Калибровка и методика работы с детекторами NaI Арагацкой комплексной установки.

Yerevan Physics Institute

АННОТАЦИЯ

На высокогорной станции Арагаце (3200 м н.у.м) ведется постоянный мониторинг вторичной компоненты космических лучей. Лаборатория оснащена современной аппаратурой, что дает возможность одновременно различные компоненты космических лучей. Анализ получаемых энергетических спектров и корреляций между потоками различных частиц, позволяют не только изучать атмосферные явления , но и дают возможность делать выводы о теории прохождения частиц через атмосферу при сильных электрических полях. Такие поля образуются при грозовых явлениях и приводят к повышению потоков релятивистских электронов, гамма-излучения и нейтронов (TGEs). Подобные события многократно наблюдались детекторами, расположенными на станции. Использование на в\с Арагаце сети из 8 счетчиков NaI(Tl) (легированных таллием йодида натрия). позволило вести наблюдения за потоками гамма – квантов и делать выводы о процессах их ускорения и умножения при грозовых явлениях.

Параметры и конструкция детектора NaI

Монокристалл NaI(Tl) (активированный таллием) является классическим детектором для обнаружения

гамма-излучения промежуточной и низкой энергии [1 Grupen C., 1996]. Он обладает высокой эффективностью люминесценции и может быть выполнен в широком диапазоне размеров и форм. Кристалл гигроскопичен, поэтому его помещают в герметичный корпус. Его параметры следующие: - плотность – ρ-3.67г/см^3 , радиационная длина λ - 2.4см, время затухания света, составляет около т ≈0,23 мкс. Длина волны в максимуме спектра излучения фотонов λ_{max} = 410 нм. Коэффициент температурного расширения — т- 47.4 10^{-6} C^{-1}, температурная зависимость световыхода - -0.3% C^{-1} , световыход — 38 фотонов/КэВγ .

Кристалл размерами 12,5 х 12,5 х 30 см, помещен в герметичный алюминиевый корпус, толщиной 1 мм., с прозрачным слюдяным окном с торцевой стороны. К прозрачному окну прикреплен ФЭУ-49, имеющий большой фотокатода (15 см в диаметре) и обеспечивающий полное перекрытие торцевого окна кристалла. Спектральный диапазон чувствительности фотокатода ФЭУ-49 составляет 300-850 нм, и охватывает весь спектр излучения кристалла NaI (Tl). На Рис.1 показаны элементы конструкции детектора.

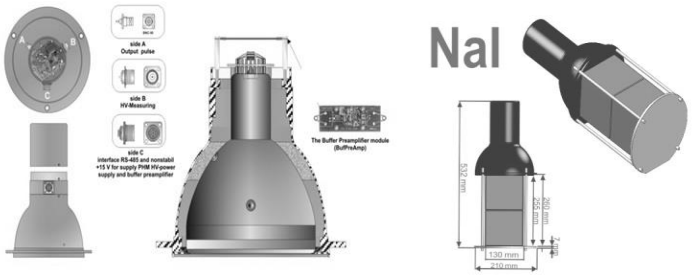


Рис.1 Конструкция детектора NaI (Tl)

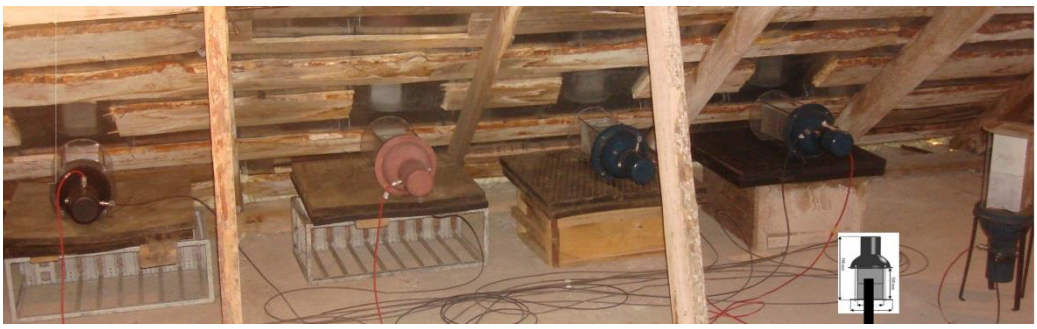


Fig. 2. NaI(Tl) detectors installed at Aragats station

Для регистрации потоков вторичных космических лучей используется Система Сбора Данных (ССД), которая состоит из 8-и канального модуля логарифмического аналого-цифрового преобразователя (LADC), цифро-аналогового преобразователями (DC) для настройки порогов, микроконтроллера и последовательного интерфейса (USB, RS-232, RS-485) для подключения к компьютеру.

Для питания ФЭУ используются регулируемые высоковольтные преобразователи **PHV 12-2.0 K 2500 P** 0... +2000 VDC 2.5 mA. Серия PHV - это регулируемые миниатюрные высоковольтные силовые модули использующие SMD и гибридную технологию. Использование компонентов высокой стабильности гарантирует минимальный температурный дрейф и очень стабильное выходное напряжение.. Напряжение первичного питания модуля от +10 до +15В. Электроника ФЭУ и блока ССД- ADAS, питается от низковольтного источника постоянного тока 12В и потребляет около100Вт, что позволяет использовать автономные системы резервного электропитания (например аккумуляторы или солнечные батареи).

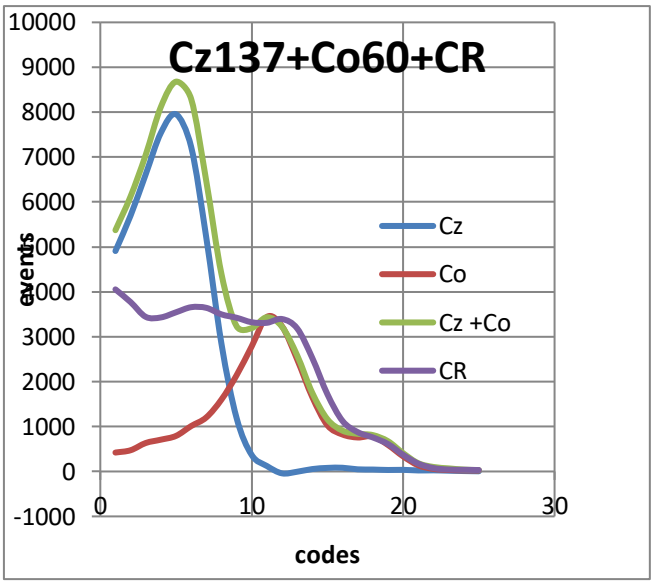
Специфика работы Log ADC подробно описаны [2-4]. Их динамический диапазон составляет x200, а амплитуда определяется кодом, который соответствует энергии, оставленной частицей при прохождении кристалла. Предполагая, что энерговыделение в детекторе пропорционально заряду импульса на аноде ФЭУ, можно написать:

