из экспериментальных данных и характеризует амплитудное распределение импульсов даже в отсутствие одноэлектронного пика.

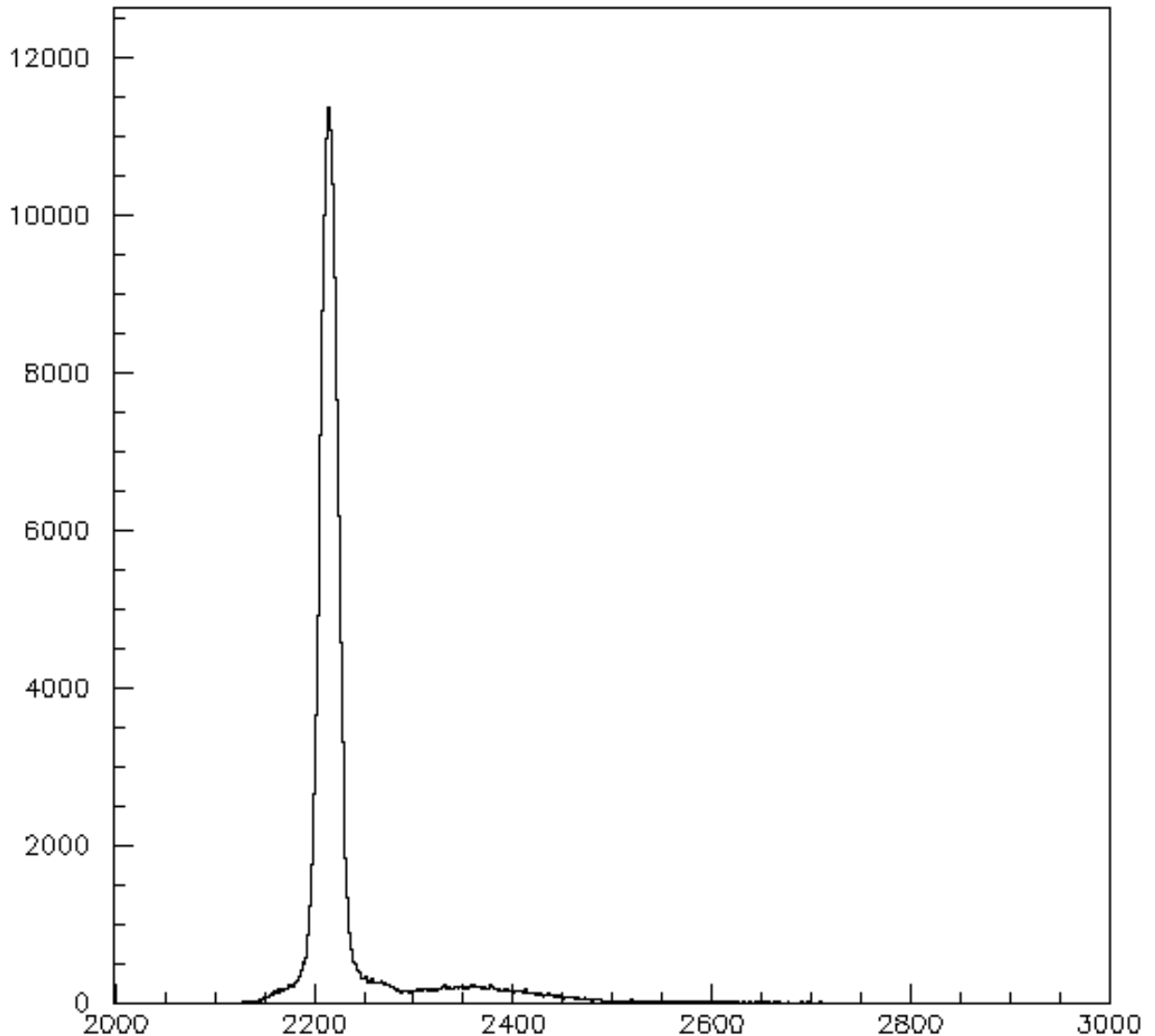


Рис. 3 Пример АРИ с размытым одноэлектронным пиком. Высокий пик здесь соответствует нулевому сигналу. Правее – область распределения ненулевых сигналов.

Испускание фотонов из светодиода является вероятностным процессом. Распределение зарегистрированных фотонов за интервал времени описывается распределением Пуассона. Метод расчета заключается в том, что по отношению сигналов с засветкой ( $S$  – signal) и шумом ( $N$  – noise) в нулевом бине (пик шумового сигнала) можно определить математическое ожидание распределения.

$$\frac{S}{N}(0) = e^{-\mu} \quad (1)$$

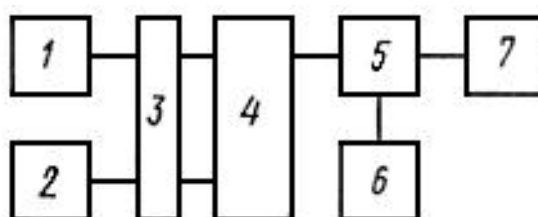
Тогда отношение медианного значения амплитудного распределения к математическому ожиданию даст бин, соответствующий одному электрону на входе.

$$\frac{A_{\text{ср}}}{\mu} = A_1 e \quad (2)$$

Каждый бин (ось ОХ) отображает интегрированный сигнал выхода ФЭУ по времени. Деленый на входное сопротивление АЦП и умноженный на чувствительность он отображает суммарный заряд, попавший на анод за время интегрирования. Для полученного бина, соответствующего одному электрону на входе, суммарный заряд, деленный на заряд одного электрона равен коэффициенту усиления ФЭУ.

### 3. Перспективы дальнейшей работы.

В дальнейшем планируется провести измерение линейности ФЭУ путем измерения постоянного напряжения на анодной нагрузке ФЭУ при освещении фотокатода двумя независимыми постоянными токами излучения.



1, 2 - источники постоянного оптического излучения; 3 - измерительный ослабитель; 4 - оптический смеситель; 5 - камера с исследуемым ФЭУ, делителем напряжения питания и резистором анодной нагрузки; 6 - источник питания ФЭУ; 7 - вольтметр постоянного тока

Измеряется поочередно напряжение на анодной нагрузке ФЭУ при освещении фотокатода постоянным потоком излучения от первого источника, от второго источника и от одновременного освещения двумя источниками постоянного оптического излучения.

Отклонение от линейности  $\kappa$ , %, определяют по формуле

$$\kappa = \left(1 - \frac{U_1 - U_2}{U_{\Sigma}}\right) * 100 \quad (3)$$

где  $U_1$  - значение постоянного напряжения на анодной нагрузке ФЭУ при освещении фотокатода излучением от первого источника;

