The background features a complex marbled pattern in shades of brown, green, and black. Overlaid on this are several white, organic, cloud-like shapes and four white circles of varying sizes, creating a modern, abstract design.

*ПОСЛЕДНИЕ  
РЕЗУЛЬТАТЫ,  
ПОЛУЧЕННЫЕ НА  
ЭКСПЕРИМЕНТЕ LVD.*

Филимонова Н. А. (ИЯИ РАН, МФТИ)

от имени

LVD Коллаборации

The 4th International  
Symposium on Cosmic  
Rays and Astrophysics  
(ISCRA-2023)

# Детектор LVD

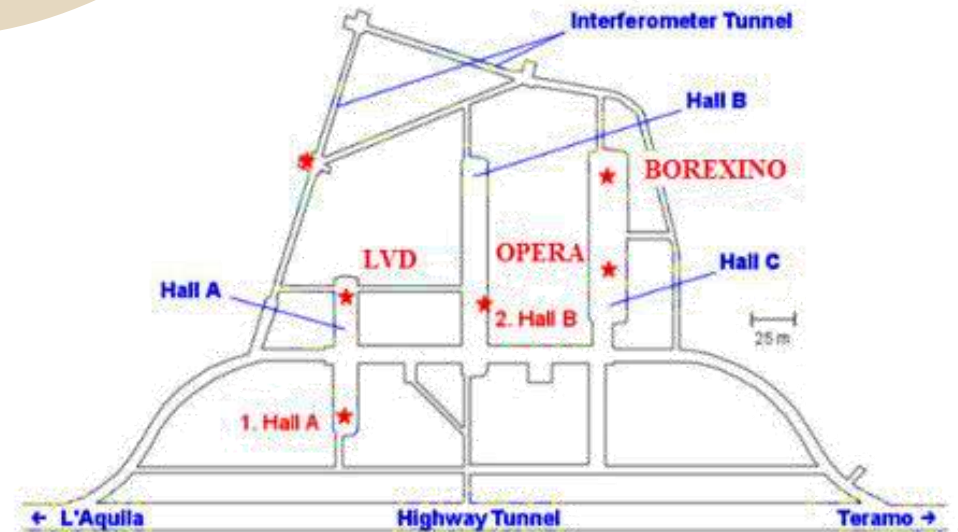
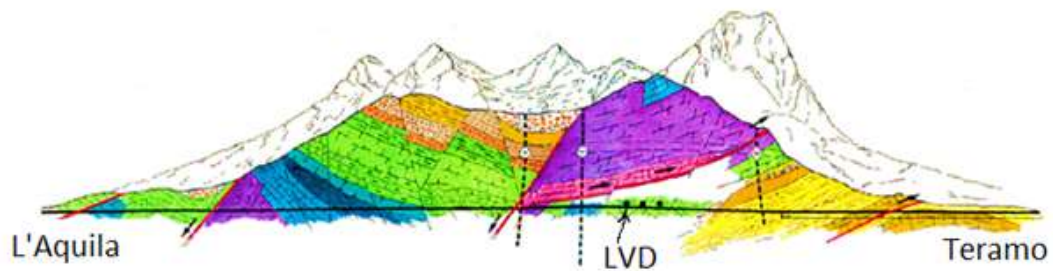
*Эксперимент LVD, предназначен для исследований в области физики нейтрино, астрофизики, физики космических лучей и, возможно, в ядерной геофизике для предсказания землетрясений.*



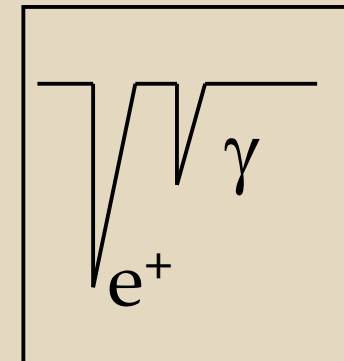
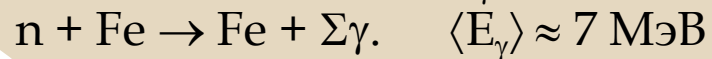
Подземные помещения лаборатории LNGS находятся прямо под горным массивом.