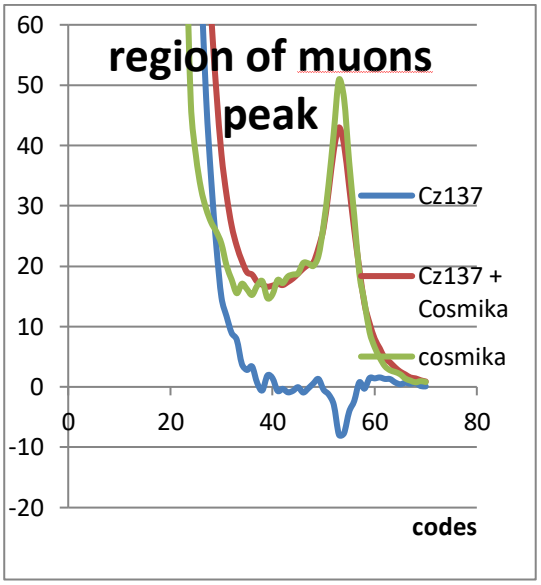
$$\mathbf{K=d*ln(E_K/E_{MIP}) +K_{MIP}}\ , \qquad (1)$$

где **d** – декремент затухания ударного контура, **K** – цифровой код, соответствующий энерговыделению $\mathbf{E_K}$ в детекторе , $\mathbf{K_{MIP}}$ - код минимума ионизационных потерь мюонов в кристалле NaI(Tl) равный: dE/dX ≈ 1.305 МэВ/(г/см^2). Моделирование показало, что наивероятная длина пути частиц в теле кристалла составляет 12.5 см, или ≈ 46 г/см^2 и $\mathbf{E_{MIP}}$ ≈ 60МэВ. Значение кода $\mathbf{K_{MIP}}$, соответствующее энерговыделению $\mathbf{E_{MIP}}$, устанавливается высоким напряжением ФЭУ исходя из необходимого динамического диапазона, порога регистрации и т.д., требуемых экспериментом.

Для правильного восстановления значений потерь энергий исследуемых частиц, необходимо точное определение параметра **d.** Для его определения необходимо иметь как минимум две калибровочные точки с известными значениями кодов Log ADC, и соответствующим им значениям энерговыделения в детекторе. Такие значения были получены при использовании изотопов 137Cz (662 кэВ), Co60 для которого наиболее вероятным является каскадное

испускание гамма-квантов с энергией 1,1732 МэВ и 1,3325 Мэв и значения наиболее вероятных потерь энергии CR-мюонов при их прохождении кристаллов NaI (Tl) (60 МэВ) (рис. 2 и 3).





Результаты калибровочных измерений 137Cz и Co60 детектором NaI(Tl).

Энергетическое разрешение детекторов определялось с помощью изотопа 137Cz, которые представлены в таблице 1. Там же приведены значения d для каждого используемого канала АЦ\ полученные по значениям max кода от 137Cz и max кода CR-мюонов.

Table 1. Energy resolution of NaI (Tl) detectors at 662 keV and the ADC scale factor.

Det.	FWHM (MeV)	σ =FWHM/2.	σ (%)	d

		355		
1	0.44	0.187	29	11.2
2	0.4	0.168	25	10.9
3	0.4	0.168	25	11.1
4	0.34	0.143	22	11.4
5	0.34	0.143	22	11.2

Имея генератор высокочастотных сигналов можно провести ряд калибровочных измерений, и более точно оценить параметры используемых LogADC:

1. Получить более точно значения декремента для каждого канала
2. Выяснить изменение работы **LogADC** от увеличения интенсивности потока частиц
3. Оценить влияние устанавливаемого порога на величину регистрируемого импульса
4. Определить изменение значения кода в зависимости от величины подаваемого сигнала

Для правильного восстановления **Scale factor d** проводилось определние зависимости код-амплитуда для 5 значений амплитуд в отдельности для каждого канала.

50 mV- (A1), 200mV-(A2), 500mV (A3),

1V - (A4), 1.5V- (A5).

Ниже приведены средние значения Scale factor d для каждого канала LogADC

1 -10,27 ; 2 -10,69 ; 3 - 10,46 ; 4 - 10,43 ;

5 - 10,45 ; 6 - 10,16 ; 7 - 10,45 ; 8 - 10,62.

Точность определения параметра d для каждого канала была не хуже 5% . При этом среднее значение для всех каналов можно принять all

Dср = 10,44 σ= 0, 1593 ;

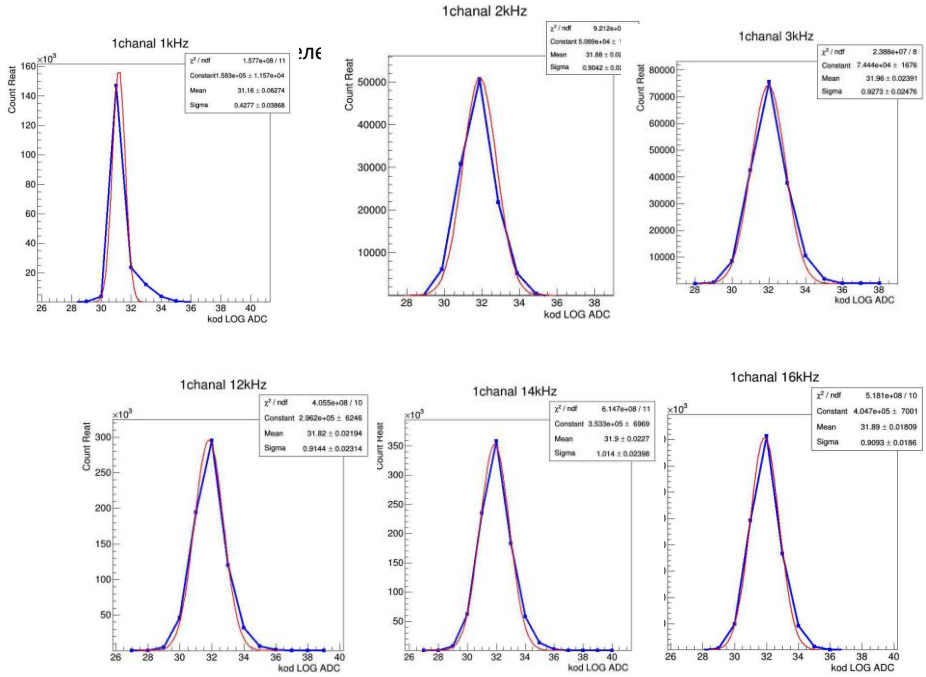
Определение влияния увеличения интенсивнисти потока сигналов на смещение кода регистрации LogADC.