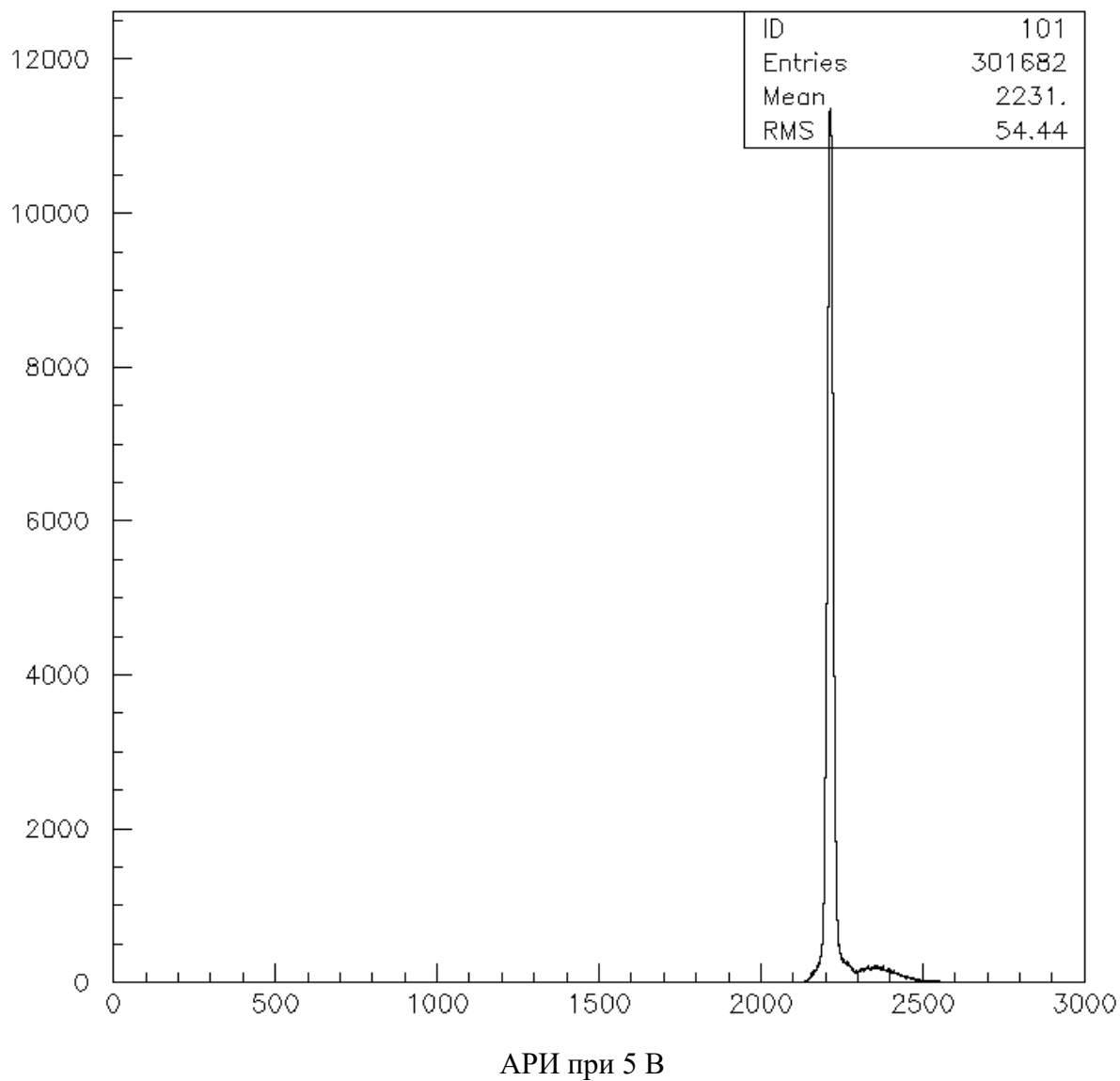
$U_2$  - значение постоянного напряжения на анодной нагрузке ФЭУ при освещении фотокатода излучением от второго источника;

$U_{\Sigma}$  - значение постоянного напряжения на анодной нагрузке ФЭУ при одновременном освещении двумя источниками.

## Измерения

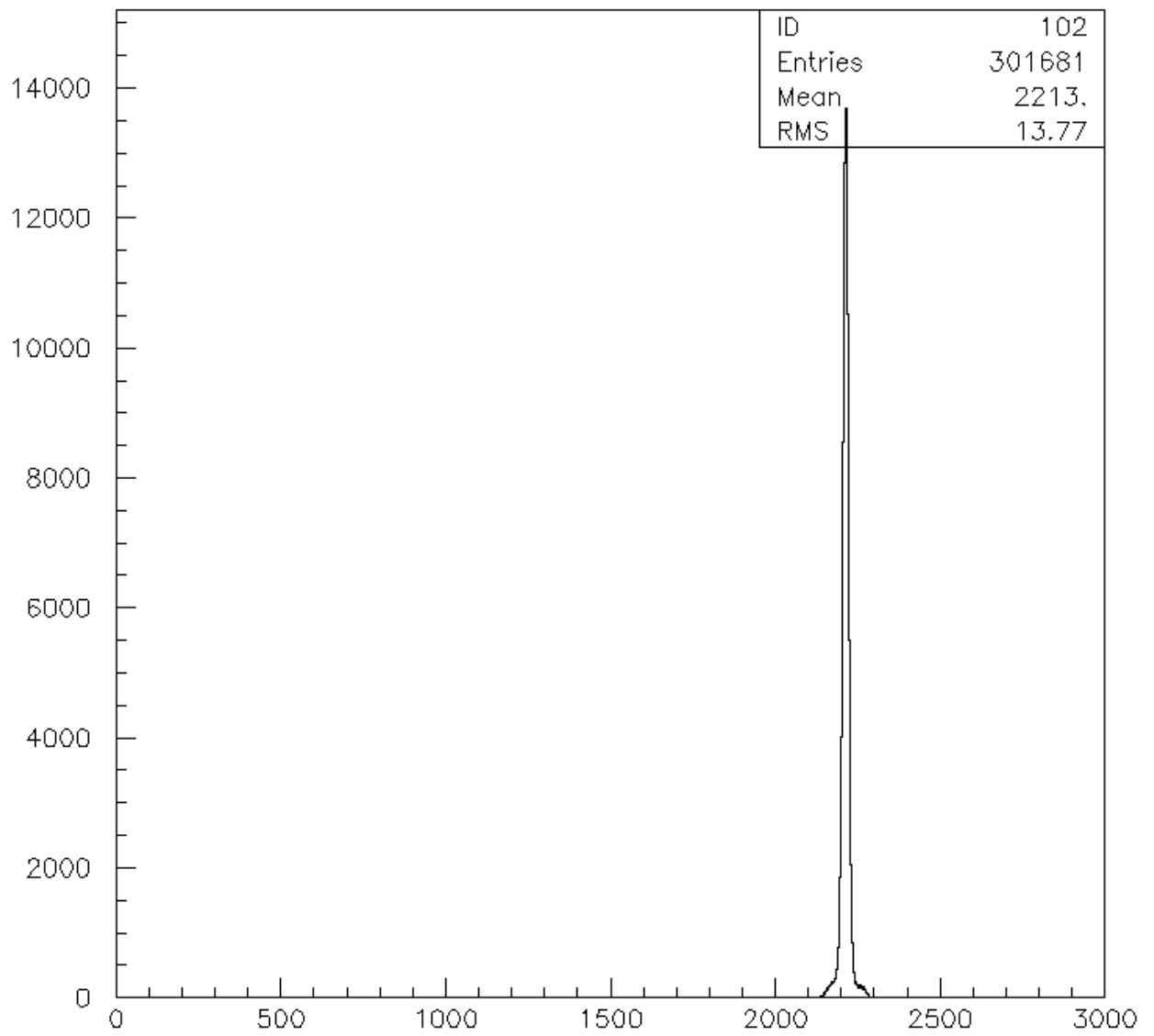
### 1. Амплитудное распределение импульсов (АРИ).

Напряжение на светодиоде равно 5 В. Получено следующее распределение.



