

Долгосрочный анализ энергетической калибровки счетчиков LVD

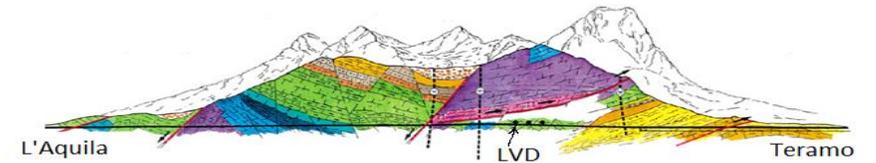
Агафонова Н.Ю.¹, Добрынина Е.А.¹, Еникеев Р.И.¹, Филимонова Н.А.², Шакирьянова И.Р.¹, Якушев В.Ф.¹
от имени коллаборации LVD

¹*Институт Ядерных Исследований РАН, Россия, Москва, Agafonova@inr.ru*

²*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Россия,
Долгопрудный.*

LVD - Детектор Большого Объема

Подземная Лаборатория LNGS (H=3620 м в.э.), Гран Сассо, Италия.
Детектор работает с 1991 года, с 2001 в полной конфигурации.



Основная задача – регистрация нейтрино от коллапсов звездных ядер



22×13×10м

$M_{Fe} = 1020 \text{ т}$

$M_{sc} = 1008 \text{ т}$

counters=840

H=3620 м в.э.

$E_{\mu} = 280 \text{ ГэВ}$

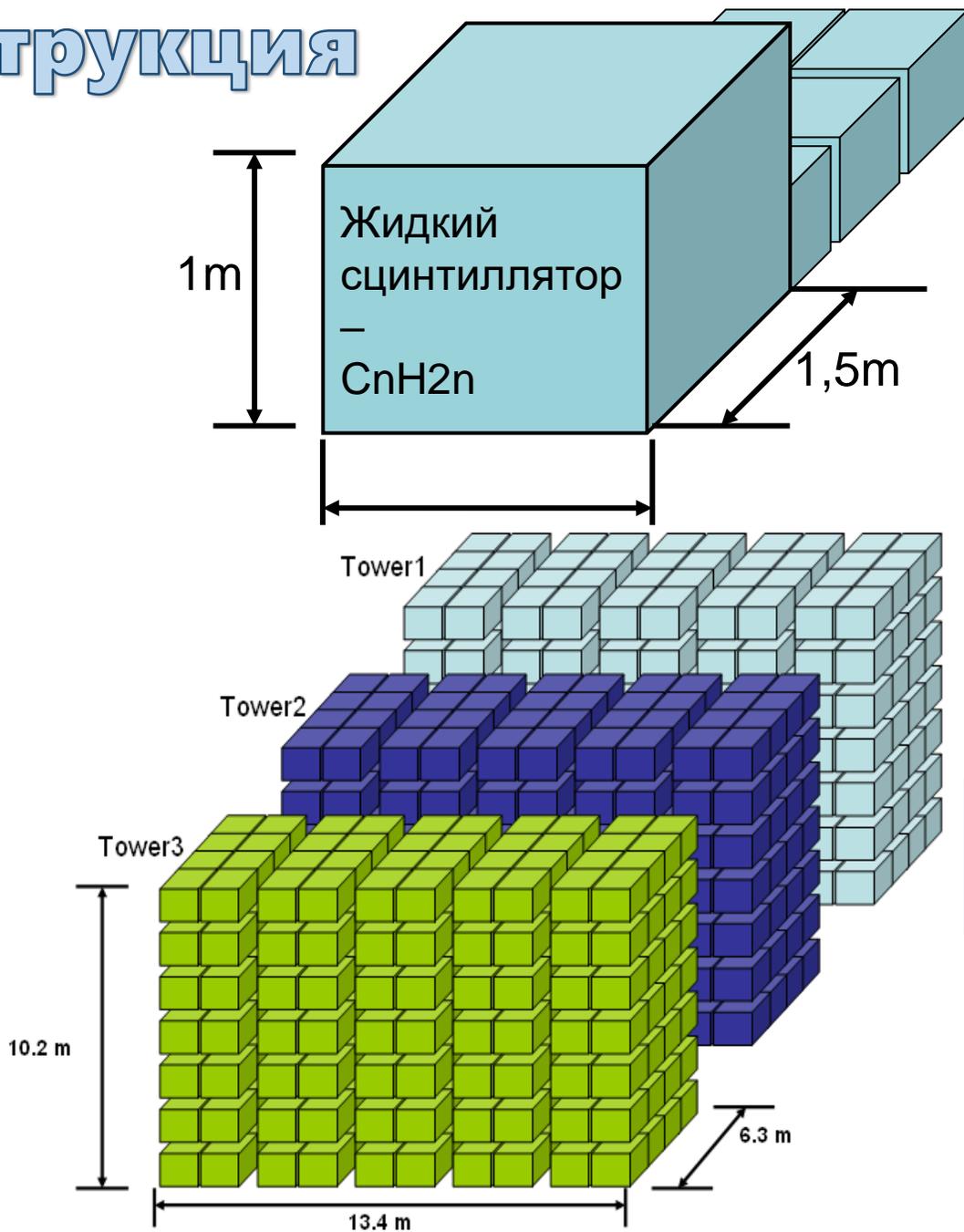
$E_{s.l.} = 1.3 \text{ ТэВ}$

$CR_{\mu} \sim 120 \text{ ч}^{-1}$

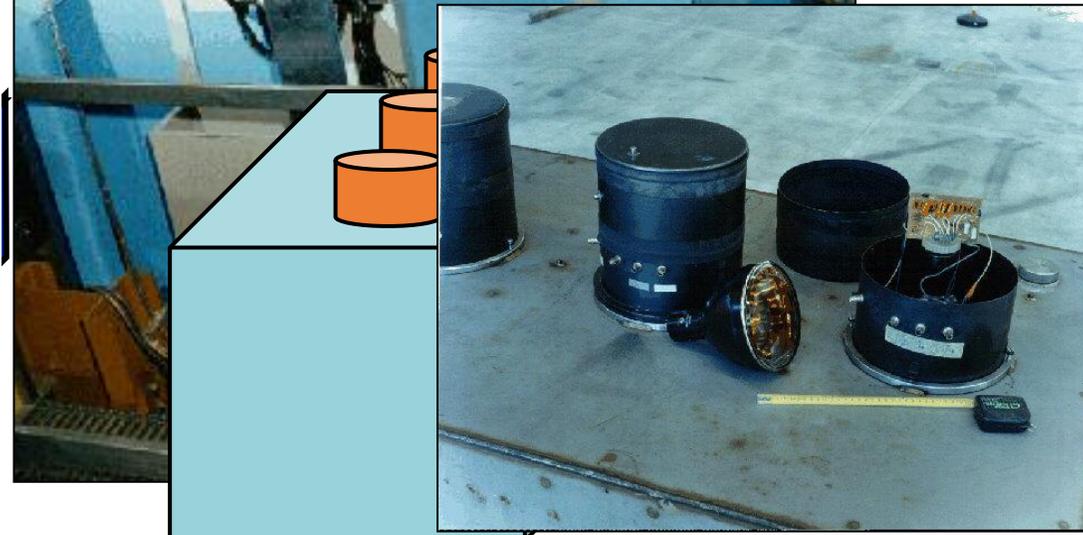
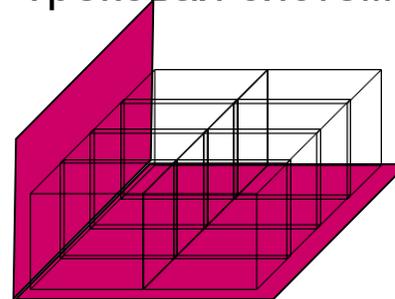
$\epsilon_{th} = 4 \text{ MeV}$