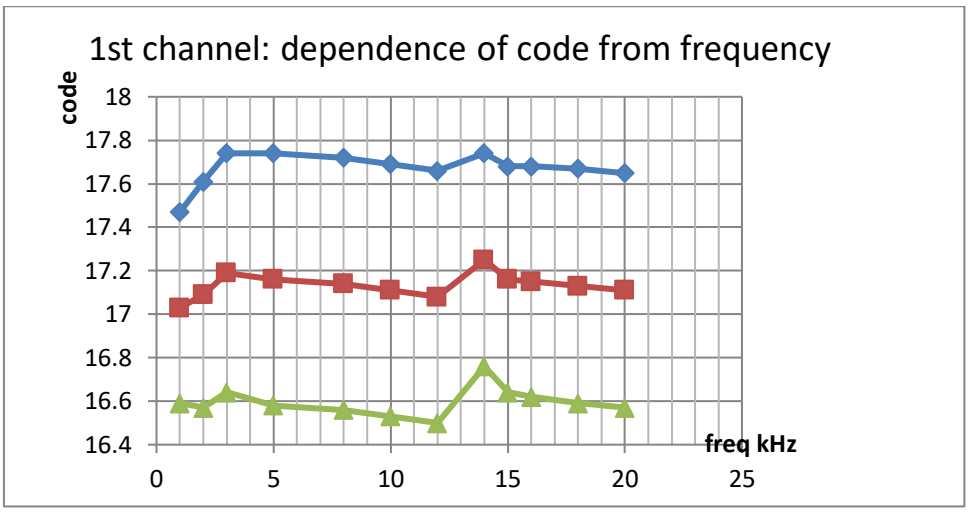
Другим важным параметром используемого **LogADC** является стабильность регистрации потока частиц в зависимости от частоты их следования. С этой целью генератором выдавал импульсы имитирующие сигналы детектора. Исследования проводились как при загрузке одного канала, так и при одновременной подаче сигналов на все каналы. Проверка стабильности работы **LogADC** при увеличении частоты следования потока проводилась импульсами амплитудой А=70мВ и длительностью 500нсек. При d=10,5 это соответствует энергии **около 2 мэв.**

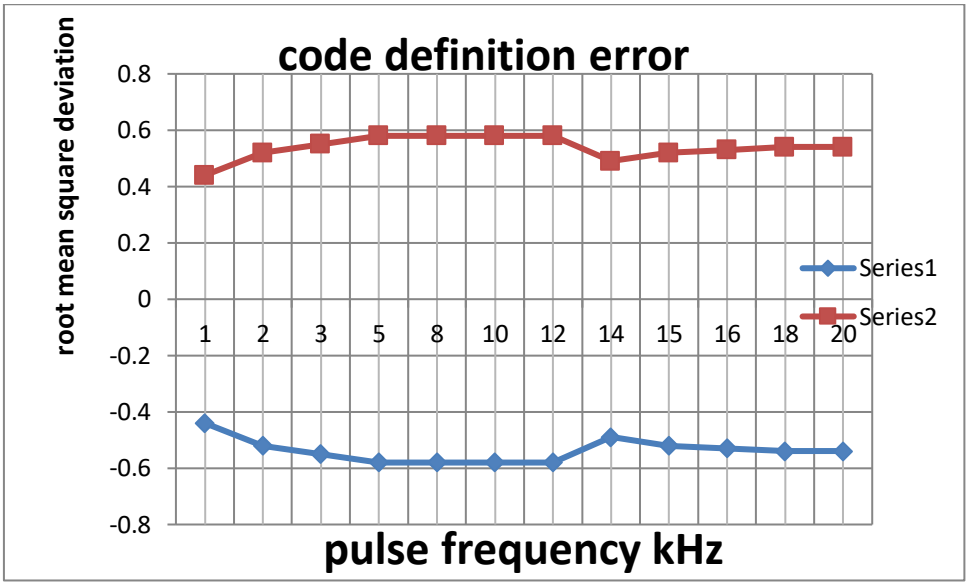
cod	freq kHz
17.03 +/-0,44	1
17,09 +/- 0,52	2
17,19 +/- 0,55	3
17,16 +/- 0,58	5

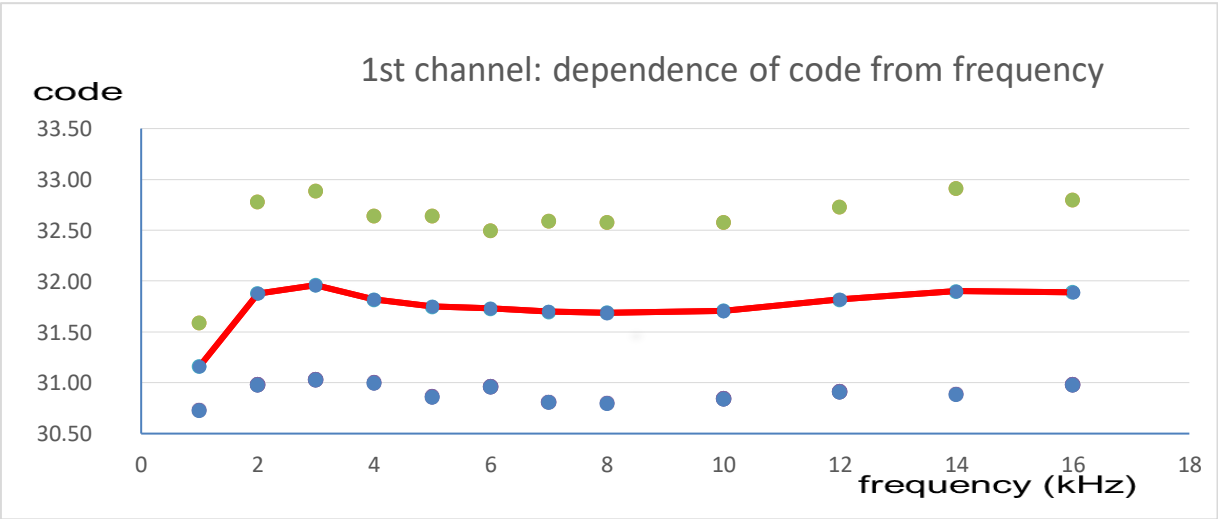
17,14 +/- 0,58	8
17,11 +/- 0,58	10
17,08 +/- 0,58	12
17,25 +/- 0,49	14
17,16 +/- 0,52	15
17,15 +/- 0,53	16
17,13 +/- 0,54	18
17,11+/- 0,54	20

Как видим вплоть до частоты 20 кГц смещения кода практически не надлюдается . Для каждой частоты следования сигналов считалось, что полученный результат подчиняется гауссовскому распределению и величина кода определялась по значению средней и дисперсии.




1st channel: dependence of code from frequency
code
18
17.8
17.6
17.4
17.2
17
16.8
16.6
16.4
0
5
10
15
20
25
freq kHz

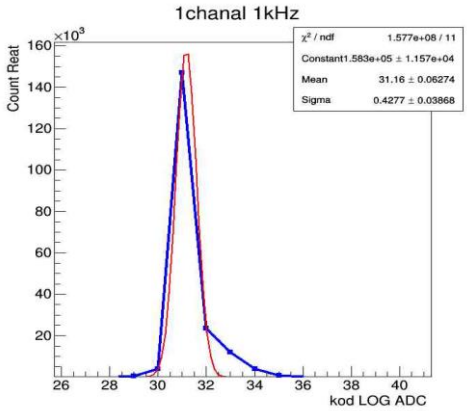

code definition error
root mean square deviation
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
1
2
3
5
8
10
12
14
15
16
18
20
Series1
Series2
pulse frequency kHz

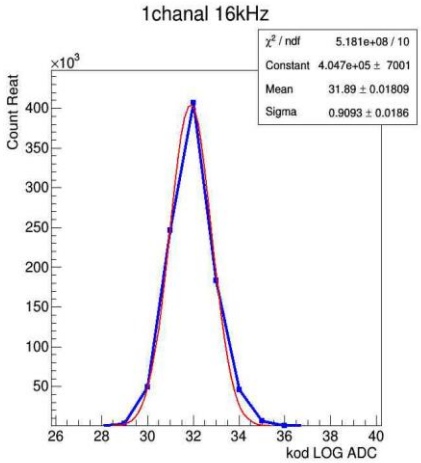

1st channel: dependence of code from frequency
code
33.50
33.00
32.50
32.00
31.50
31.00
30.50
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
frequency (kHz)

Значения кода в зависимости от частоты следования сигналов

Как видим из полученных графиков с увеличением частоты следования сигналов код регистрации данного сигнала меняется менее чем на 5%. Т.е. вплоть до частоты 20 кГц смещения кода практически не надлюдается.