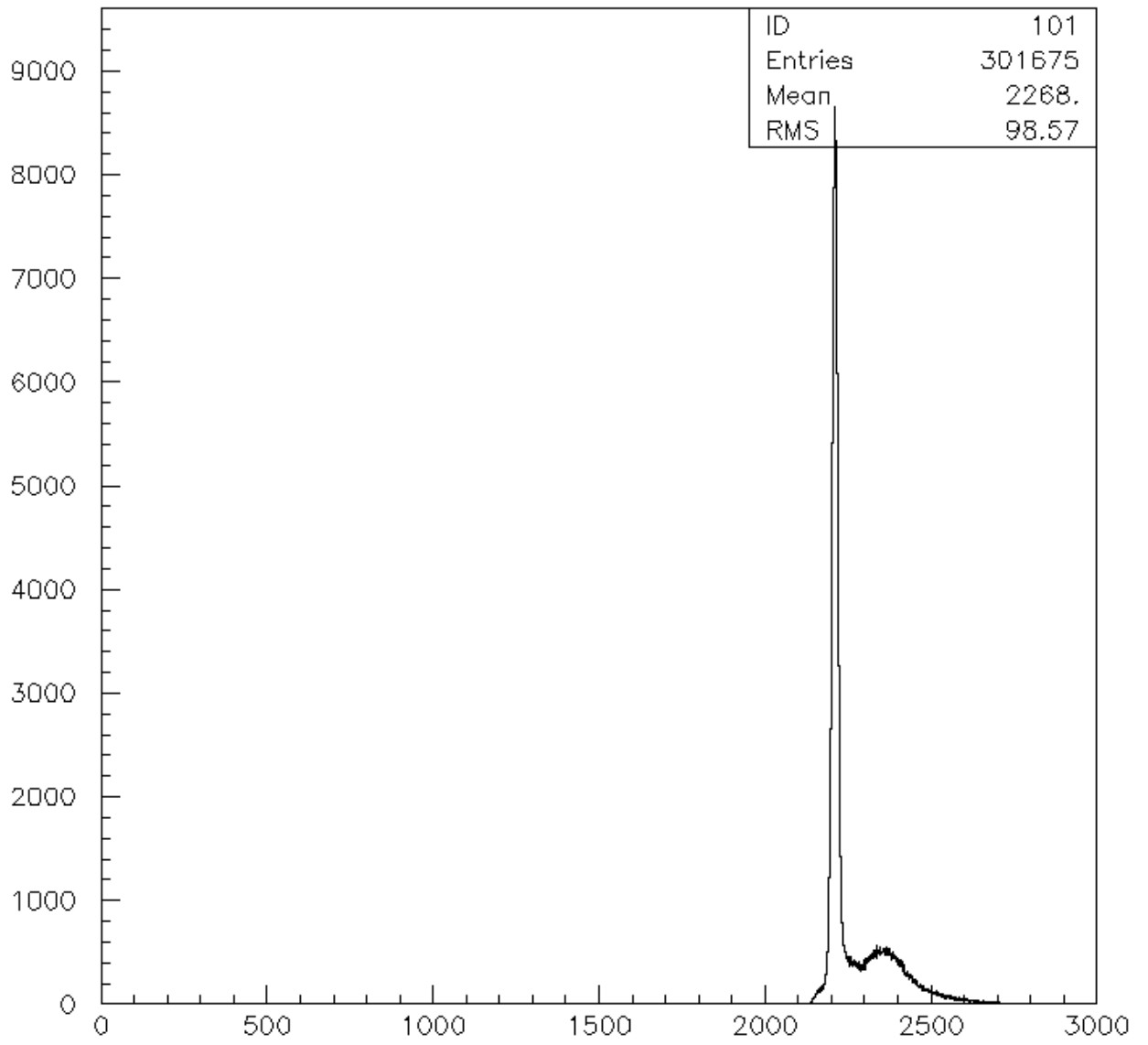
Для определения стабильности сигнала нуля как же снят сигнал при выключенном светодиоде.