Помещения лаборатории располагаются на высоте в девятьсот шестьдесят метров над уровнем моря.

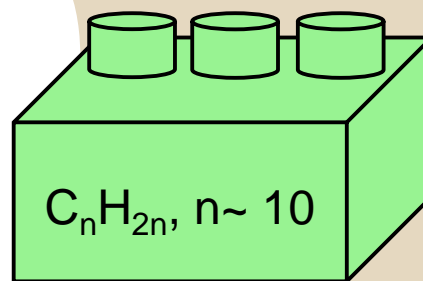
Рядом с LNGS был построен транспортный туннель, связывающий два города Италии - Аквила и Терамо, являющийся также участком автомагистрали А24.



# Принцип регистрации нейтрино

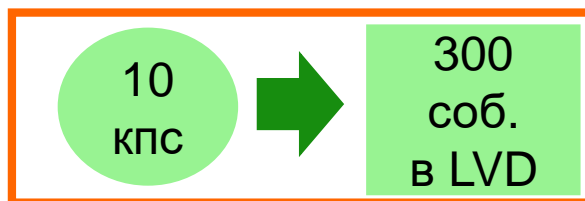
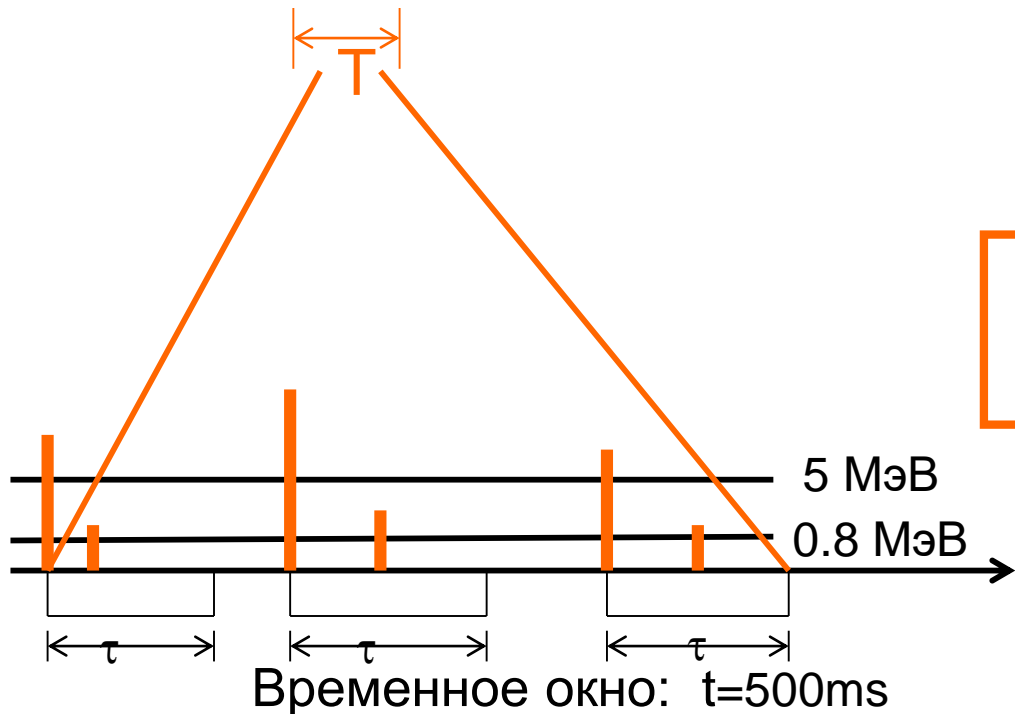