Конструкция LVD



Трековая система

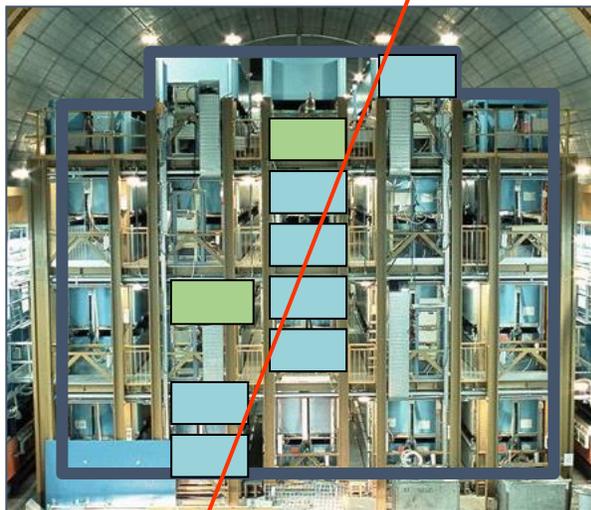


Регистрация мюонов в детекторе

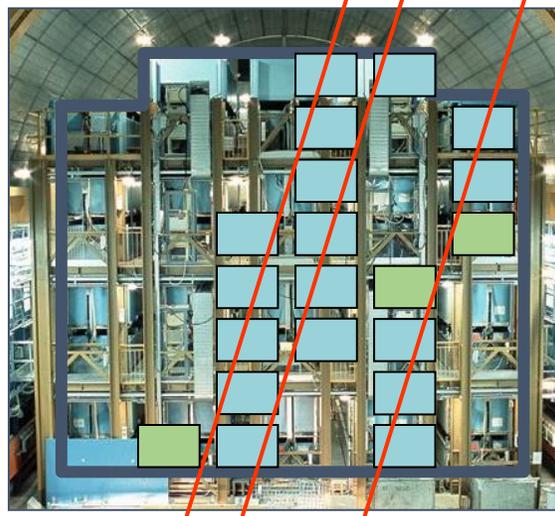
Мюоном в детекторе считается событие, в котором имеются два и более счетчика зарегистрировавших в течение 250 нс энергвыделения больше 20 МэВ.

Одиночный мюон

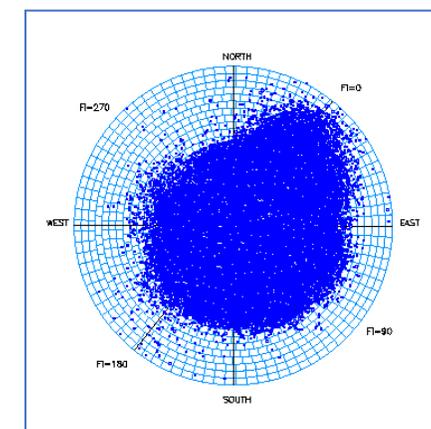
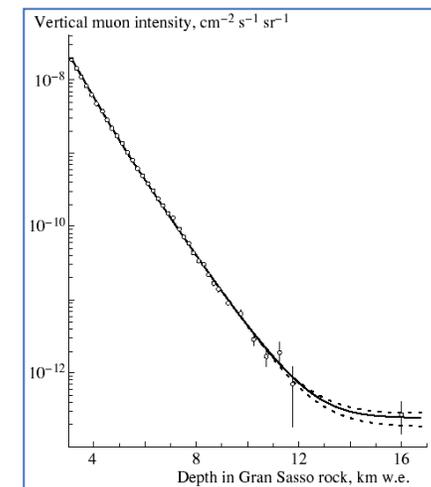
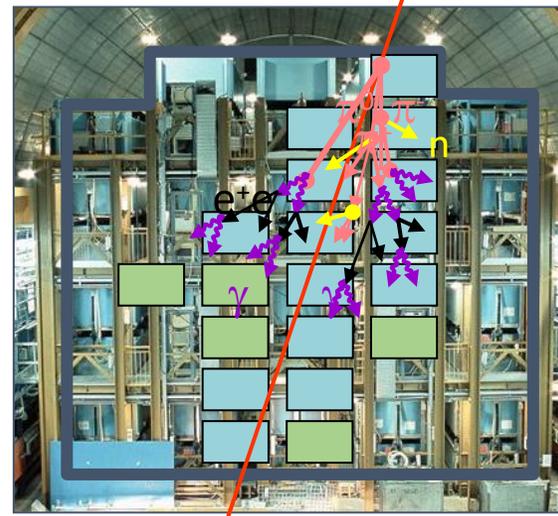
Точность восстановления траектории мюонов (по трековой системе) -0.5° .



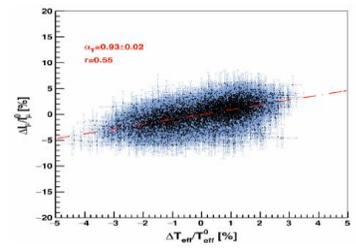
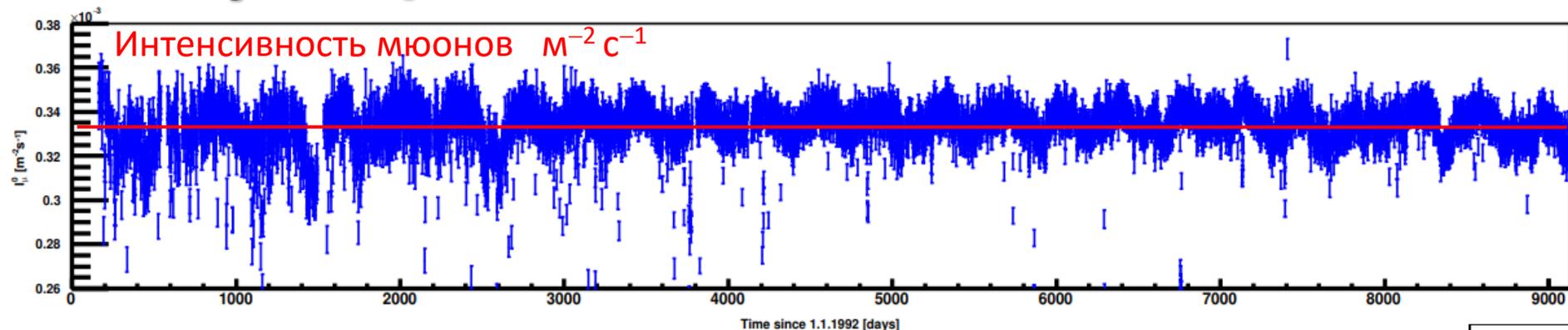
группа мюонов ($K_{\max}=27$ мюонов)