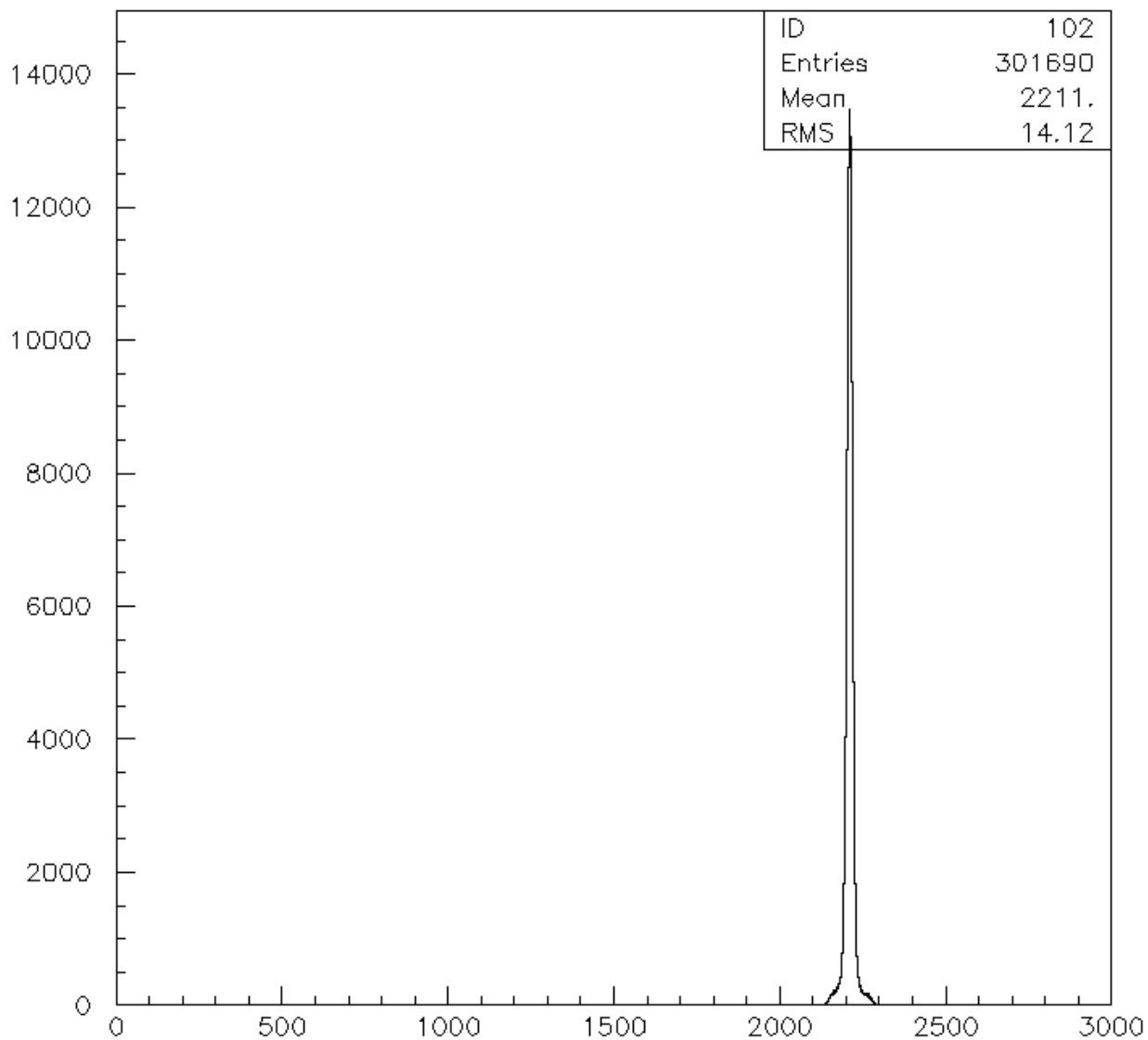


Распределение шумового сигнала

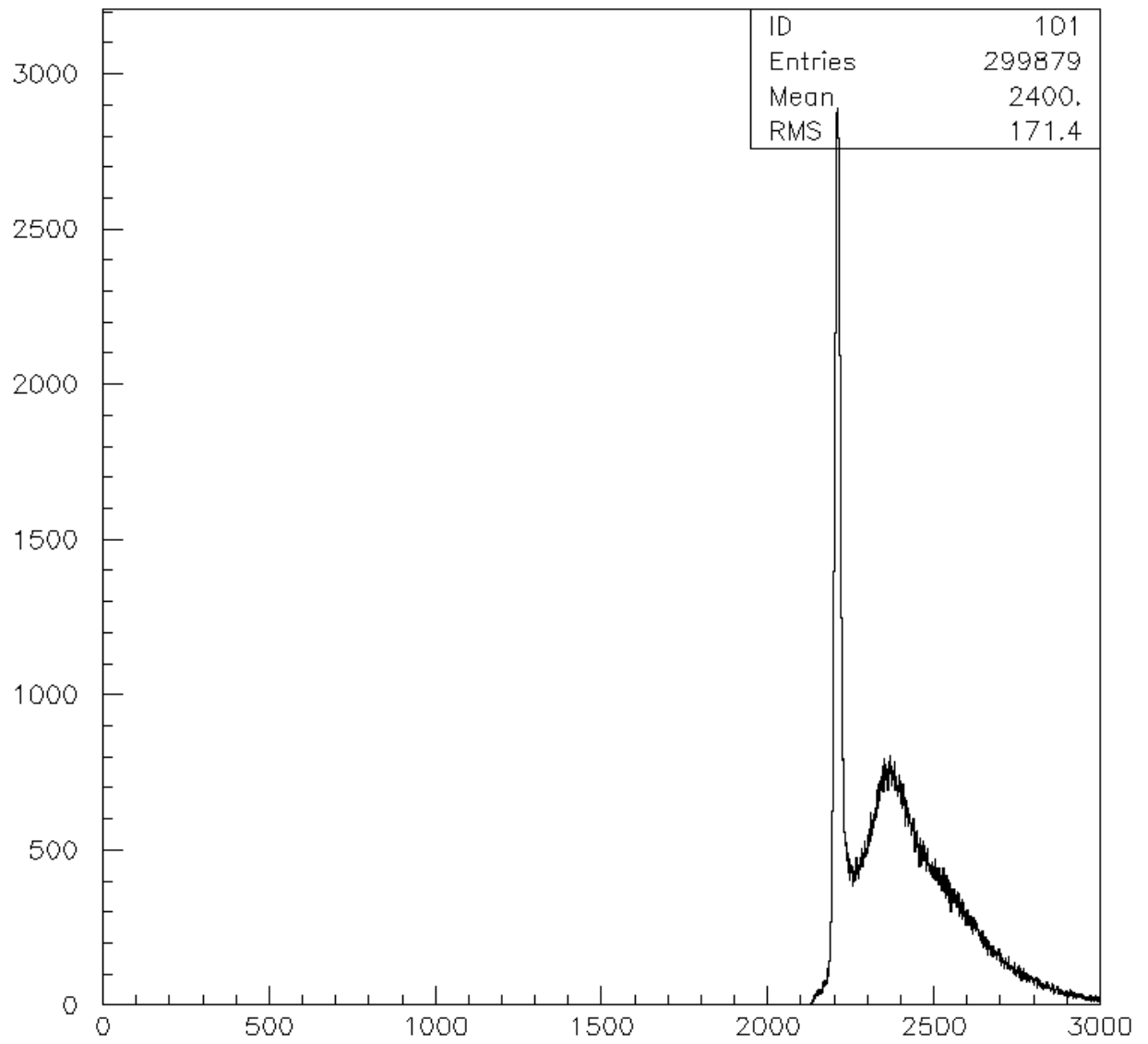
Аналогично сняты распределения и шумы при напряжениях в 5,125 В и 5,25 В