Точность определении кода фитировалась гауссом :





Далее проверялась работа **LogADC** при одновременной загрузке всех восьми каналов на разных частотах .

F kHz	ch1	ch2	ch3	ch5	ch6	ch7	ch8
3	31,8	31,1	29,6	28	29,9	30,6	31,7
6	31,3	31	29	28	29,6	30,1	31,4
8	31,6	31	29,1	28	29,7	30,2	31,5
10	31,4	31	29,1	28	29,8	30,3	31,6
сред	31,5	31,05	29,2	28	29,7	30,3	31,5

σ 0,125 0,005 0,18 0,045 0,125 0,045

Полученные результаты показали что вплоть до частоты 10 кГц при одновременной подаче сигналов на на все 8 каналов LogADC работает стабильно и подаваемые сигналы попадают практически в один и тот же код.

Измерения фона регистрируемого при работе детектора NaI(Tl)

Природные источники радиационного фона делятся на естественные радиоактивные вещества и космические лучи. Источником естественных радиоактивных веществ поступают в окружающую среду являются горные породы. Радиационный фон на гранитных скалах обусловлен тем, что в граните есть примеси, урана и тория. При распаде ядер урана образуется в том числе радиоактивный газ радон. Главным источником поступления радона в закрытые помещения является грунт. Просачиваясь через фундамент и пол из грунта или высвобождаясь из материалов, использованных при строительстве дома, радон накапливается в закрытых непроветриваемых помещениях. Среди изотопов радона известны: 222Rn(Наиболее опасным) с периодом полураспада 3,8 дня, 220Rn с периодом полураспада 54,5 с, 219Rn с периодом полураспада 3,9 с.

Другой распространенный по величине создаваемой активности радиоизотоп является изотоп калия 40К.

Несмотря на то что ядра калия-40 распадаются крайне редко, большое число этих ядер вокруг нас делает присутствие изотопа вполне заметным.

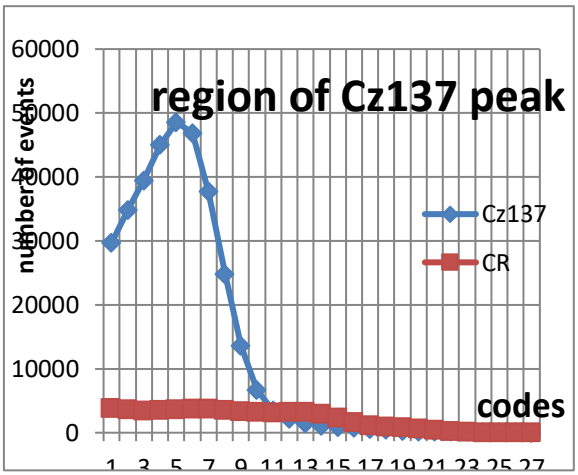
Учитывая, что исследуемые нами физические процессы основаны на постоянном мониторинге потоков частиц КЛ, большой интерес представляет выяснение компонент, составляющих фон регистрируемый нашими приборами. Для решения этой задачи нами использовались несколько детекторов с разным разрешением. Во-первых мы исследовали фон одним из наших рабочих детекторов NaI(Tl). Далее нами был изготовлен счетчик на основе кристалла NaI(Tl) размерами высота- 50 мм, диаметр- 45 мм и наконец мы использовали спектрометр ORTEC для которого бала разработана программа, позволяющая использовать его в режиме постоянного мониторинга.

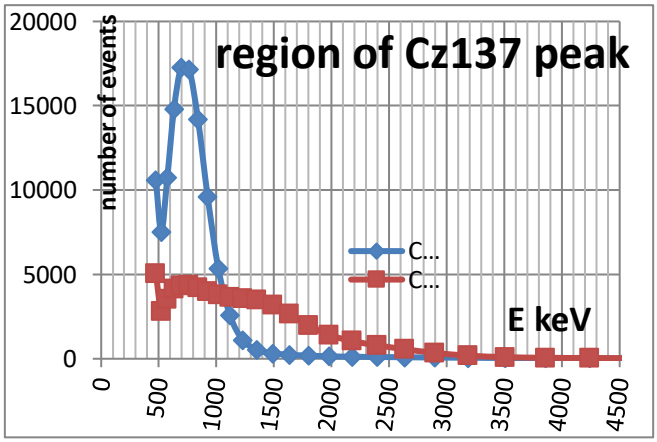
Измерения фона рабочим детектором NaI(Tl)

Измерения проводились в рабочей комнате, в открытом поле и в подвале здания с помощью большой детектора NaI(Tl)(одного из наших рабочих счетчиков) который калибровался источником **Cz137 .** Напряжение на ФЭУ было 1700в., при этом пик от источника Cz137 был на 5 коде, а пик от

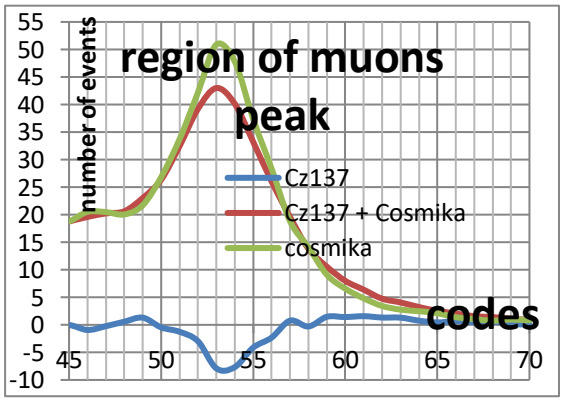
одночастичного спектра мюонов на 52-53. Скорости счета в фоновом режиме составляла - 930 ч/сек, а вместе с источником Cz137 - 3600ч/сек. **(Отметим что при установки источника на детектор интенсивности потока увеличилась в 4 раза, однако смещение мюонного пика при этом не наблюдалось**).