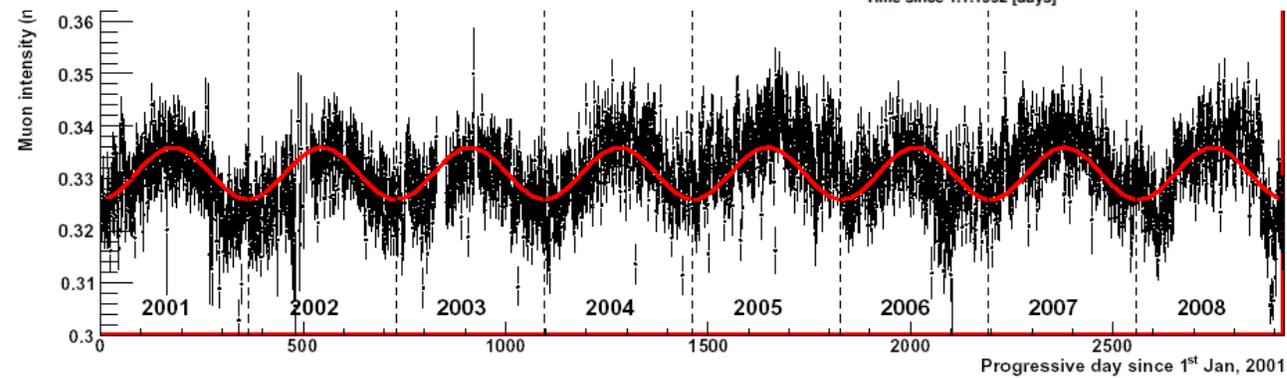
ливень



Вариации интенсивности полного потока мюонов



$\alpha_T = 0.93 \pm 0.02$



Связь изменения интенсивности мюонов с изменением температурного коэффициента

$$I_\mu = I_0^\mu + \delta I^\mu \cos\left(\frac{2\pi}{T}(t - t_0)\right)$$

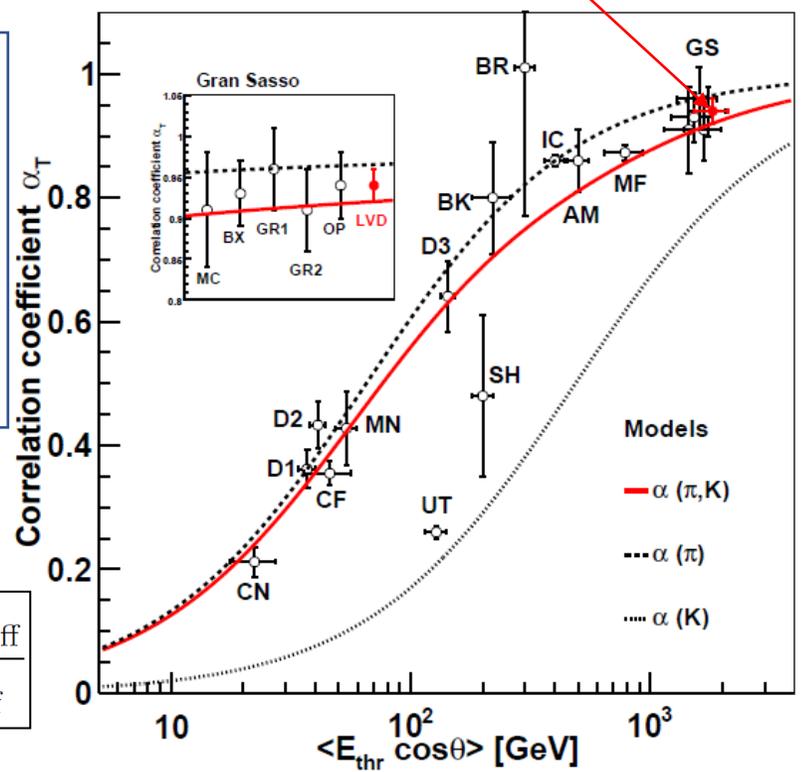
Фаза модуляции $t_0 = 185 \pm 15$ дней

Средняя интенсивность $I_0^\mu = (3.31 \pm 0.03) \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$

Величина модуляции $\delta - (1.5 \pm 0.1)\%$

Период модуляции $T = 367 \pm 15$ дней

$$\Delta I_\mu / I_\mu^0 = \alpha_T \frac{\Delta T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff}}^0}$$

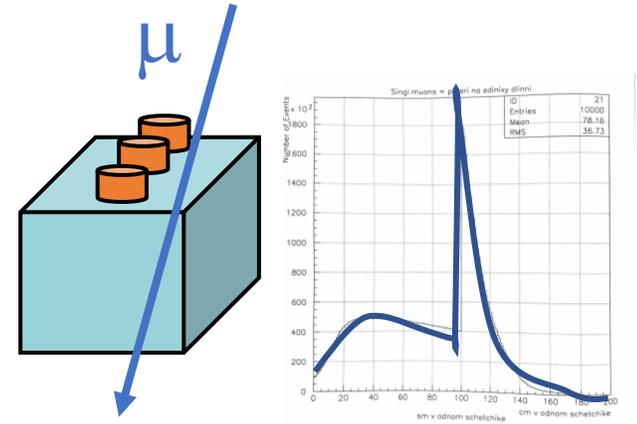


N. Agafonova et al. (LVD Collaboration) "Characterization of the varying flux of atmospheric muons measured with the Large Volume Detector for 24 years", Phys. Rev. D 100, 062002 (2019)

Энергетическая калибровка счетчиков:

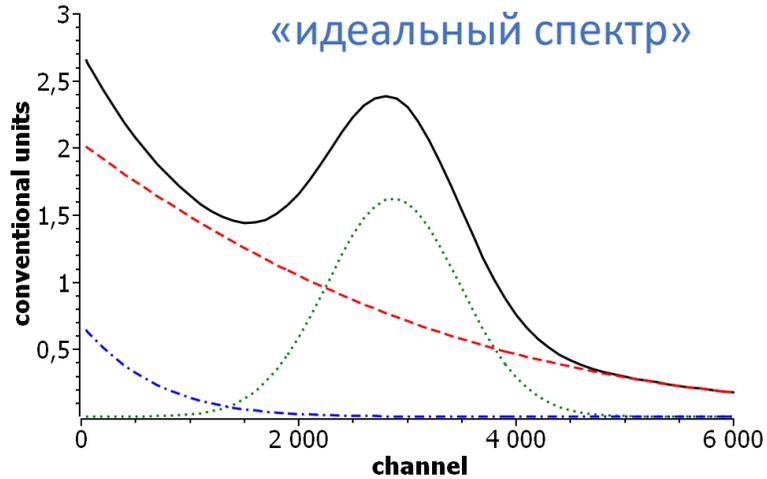
а) для низких энергий по γ -линии 2.23 МэВ от захвата нейтрона на водороде, пикам энерговыделений γ -квантов 2.5 МэВ (распад ^{60}Co) и ~ 9 МэВ от захвата нейтронов от спонтанного деления ядер ^{252}Cf ядрами ^{58}Ni .