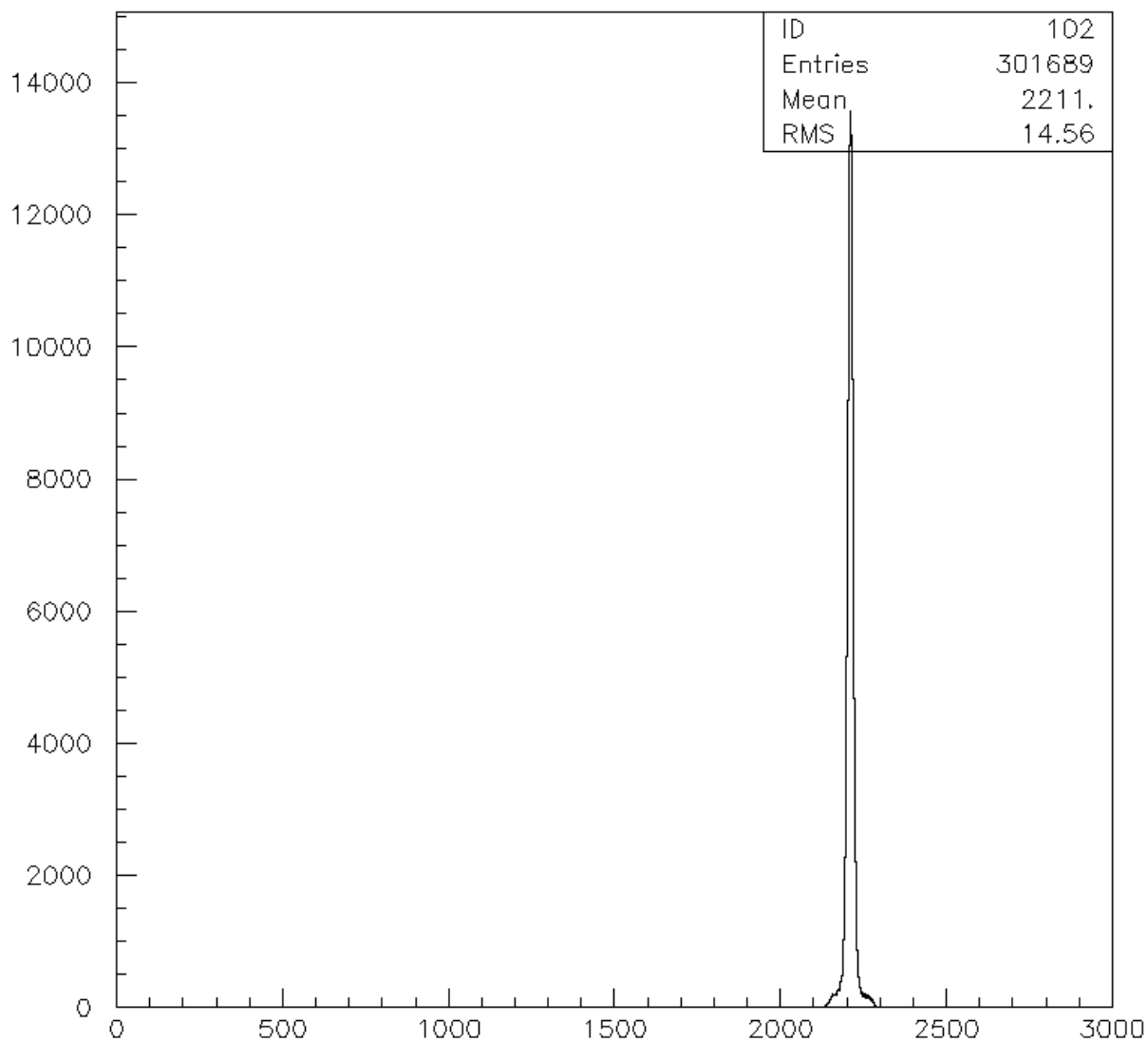
АРИ при 5,125 В



Распределение шумового сигнала



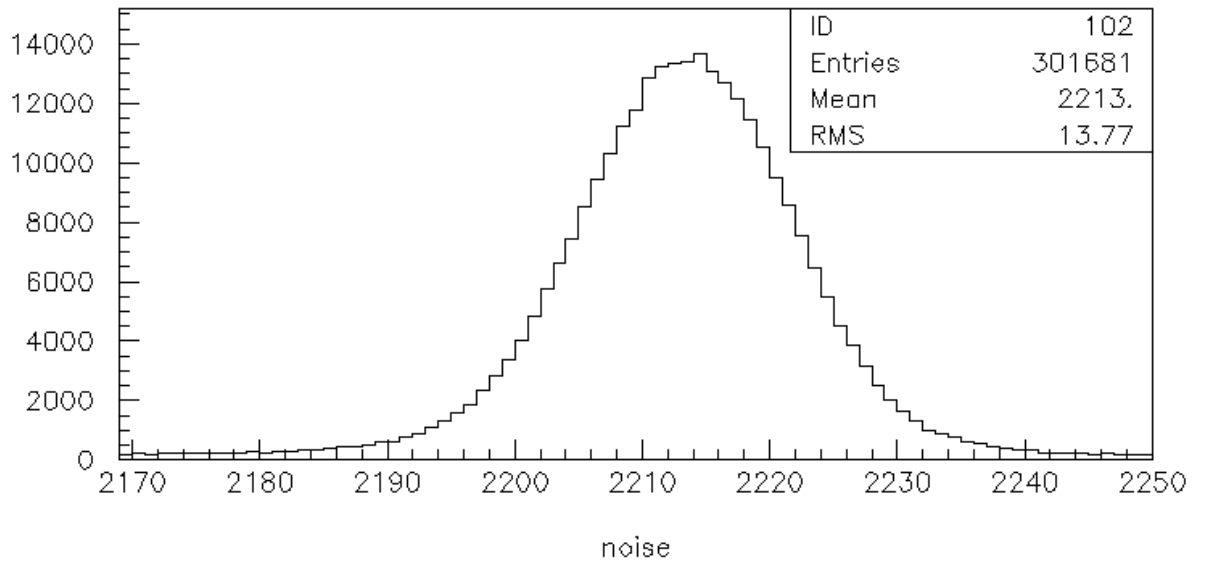
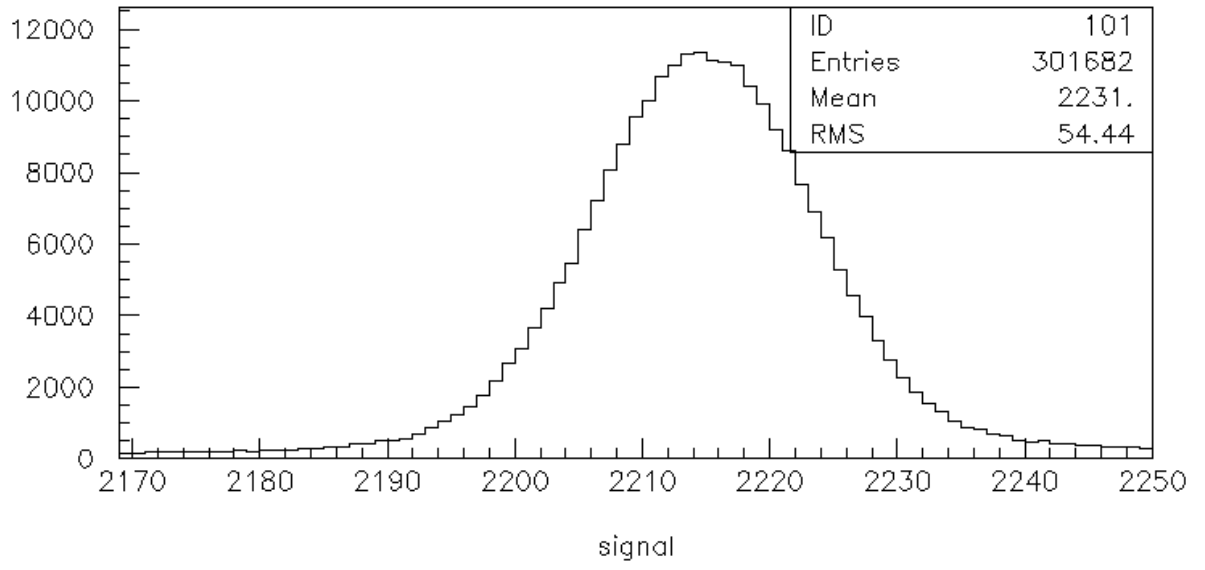
АРИ при 5,25 В



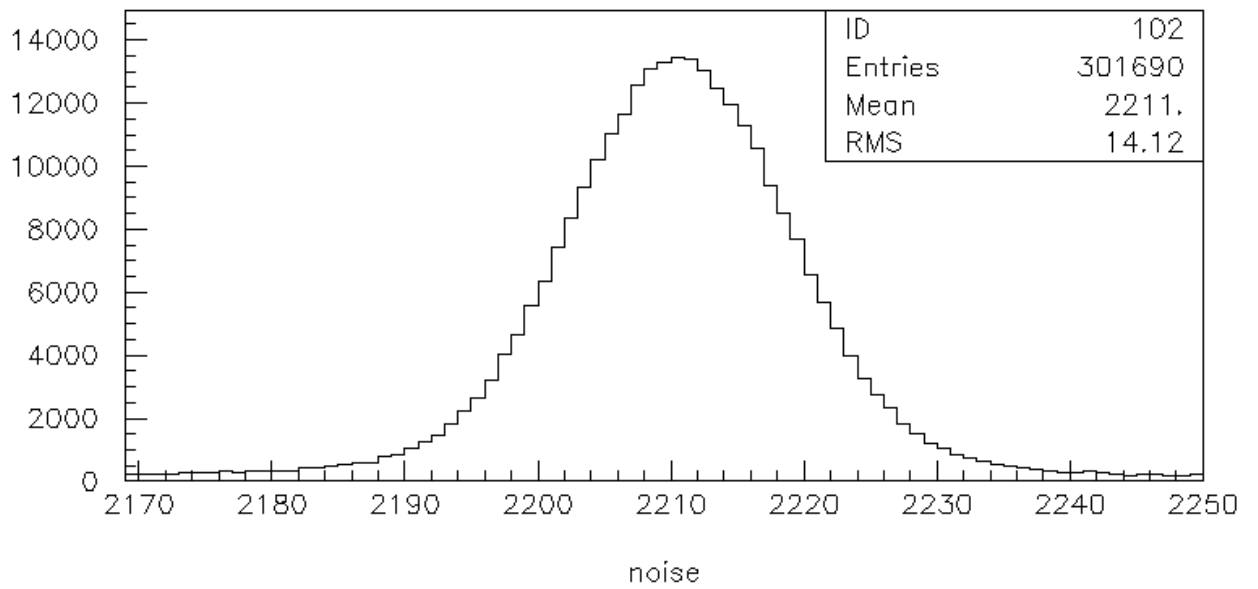
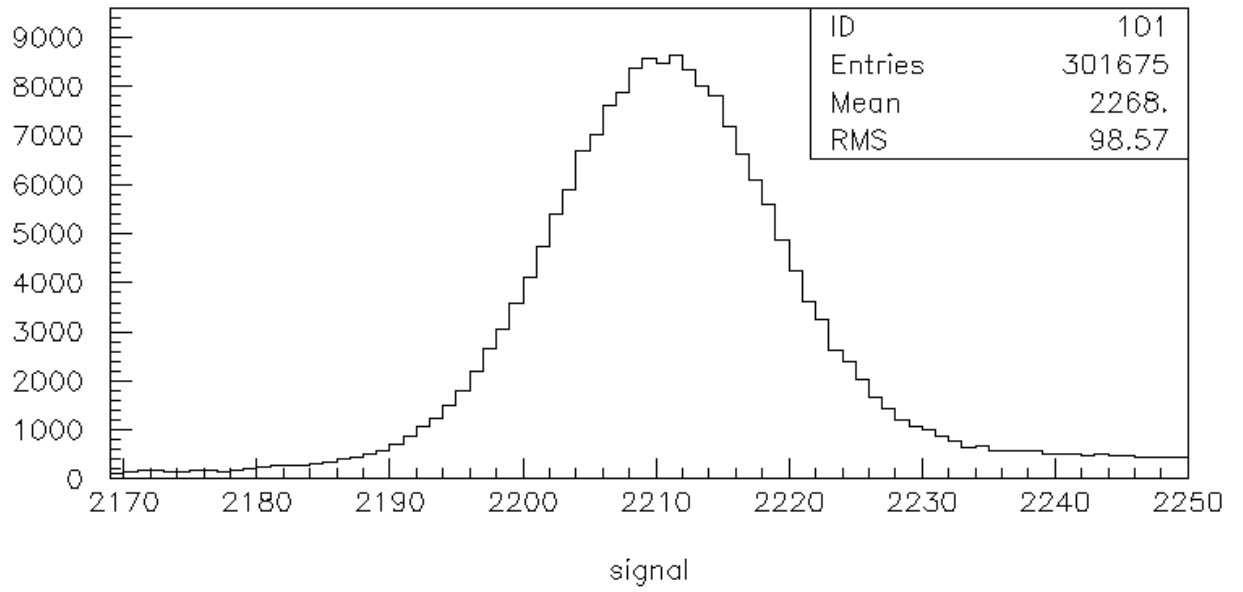
Шумовой сигнал