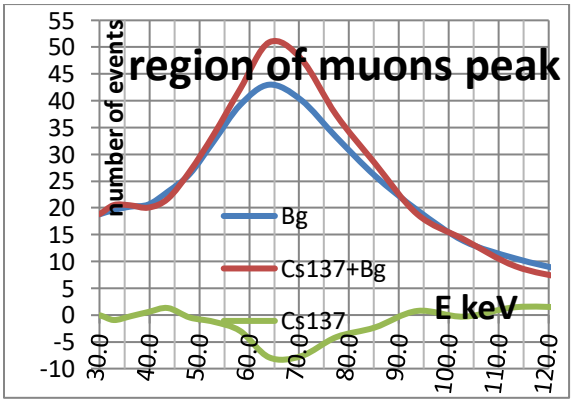
Результаты калибровочных измерений приведен на графике. В этом случае декремент **LogADC** , получился d = 10,5, а разрешение детектора- 25%.





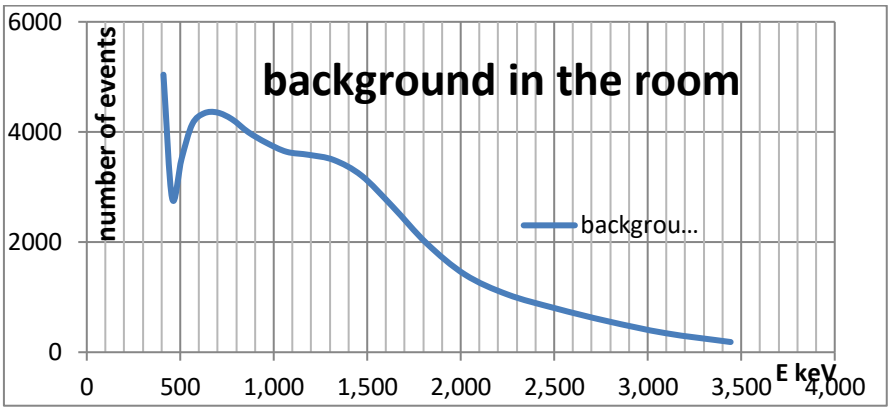
Калибровочные измерения фона (область Cz137)



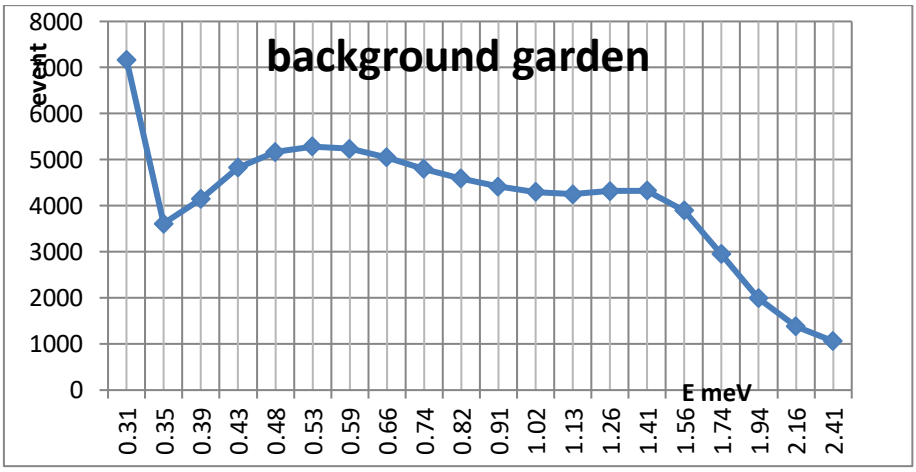


Калибровочные измерения фона(область μ-пика)

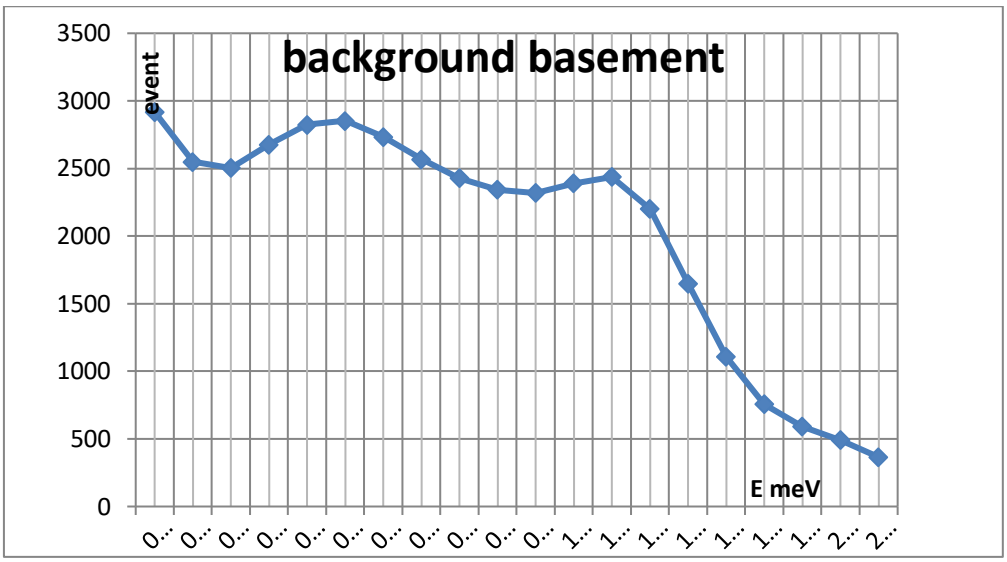
Проведя калибровочные измерения мы перешли к измерению фона в комнате, на открытом пространстве и в подвале здания. На графиках ниже приведены полученные результаты .



Измерения фона в комнате



Измерения фона в саду

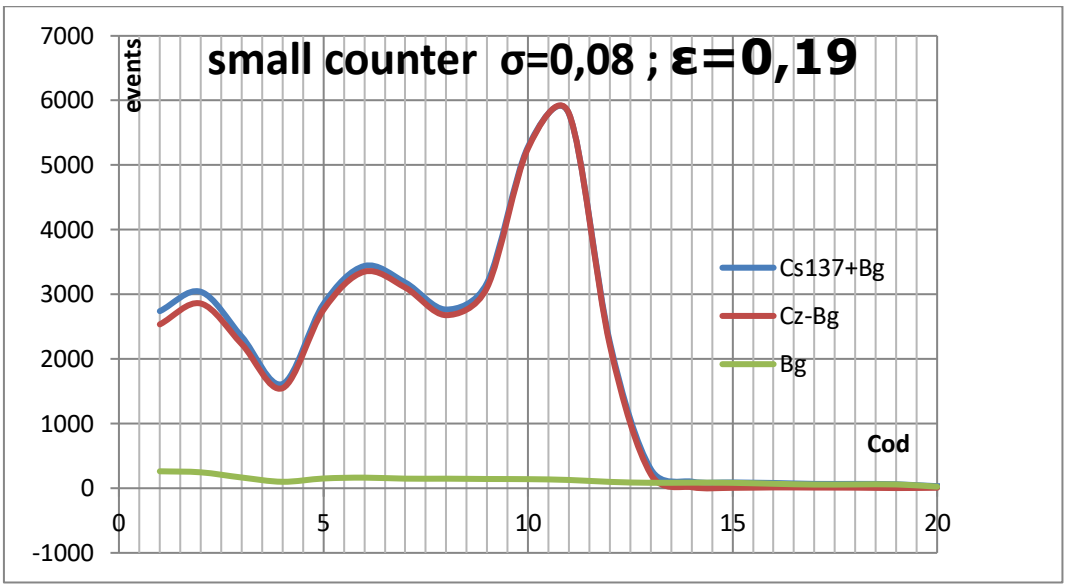


Измерение фона в подвале .