б) для больших энергий (~ 185 МэВ) по пикам от энерговыделений атмосферных МЮОНОВ.



Распределение длин траекторий мюонов в счетчике

Усредненный по форме мюонный спектр – «идеальный спектр»

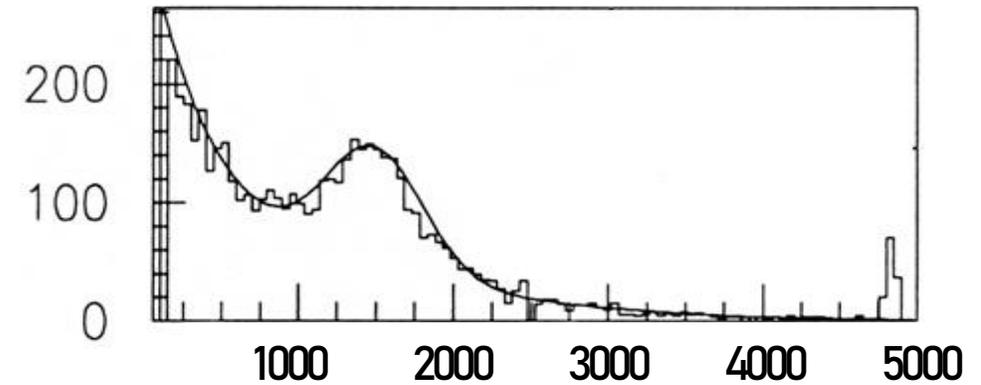


$$F(x) = \sum_{i=1}^3 a_i \times \exp\left[-\frac{(x-b_i)^2}{2c_i}\right], \text{ где}$$

- a_i – высота пика Гаусса,
- b_i – его расположение на оси x ,
- c_i – среднеквадратичное отклонение (ширина пика Гаусса).

Автоматическая калибровка:

Формирование спектров для всех 840 счетчиков за каждый месяц

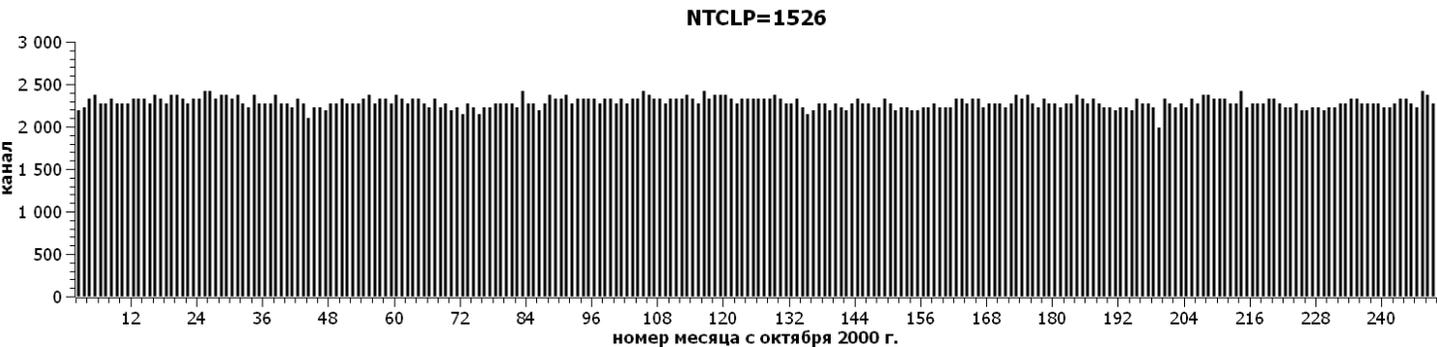


Амплитудный спектр счетчика LVD. По оси X – каналы ADC, по оси Y – количество отсчетов. 1400-му каналу будет присвоено значение 185 МэВ.

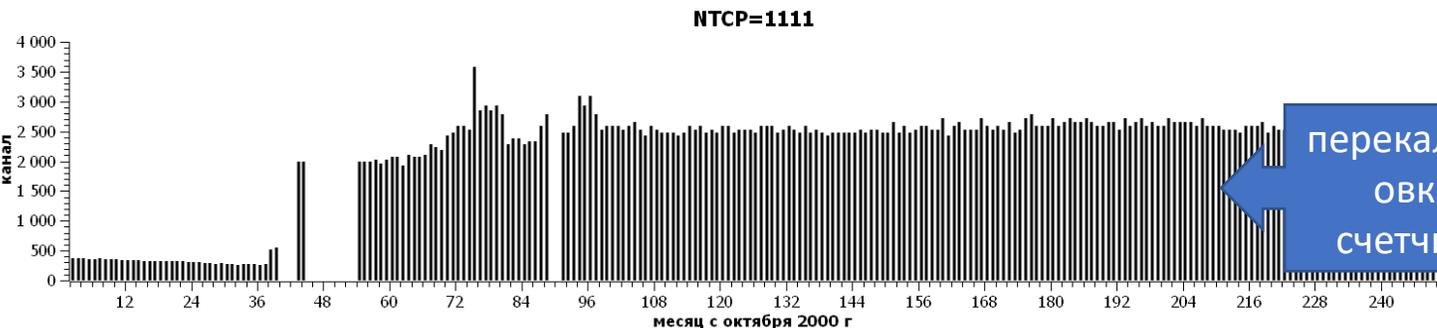
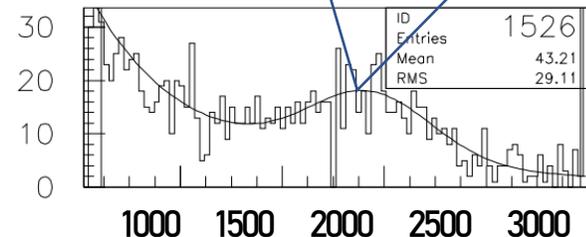
Примеры определения калибровочных коэффициентов за 21 год статистики:

Номер канала с максимумом спектра, которому приписывается энергия $E=185$ МэВ

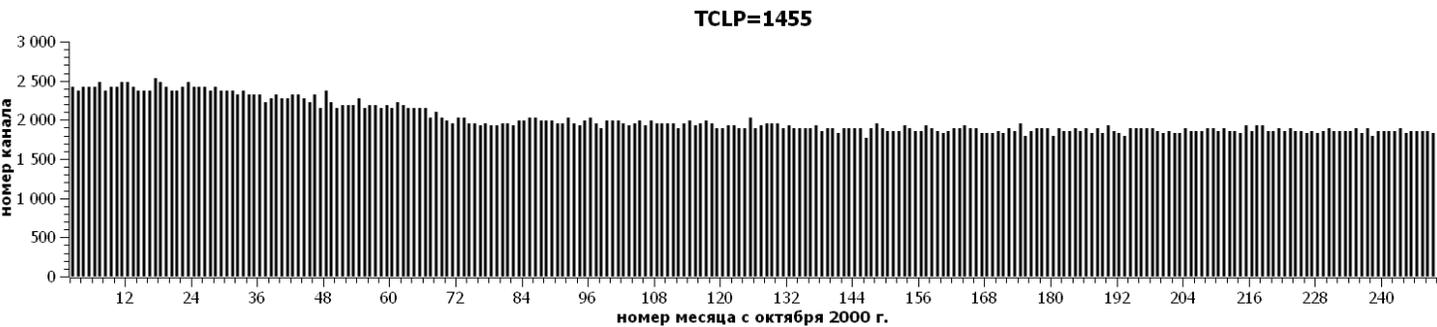
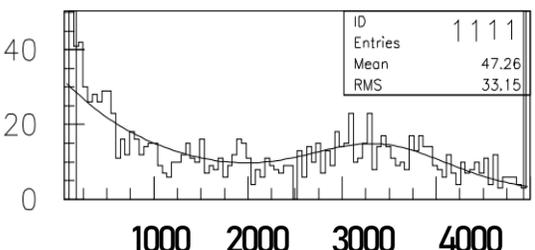
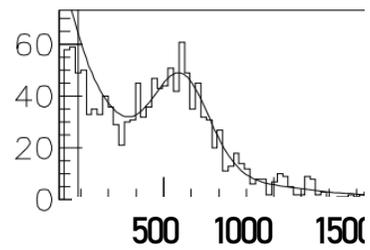
21x12=252 значения



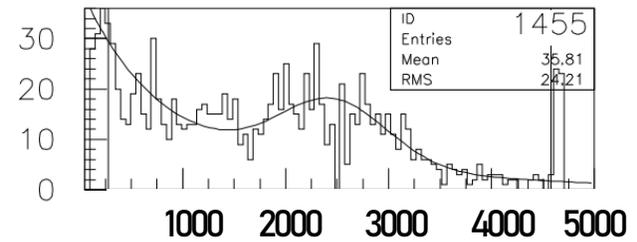
← Стабильно работающий счетчик



← перекалибровка счетчика



← Изменение калибровки счетчика



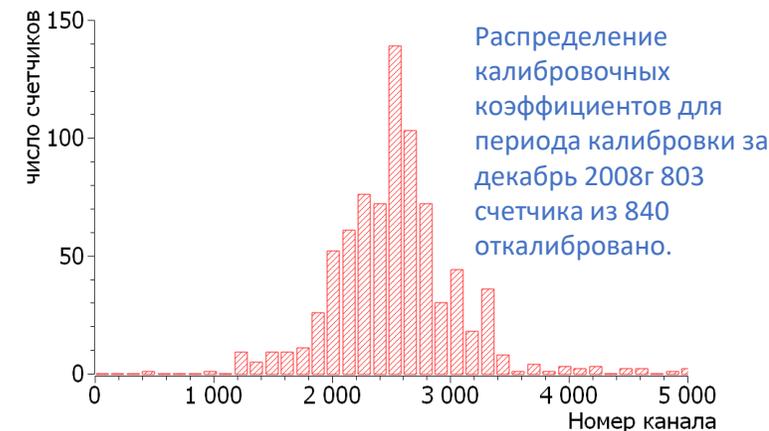
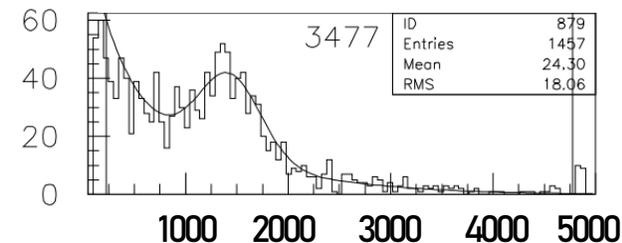
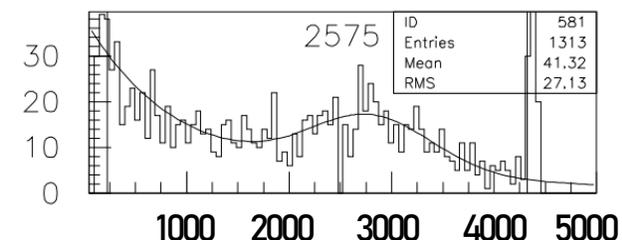
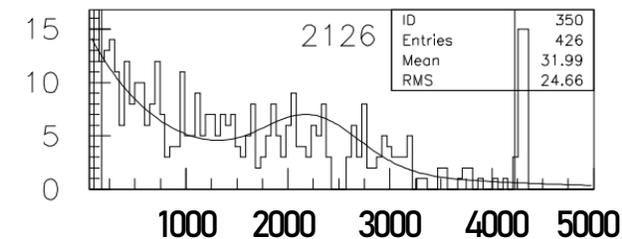
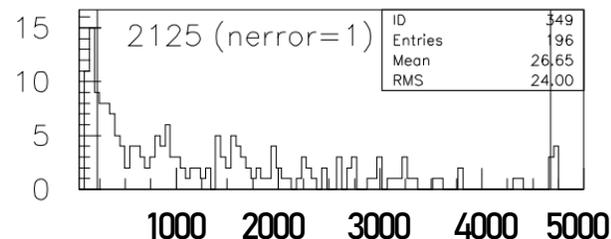
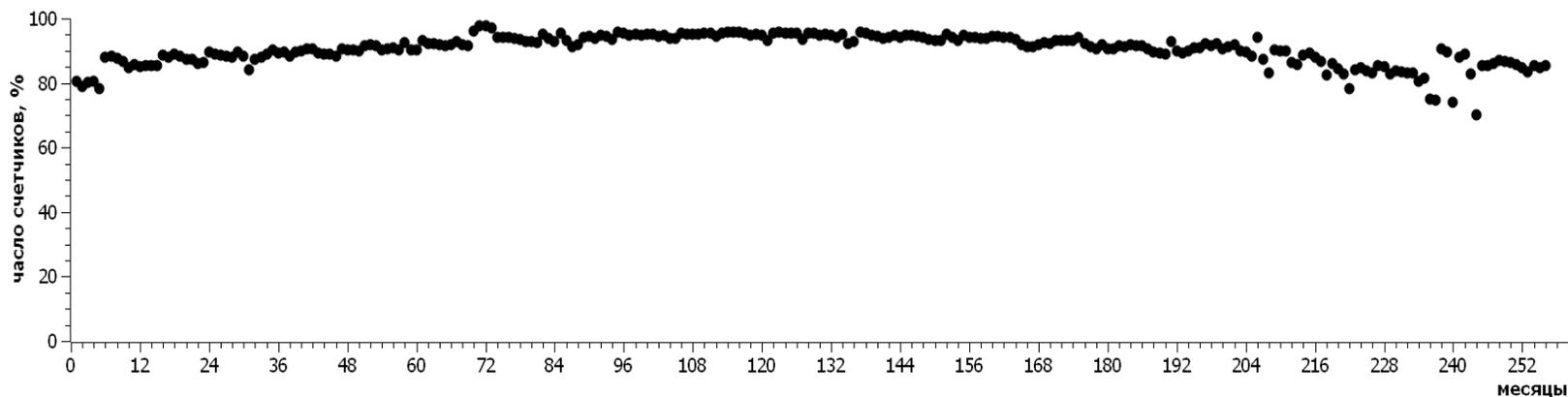
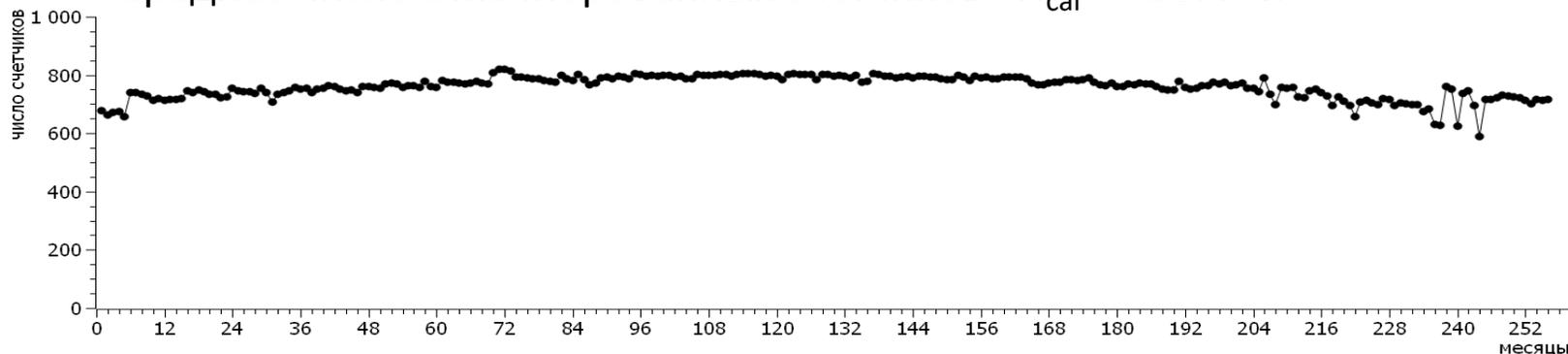
Число откалиброванных счетчиков в месяц