## ***2. Определение коэффициента усиления.***

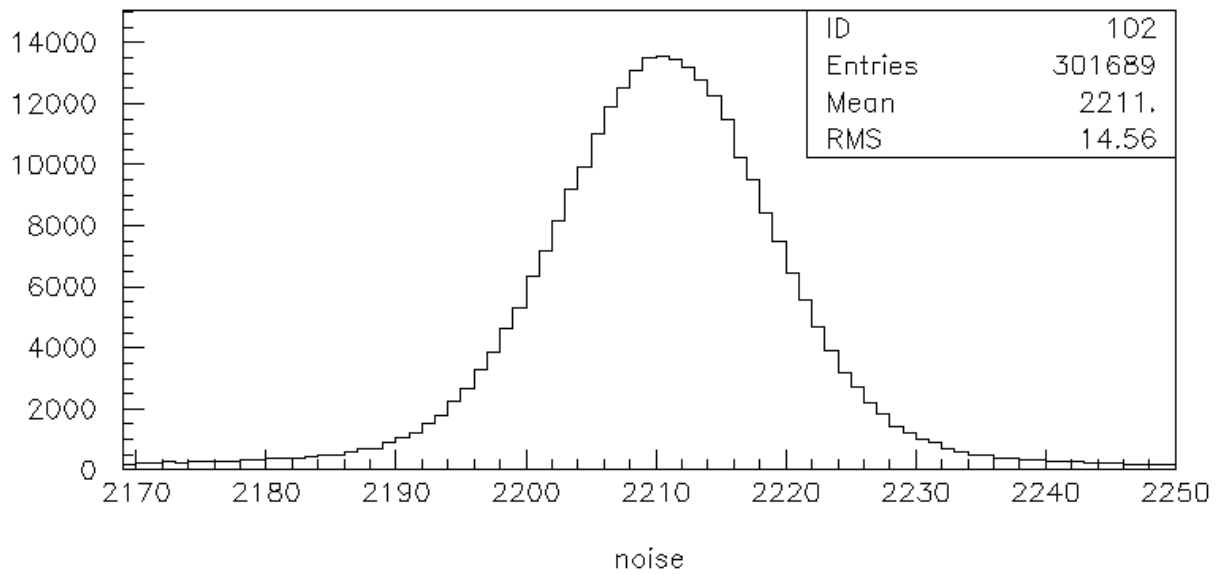
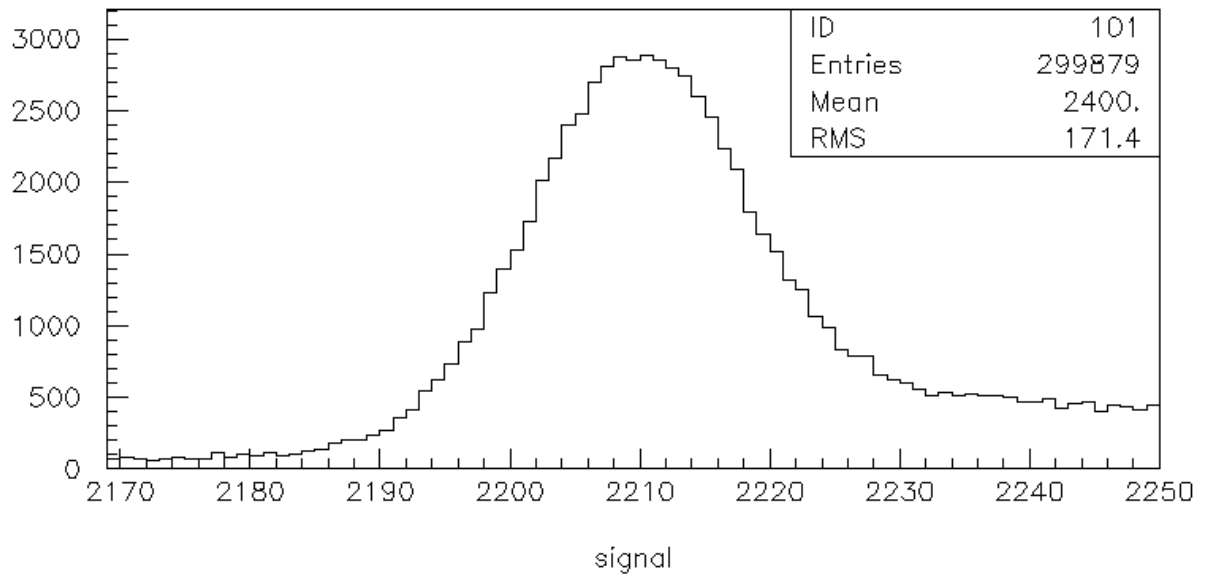
Нужно проверить совпадение бинов нулевого сигнала. Для этого сравним обе гистограммы возле нуля сигнала.