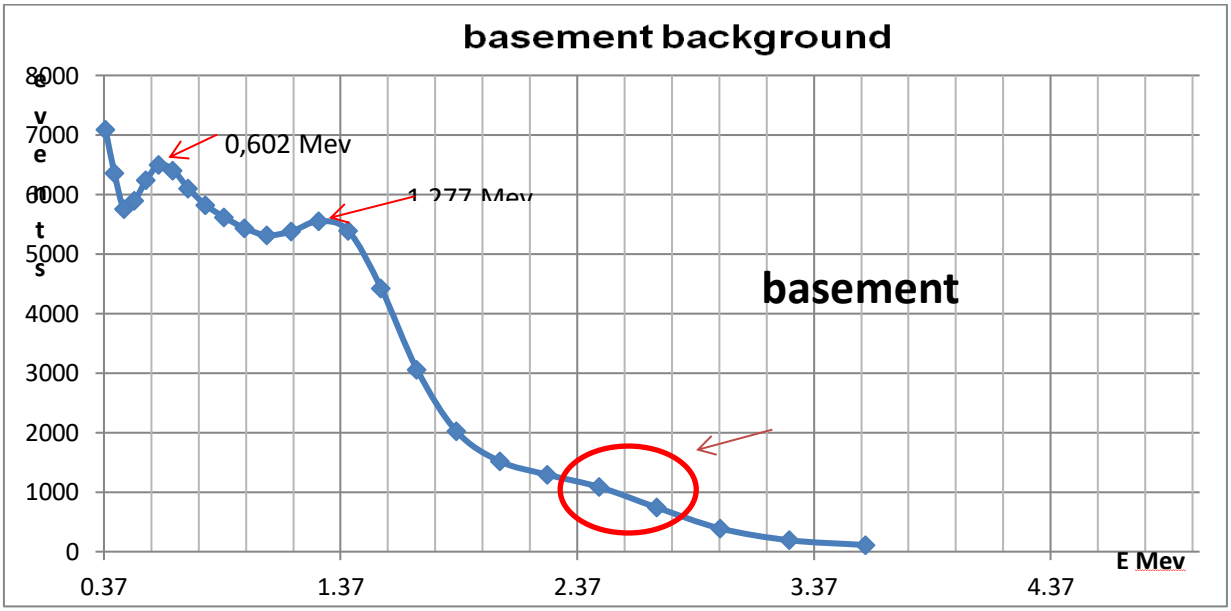
Из полученных результатов следовало , что разрешение рабочего детектора не позволяет получить достоверную информацию о компонентах фоновых событий.

Измерения фона маленьким счетчиком NaI(Tl)

При использовании небольших кристаллов разрешение счетчика должно быть лучше. Поэтому нами был сконструирован небольшой счетчик состоящий **из кристалла NaI(Tl) диаматром 45мм и высотой 50мм и ФЭУ 30.** Подбор сопротивлений для динодов ФЭУ и выбор режима питания производился на специальном стенде. Калибровка изготовленного счетчика проводилась изотопом Cz137 с помощью стенда состоящего из используемых нами log ADC со своей системой съема информации. Результаты приведены на графике.



Как видим разрешение этого счетчика около 20%. Измерения проведенные в подвале здания приведены на графике.

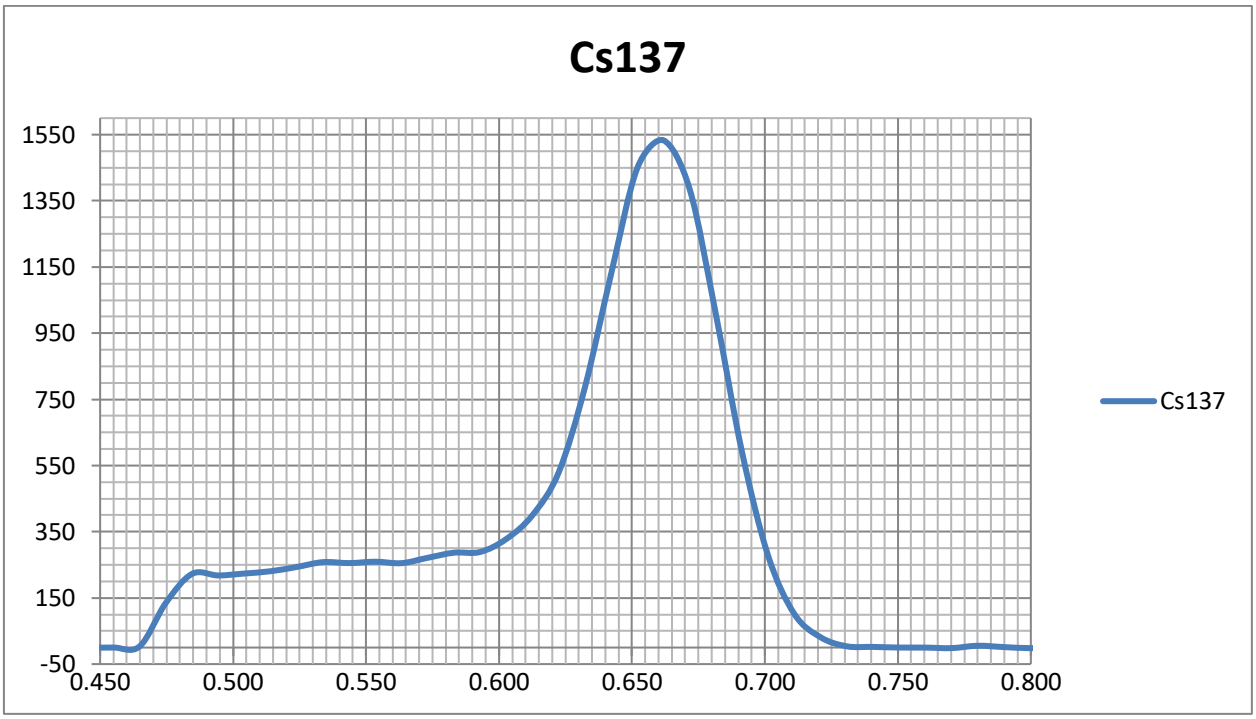


Измерение фона малым счетчиком в подвале

Как следует из графика этот счетчик также не позволяет идентифицировать компоненты фона .