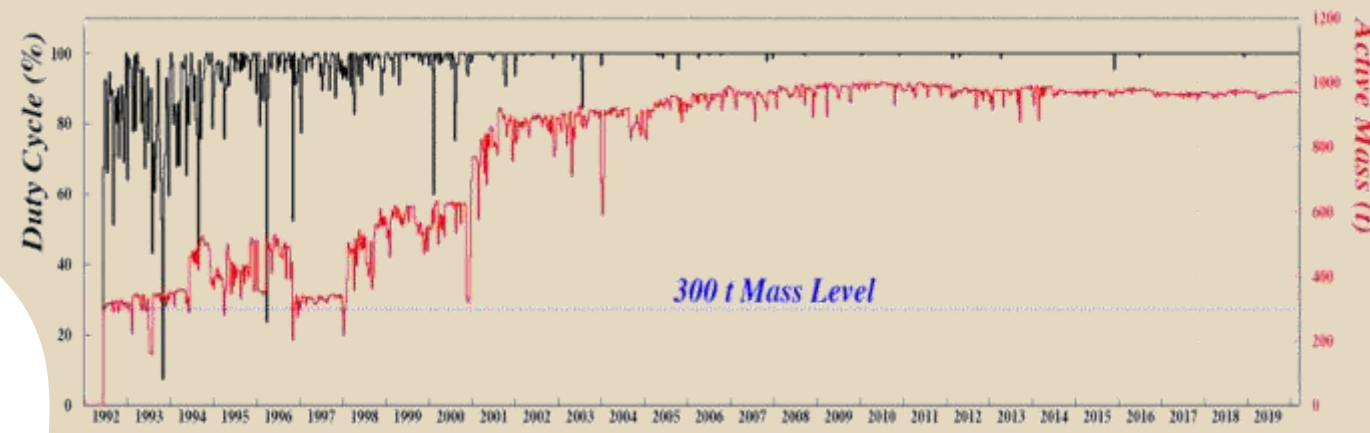
Обнаружение сгустка  $N$  импульсов за короткий интервал времени  $T$



1 kt C<sub>n</sub>H<sub>2n</sub>  
1 kt Fe  
840 счетчиков

Основной реакцией взаимодействия электронного антинейтрино является обратный бета распад, которая создает два детектируемых сигнала: первый сигнал вызывается позитроном (видимая энергия  $E_{vis} = E_{\nu_e} - 1.8 \text{ МэВ} + 2 m_e c^2$ ), следующий за ним – захватом нейтрона протонами или ядрами железа





Цель SNEWS – предоставить астрономическому сообществу раннее предупреждение о вспышке сверхновой в нашей Галактике с тем, чтобы экспериментаторы могли наблюдать астрономические следствия гравитационного коллапса звезды.

Data set: 6/1992-2/2023 (last update)  
Average Duty cycle: 95.5 %  
Average Mass: 770 t  
Exposure: 22.1 kt x year  
Lifetime: 10673 days / 29.4 years  
LI(10) Triggers: 19.7 Millions  
N. of Clusters: 4.14 Millions

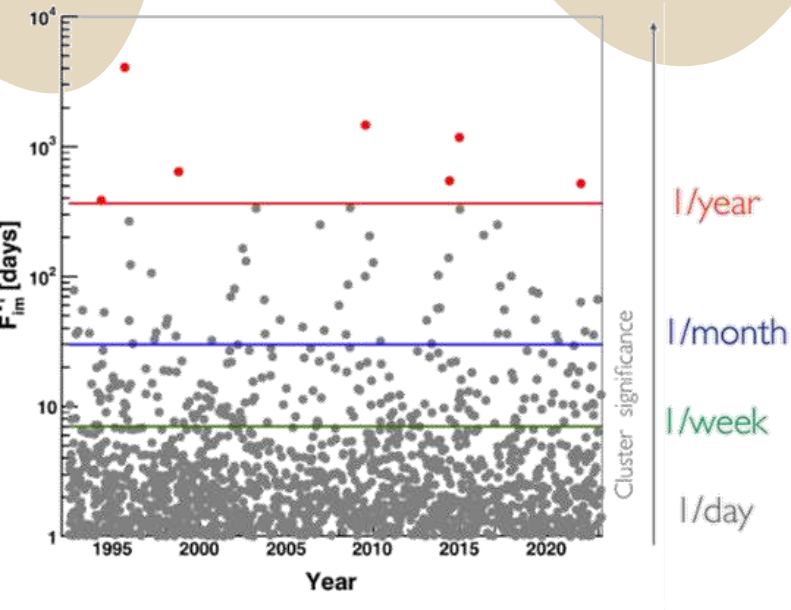
## SuperNova Early Warning System

По данным работы нейтринного телескопа LVD за 31 год работы (1992 - 2023), получено экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 13 лет на 90% уровне достоверности.