5 B



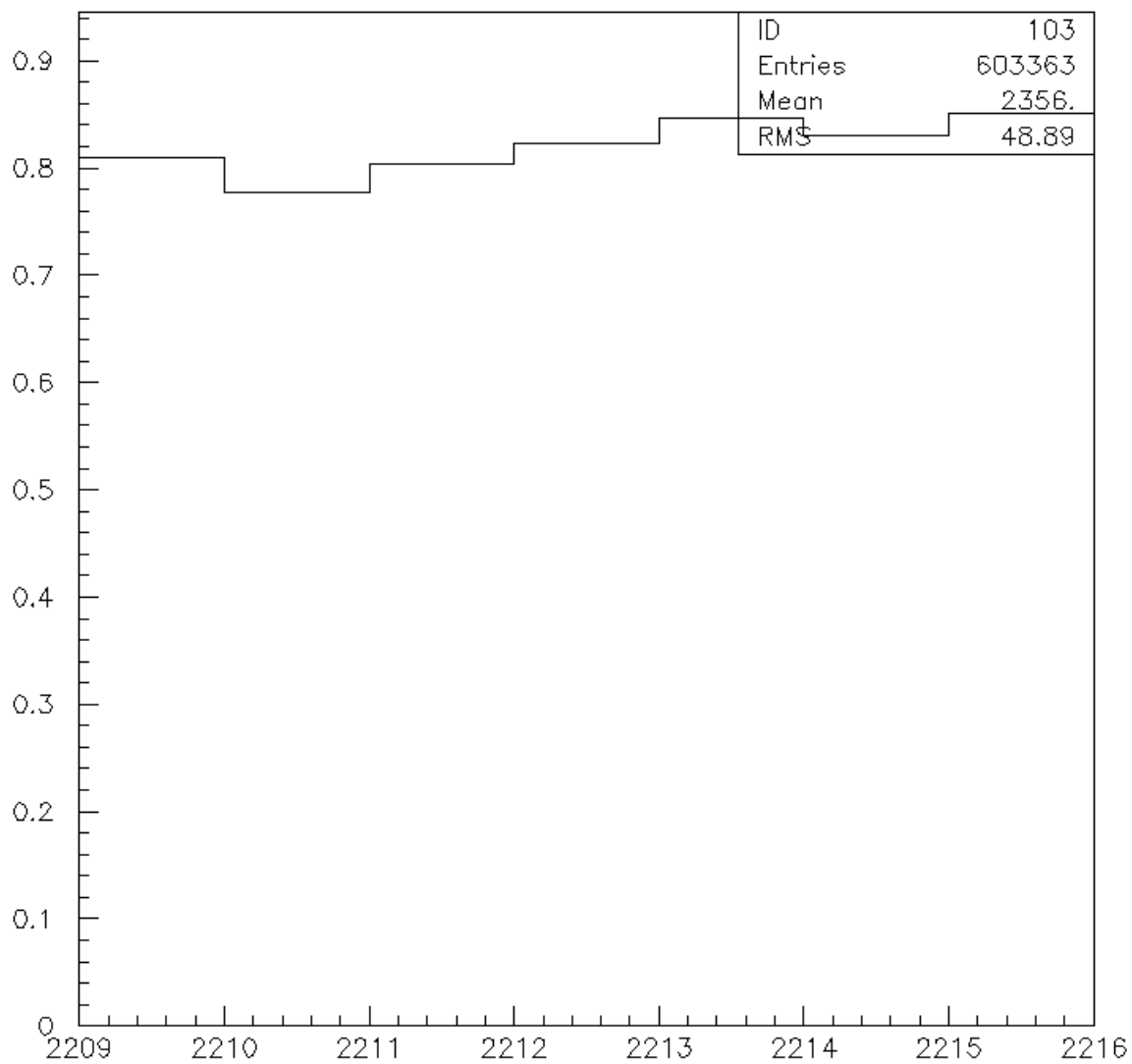
5,125 B



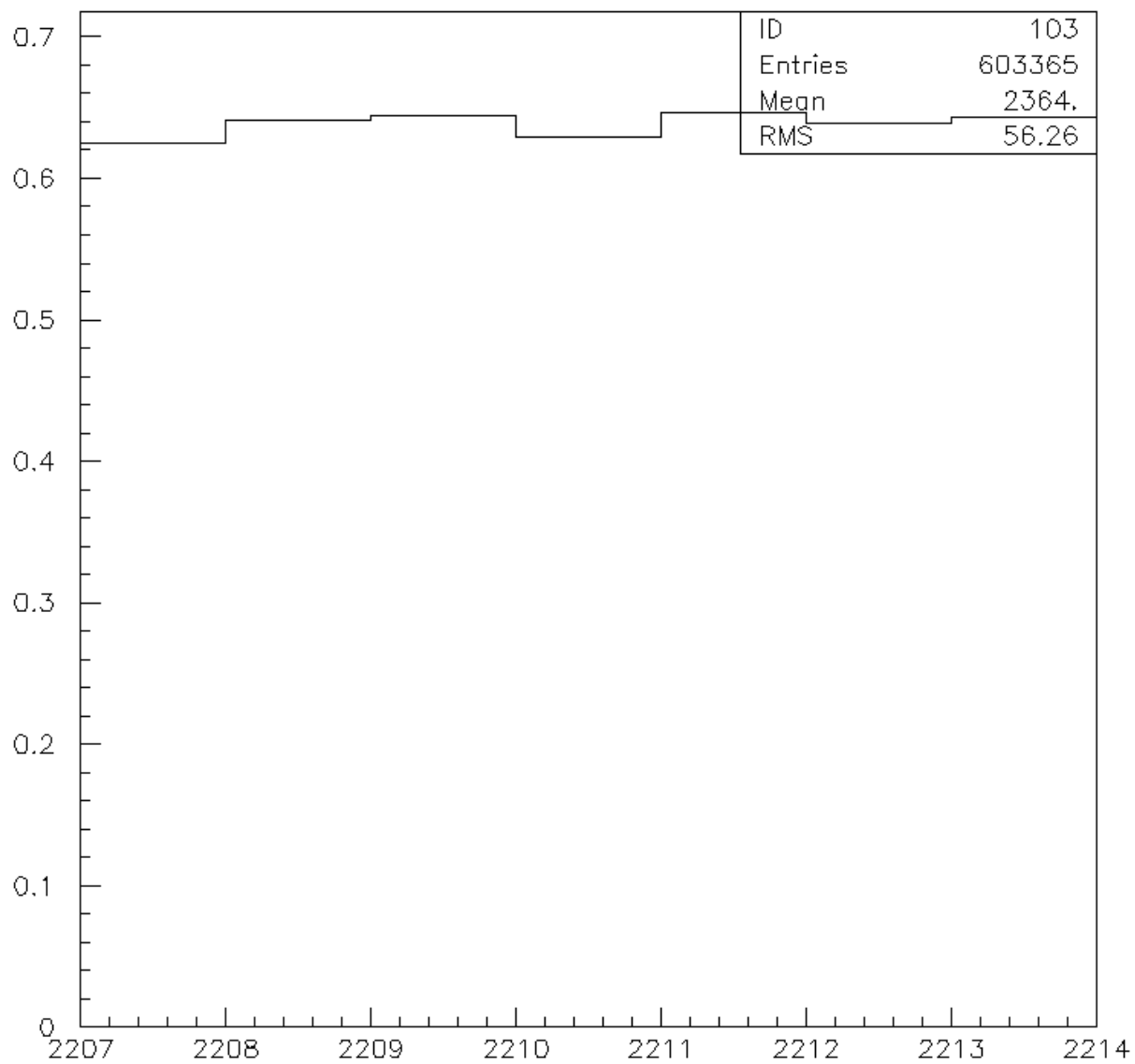
5,25 В

После этого построим гистограмму отношения двух распределений. Нас интересует его значения около канала нуля. В данном случае 2213 для 5 В и 2211 для 5,125 В и 5,25 В.