Измерения фона гамма спектрометром ORTEC

Для проведения работ со спектрометром ORTEC необходимо было провести ряд калибровочных измерений для определения его линейности при измерениях энергии регистрируемых событий, а также определить его разрешение. С этой целью нами использовались изотопы Cs137 и Co60

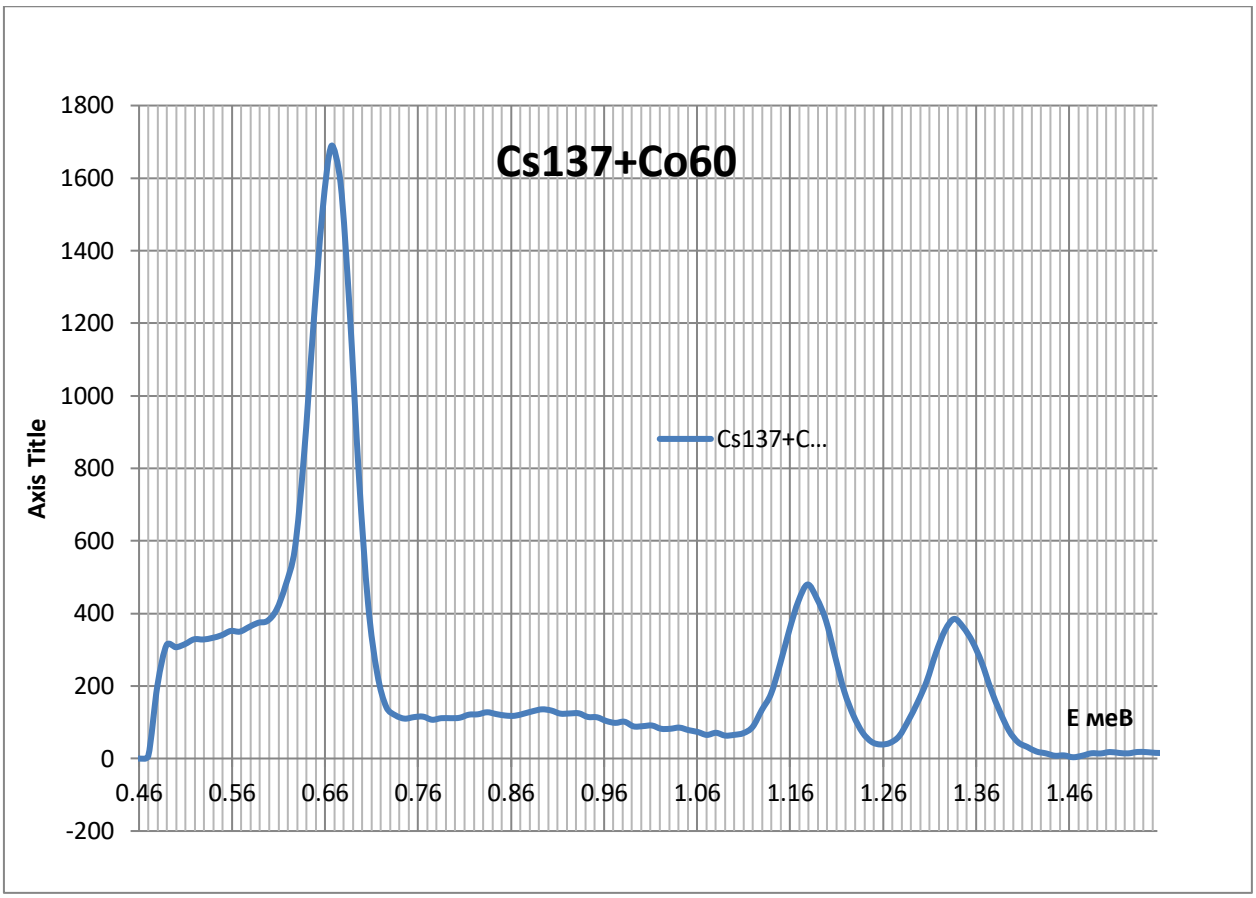


Измерение изотопа Cs137 спектрометром ORTEC.

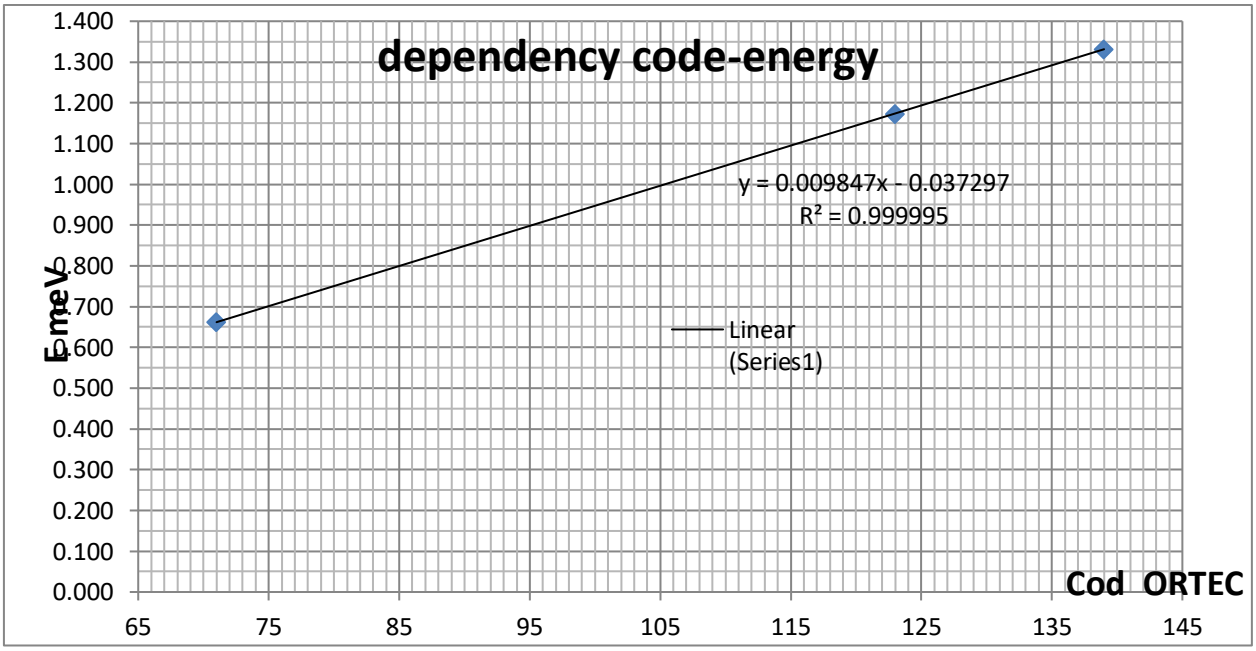
Полученный результат показал что разрешение этого прибора : 2*(0.685-0.662)/0.662 = 0.0694. или7%

Для определения линейности и калибровки энергетической шкалы **ORTEC,** одновременно проводились измерения от 2 источников

измеряемой энергии спектрометром одновременно фиксировалась энергия от источников Cs137 и Co60. Поскольку пик от Cs137 приходится на энергию 0.662меВ, а Co60 имеет 2 пика на 1.17 меВ и на 1.33меВ, то мы имеем возможность по 3 точкам определить переход от кодов к энергии.