Статистика:

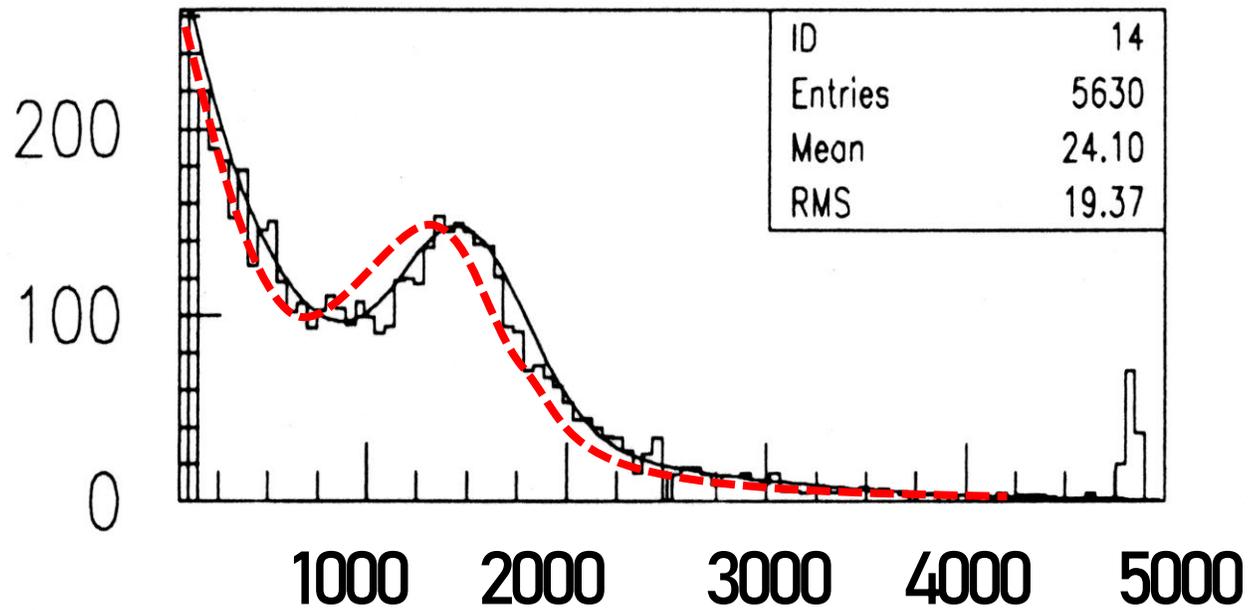
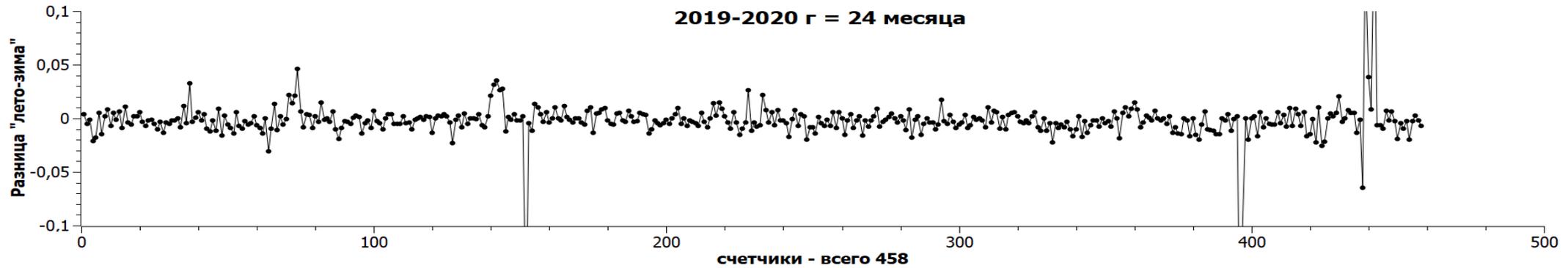
С января 2001 года по март 2022 г. (260 месяцев)

Максимально – 820 счетчиков из 840.

Среднее число откалиброванных счетчиков $\langle N_{cal} \rangle = 90.4 \%$.