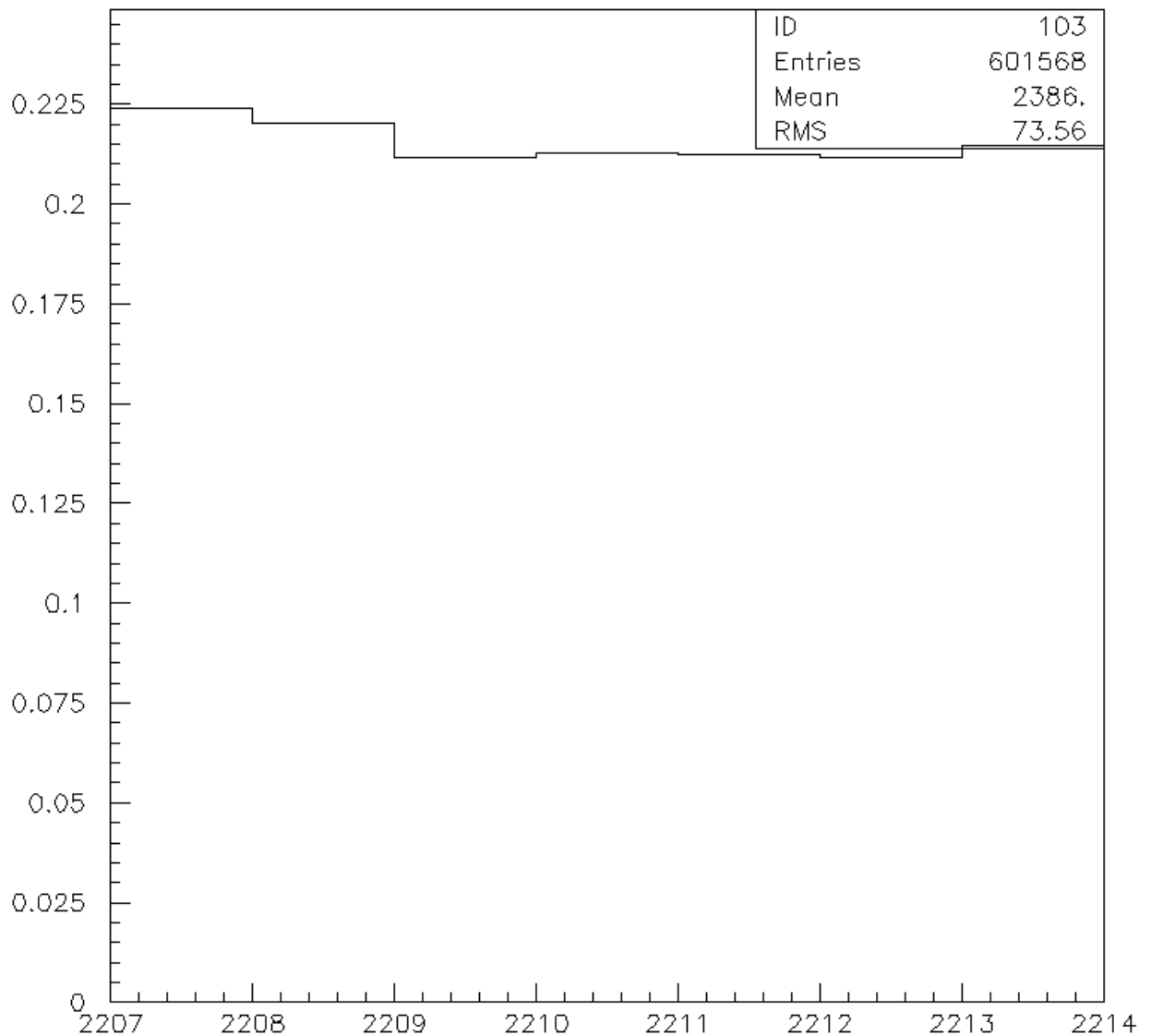




S/N около нулевого пика 5 В



S/N около нулевого пика 5,125 В



S/N около нулевого пика 5,25 В

Таким образом получаем отношения в нуле, с учетом разброса данных:

$$5 \text{ В: } S/N(0) = 0,82 \pm 0,05$$

$$5,125 \text{ В: } S/N(0) = 0,64 \pm 0,05$$

$$5,25 \text{ В: } S/N(0) = 0,21 \pm 0,01$$

Используя среднее значение амплитудного распределения, полученное ранее, рассчитаем коэффициент усиления по следующей формуле:

$$G = A_{1e} * \frac{k}{R * e}$$

Где  $k$  – чувствительность АЦП,  $R$  – входное сопротивление АЦП,  $e$  – заряд электрона.  $A_{1e}$  рассчитывается по формуле (2).

## Результаты

На основе полученных данных построена таблица:

U, В	Бин нуля сигнала, В*с	S/N(0)	$\mu$	$A_{cp}, B*s$	$A_{1e}, B*s$	G	$\Delta G$	$\Delta G$
5	2213	0,825	0,19	28	146	$1,8*10^7$	$1,3*10^6$	7%
5,125	2211	0,64	0,45	57	128	$1,6*10^7$	$0,8*10^6$	5%
5,25	2211	0,21	1,56	189	121	$1,5*10^7$	$1,1*10^6$	8%

Погрешность  $\Delta G$  вычислялась по формуле погрешности сложной функции, учитывая  $\Delta A = 2$  и измеренные  $\Delta S/N(0)$ .

## Выводы и заключения

На основе полученной таблицы построен график зависимости коэффициента усиления (G) от напряжения на светодиоде (U):

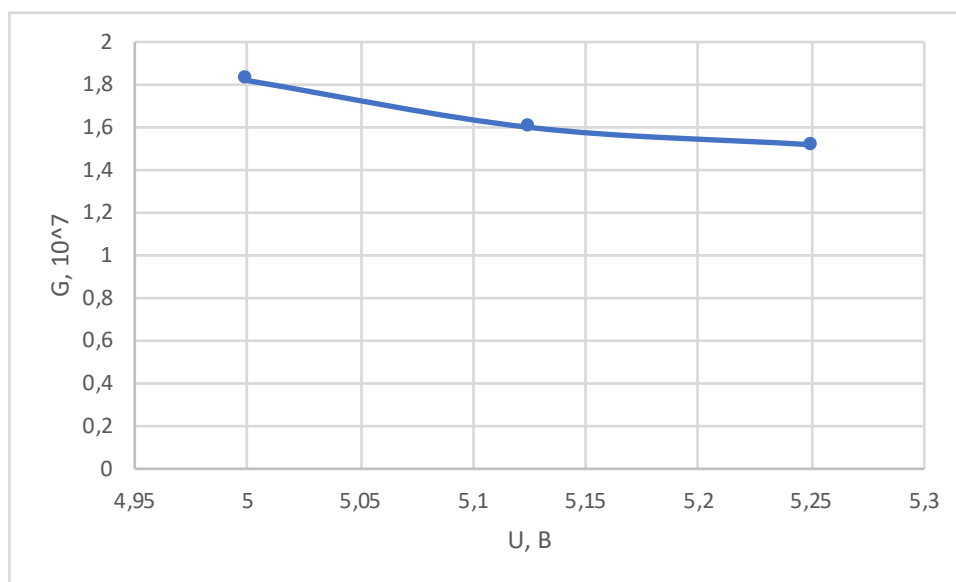


График зависимости коэффициента усиления (G) от напряжения на светодиоде (U)

Изменение величины напряжения на источнике отражается на усилении, что дает возможность в дальнейшем провести измерения линейности ФЭУ

## Список литературы

1. Балдин Е. М. Physics Analysis Workstation (PAW), 2006  
<http://www.inp.nsk.su/~baldin/DataAnalysis/paw-tutor.pdf>
2. Brun, René ; Couet, O ; Vandoni, C ; Zananni, P. Physics Analysis Workstation User's Guide, 1999  
<https://cds.cern.ch/record/2296392/files/paw.pdf>