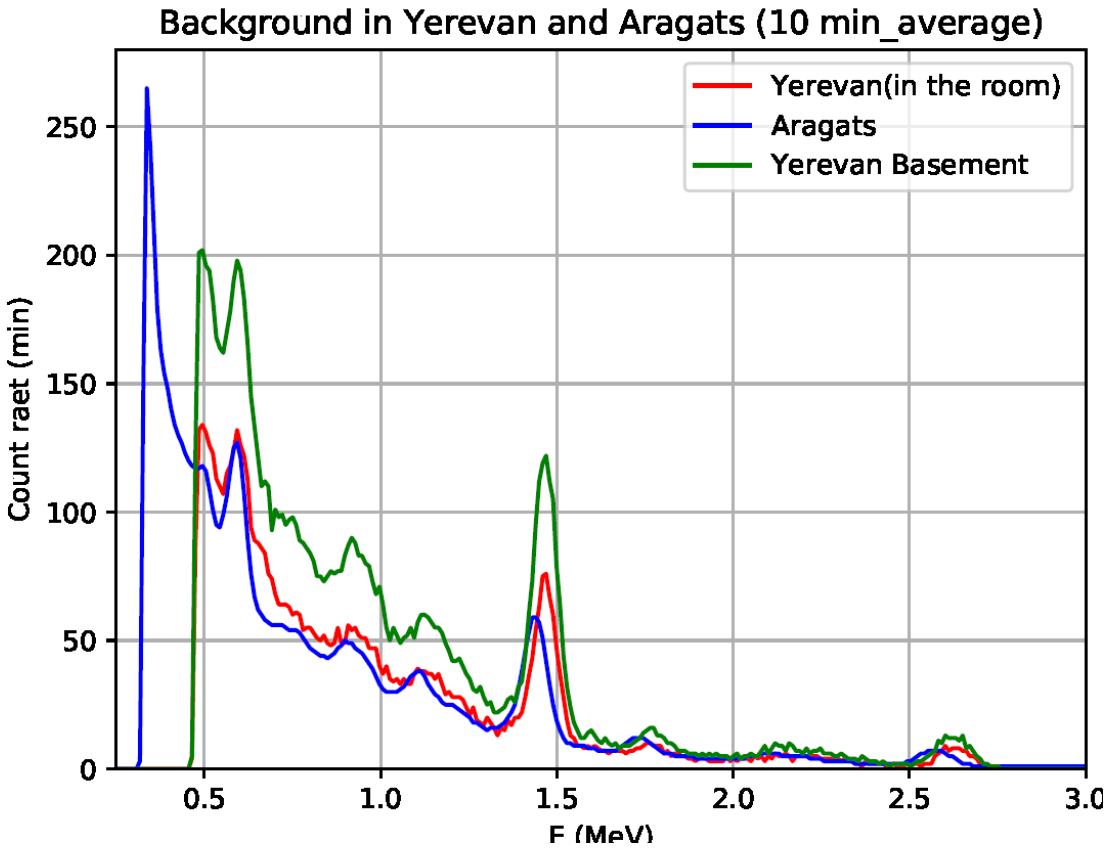
Измерение изотопов Cs137 и Co60 спектрометром ORTEC.



Построение зависимости код-энергия для ORTEC

В результате получаем простое аналитическое выражение для перехода от кода к измеряемой энергии: **0.009847*(ячейка кодов)-0.037297**.

Использование спектрометра в непрерывном режиме позволило сделать ряд измерений фона в здании ОКЛ и далее отправить этот прибор на Арагац для постоянного мониторинга фона.



□

Результаты работы

Сеть детекторов **NaI(Tl),** работающая на в/с Арагац, кроме постоянного мониторинга КЛ, позволяет

определять распределение потерь энергии частиц в кристалле по показаниям кодов. Для коректного восстановления энергетических спектров по значениям кодов, необходимо достоверно знать параметры используемых детекторов, а также иметь информацию о фоновых процессах вокруг рабочих детекторов. Для этого нами была проведена калибровка детектора кристаллами 137Cz и Co60.

С помощью генератора вычислен параметр d используемого LogADC для всех 8 каналов прибора. Получены значения **Dср = 10,44 σ= 0, 1593**

Определялось разрешение используемых детекторов которое в зависимости от используемого детектора колебалось в районе **22-29%**

Исследовалось влияния увеличения интенсивнисти потока сигналов на смещение кода регистрации LogADC. С увеличением загрузки 1 канала вплоть до 20 кГц изменение кода регистрации не превышало **5%.** А при загрузке всех 8 каналов до10 кГц не превышало **8%.** LogADC работает стабильно и принимаемые сигналы попадают практически в один и тот же код.

Измерение фона при работе детектора NaI(Tl) на 3 уровнях показало, что фон в комнате смазан, в то время как в саду и в подвале наблюдаются пики, которые хорошо просматриваются гамма спектрометром с хорошим разрешением.

References

1. Grupen C. Particle Detectors, Cambridge University Press, 1996.
2. K.Hagiwara et al., Physical Review D66, 010001 (2002)
3. Avakyan V., Hovsepyan G. et al. PION Collaboration report , 1979,p.27 (in Russian).
4. Dobrotin N.A. Cosmic Rays. USSR Academy Pub. 1963, 125p.
5. AlkoferO.C., Greider P.K.F. Physics Data,Cosmic Ray on Earth, 25-1, Karlsruhe,1984.
6. Murzin Introduction to Cosmic Rays,

7. T. Sato and K. Niita, "Analytical functions to predict cosmic-ray neutron spectra in the atmosphere" Radiat. Res. 166, 544-555 (2006)

8. T. Sato, H. Yasuda, K. Niita, A. Endo and L. Sihver, "Development of PARMA: PHITS based Analytical Radiation Model in the Atmosphere", Radiat. Res. 170, 244-259 (2008)

9. Chubenko A.P. Et al. New large-sized scintillation charged particles detector for extencive air shower at Tian-Shan. Proc. 30-th ICRC, Merida,2007

10. Ampilogov N.V.,Amelchakov M.B. et al. Scintillation detector with fiberopticreadout system. Proceeding of Russian Academy of Science, series Physics,71,p580,2007 (in Russian)

11. CERN Program Library Long Writeup W5013. http://wwwinfo.cern.ch/asd/index.html

12. Avakyan K., Arakelyan K., Chilingarian A. et al. “NaI Detector Network at Aragats” , *Journal of Physics: Conference Series* **409** *(2013) 012218*

13. Chilingarian A., Hovsepyan G.,Hovhanissyan A. «Particle bursts from thunderclouds: Natural particle accelerators above our heads» PHYSICAL REVIEW D 83, 062001 (2011)

14. Chilingarian A. et al. «Ground-based observations of thunderstorm-correlated fluxes of high-energy electrons, gamma rays, and neutrons» PHYSICAL REVIEW D 82, 043009 (2010)

15. ChilingarianA., Mailyan B., Vanyan L. “Recovering of the energy spectra of electrons and gamma rays coming from the thunderclouds” , Atmospheric Research 114–115 (2012) 1–16

16. H. Tsuchiya, T. Enoto, S. Yamada et al. “Long-duration gamma-ray emissions from 2007 and 2008

winter thunderstorms”

arXiv:11024024v1[physics.ao-hp]19Feb2011

17. H. Tsuchiya, T. Enoto, S. Yamada et al. “Detection of high-energy gamma rays from winter thunderclouds” arXiv.0708.2947v1[astro-ph]22Aug2007