Положения максимума в зимние и летние месяцы



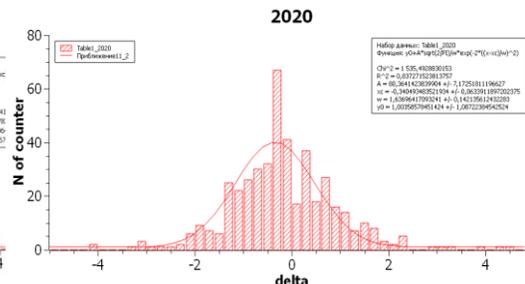
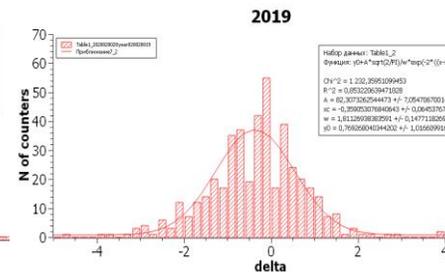
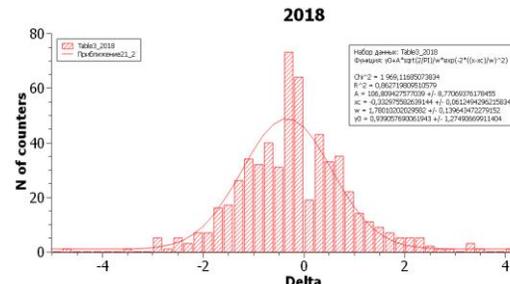
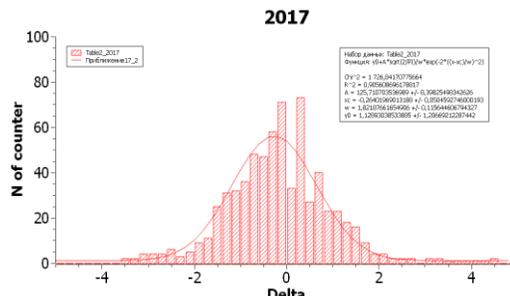
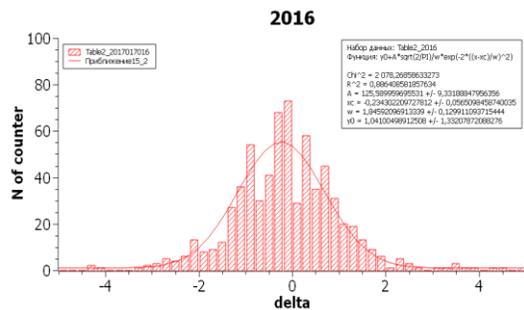
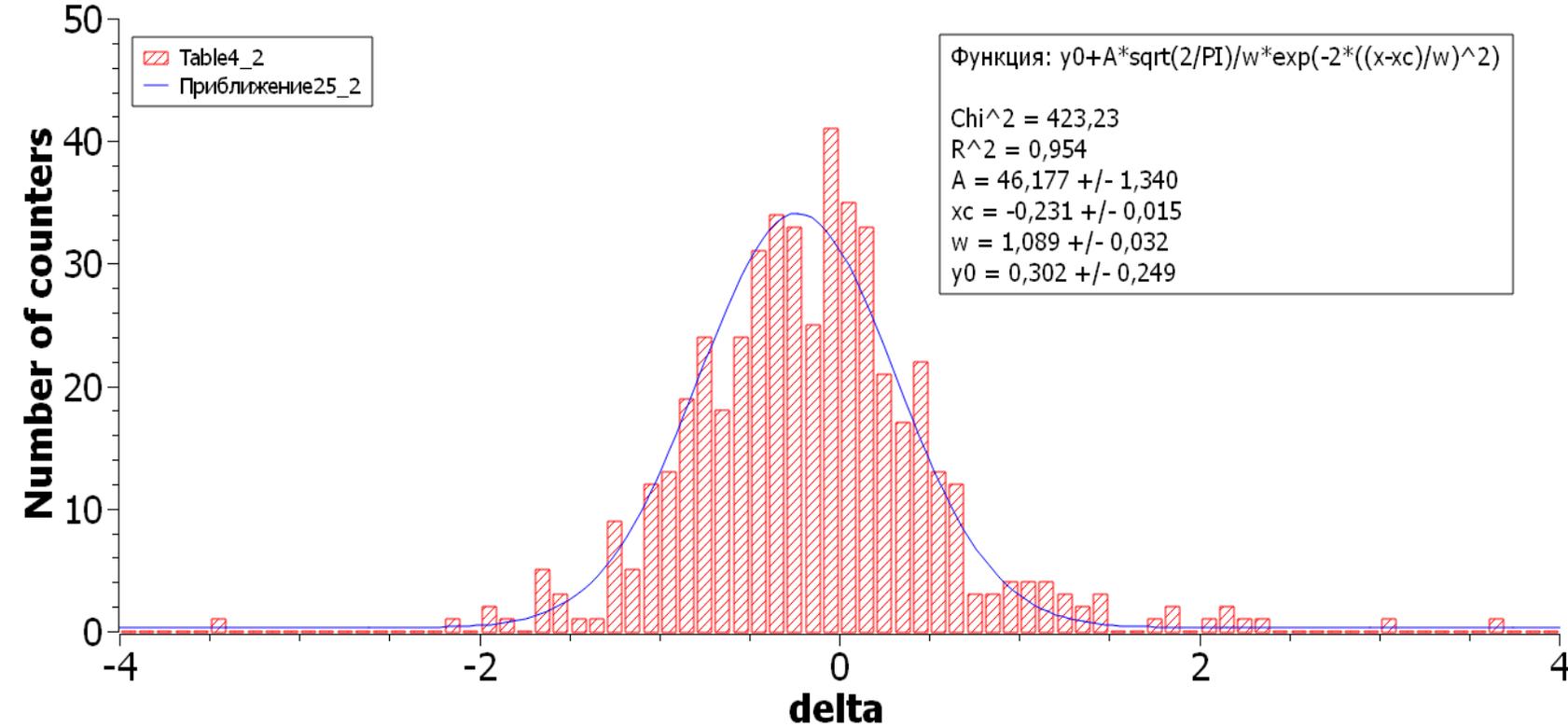
Зима: декабрь, январь, февраль
Лето: июнь, июль, август

Разница в положении максимума в зимние и летние месяцы

2016-2017-2018-2019

Разница (лето-зима) $\delta = 100\% \times (K_{л} - K_{з}) / (K_{л} + K_{з}) = -0.23\%$

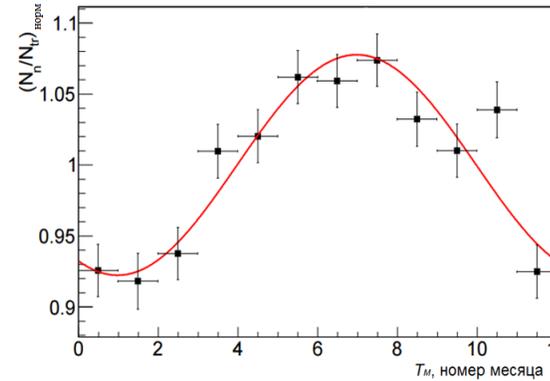
496 счетчиков, работающих 4 года без пропусков калибровки.
Из них в башнях
Т1 – 159,
Т2 – 154,
Т3 – 183.



Возможное объяснение

1. Приписывание положению пика в мюонном спектре энергии 185 МэВ, которое получено из МК-расчетов, и не учитывает разницу в энергии мюонов летом и зимой.

2. На электронику детектора может влиять изменение в напряжении электрической сети, связанное с увеличением электропотребления населения в летний период (кондиционеры). Поэтому напряжение в сети может быть ниже летом, чем зимой.