# Результаты офлайн-режима

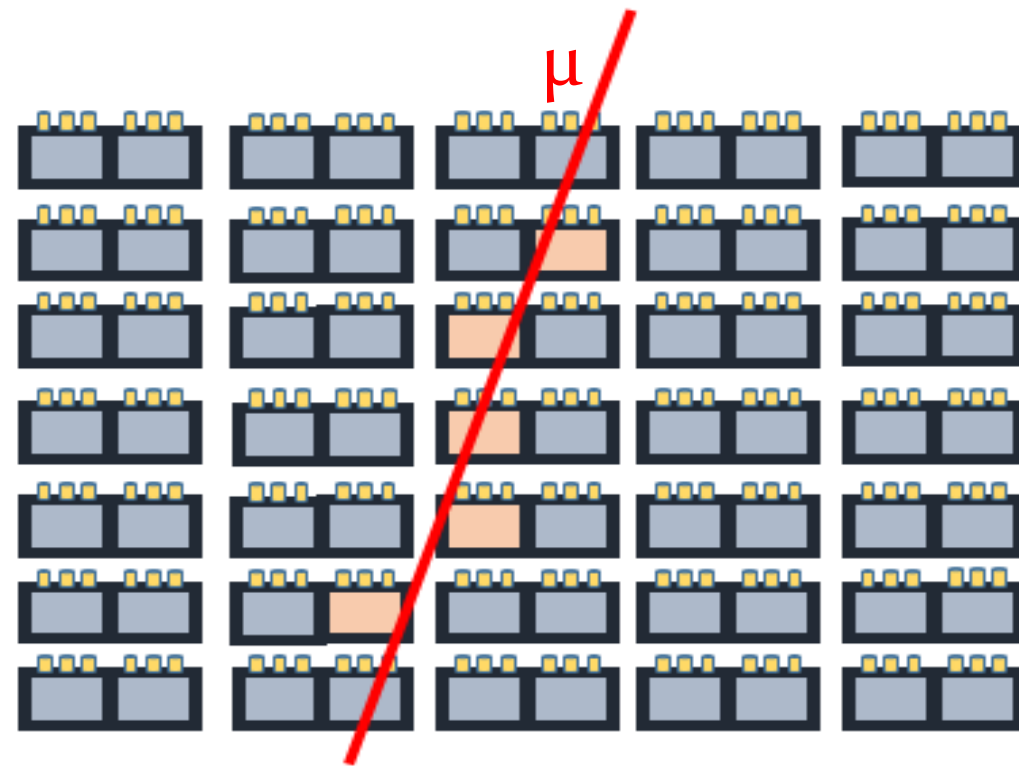
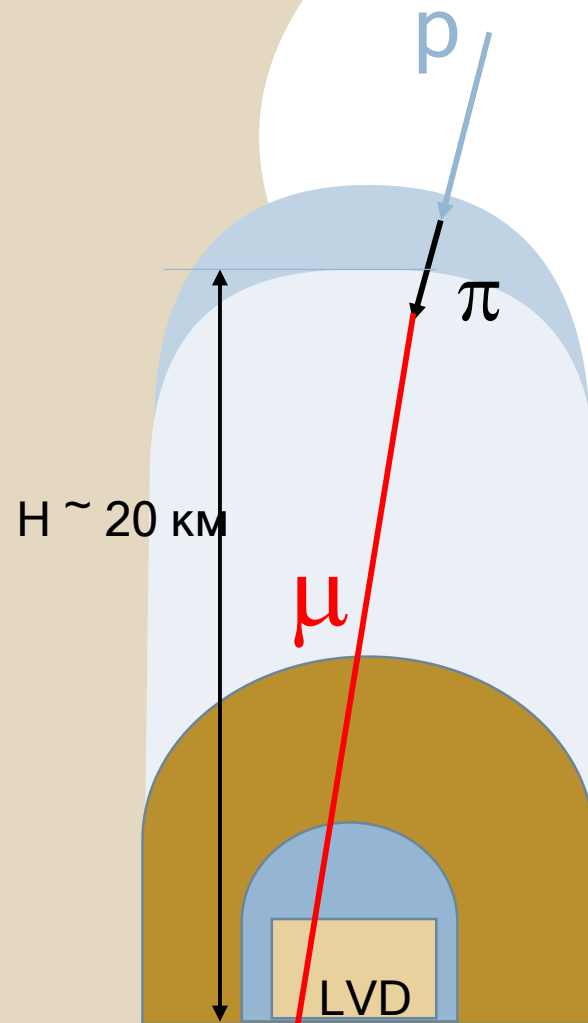
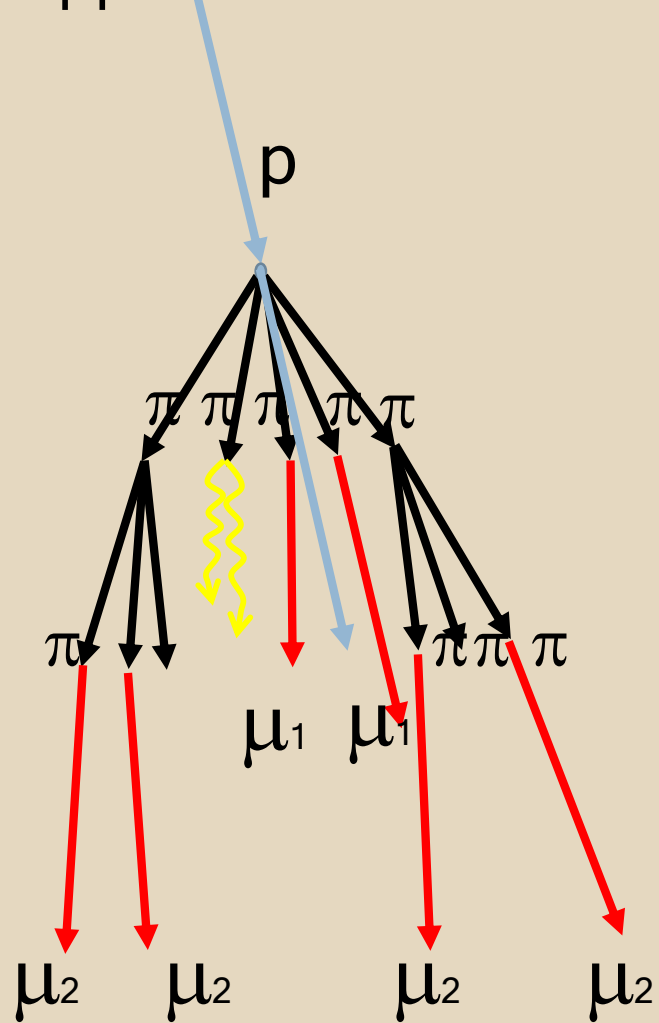
Все кластеры с  $F_{im} < 1/\text{год}$  были проверены с точки зрения энергетических спектров и сигналов низкой энергии, которые могут быть признаком взаимодействий IBD. Они полностью совместимы со случайным совпадением фоновых сигналов.