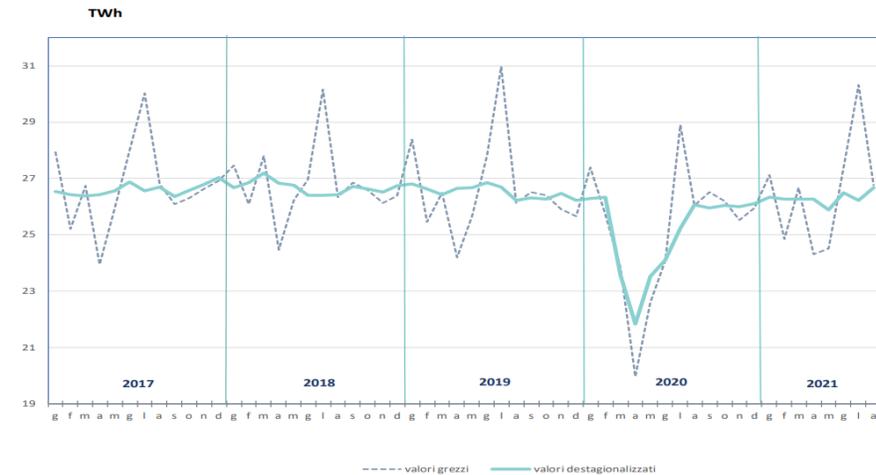
$$\frac{\delta N_n}{N_n^0} = \frac{\delta Y_n}{Y_n^0} = 7.7\%$$

$$Y_n(E_\mu) \propto E_\mu^{0.78}$$

Изменение энергии мюонов на 10% ведет к изменению удельного числа нейтронов на 8%.

$$E_\mu^{LVD} = 280 \pm 28 \text{ GeV}$$

Analisi congiunturale domanda energia elettrica (TWh)



Заключение:

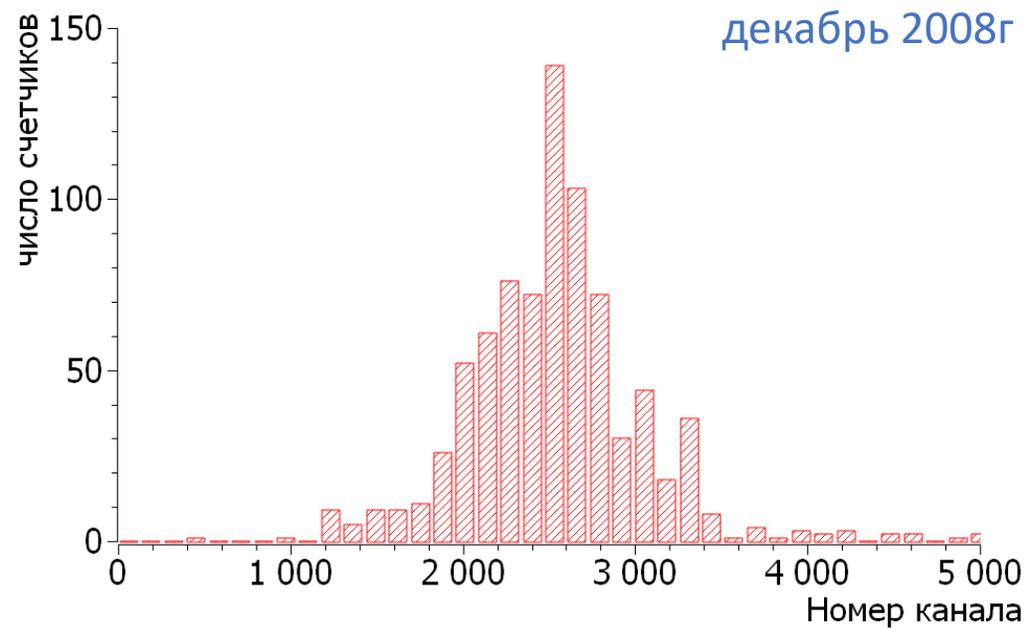
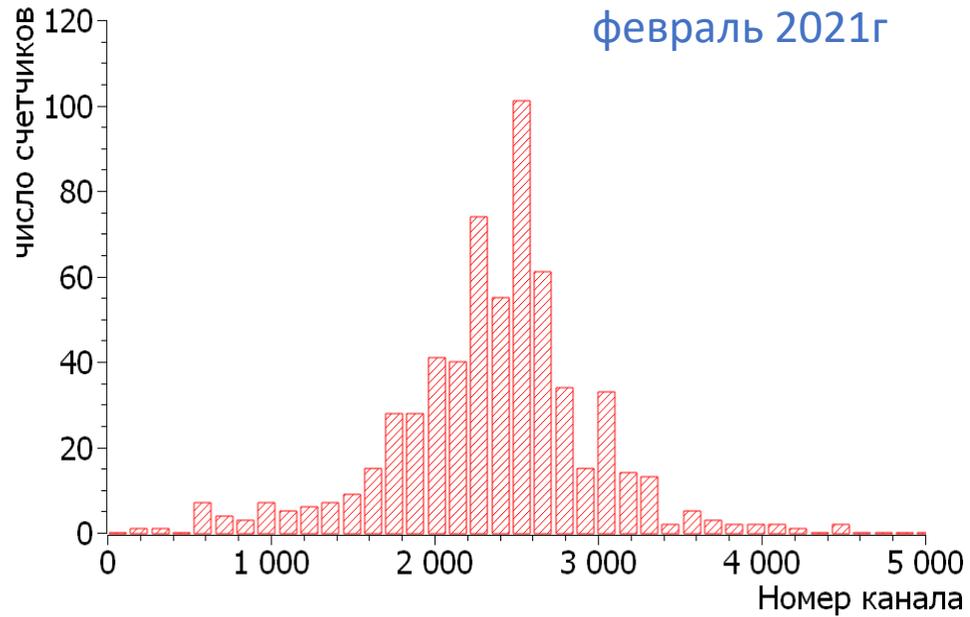
1. В среднем 90.4% счетчиков калибруются автоматической программой в месяц по «мюонному пику». Изменение калибровочного коэффициента дает понять об изменении в свойствах счетчика, для устранения неполадок.

2. Сезонная разница в изменении положения максимума мюонного пика (в каналах) составляет около (-0.23 ± 0.08) %.

Для T1 – (-0.2) %, для T2 – (-0.2) %. Для третьей башни (T3) разница составляет (-0.3) % и распределение имеет более широкую форму.

Летом номер канала с положением максимума мюонного пика меньше, чем зимой. Величина (-0.2) % постоянна для внутренних и внешних счетчиков, постоянна год от году, если считать года отдельно.

Спасибо!



Распределение калибровочных коэффициентов для периода калибровки за февраль 2021г (adc_calib_54062_54155.dat) 623 откалиброванных счетчика из 840 и для периода за декабрь 2008г (adc_calib_35469_35580.dat) 803 счетчика откалибровано.

Рисунок справа распределение отдельно по башням.