*Зарегистрированные кластеры с  $F_{im} < 1 \text{ день}^{-1}$ . Красным отмечены кластеры с высокой значимостью.*

Cluster date and time	Cluster multiplicity	Duration $\Delta t_i$ , s	Energy E, MeV	Frequency $1/F$ , $y^{-1}$
16.04.1994 10:40:49.263	7	18.88	26.5	1.06
27.08.1995 16:18:10.478	7	5.49	36.2	11.16
07.10.1998 15:41:41.775	12	90.05	32.2	1.76
18.07.2009 07:39:20.510	12	42.71	14.6	4.02
25.05.2014 03:54:14.555	14	61.56	22.6	1.49
18.12.2014 20:21:28.787	8	9.98	18.8	3.22

Фон детектора LVD являются атмосферные мюоны и естественная радиоактивность под землей.

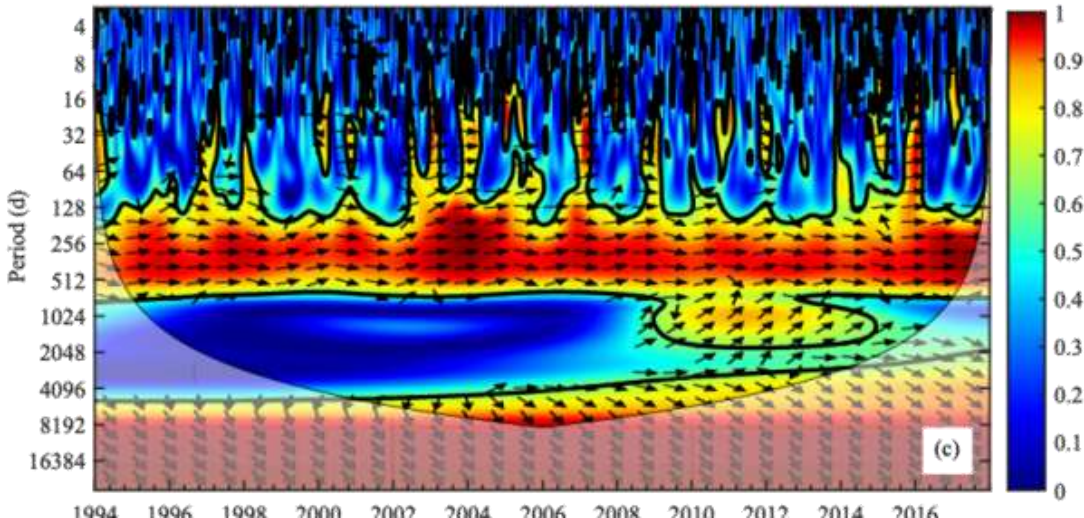
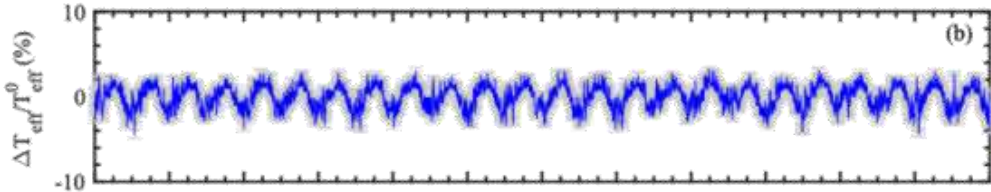
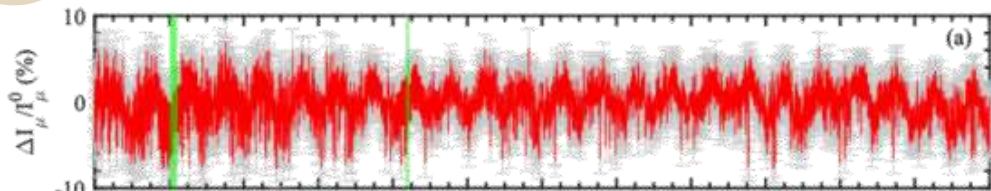


$$R_{\mu}(\text{LVD}) = 0.097 \pm 0.010 \text{ s}^{-1}$$

# Температурный эффект

Для мюонов больших энергий ( $\sim 280$  ГэВ), которые мы регистрируем под землей, наблюдается положительный температурный эффект.

Больших глубин достигают, главным образом, мюоны от распадов пионов первого поколения генерации, число которых (распадов) увеличивается при расширении атмосферы и падении ее плотности в верхних слоях (на высоте  $\sim 30$  км).



PHYSICAL REVIEW RESEARCH 4, 023226 (2022)

## Exploration of the stratosphere with cosmic-ray muons detected underground

C. Taricco<sup>1,\*</sup>, E. Arnone<sup>1</sup>, S. Rubineti<sup>2</sup>, and I. Bizzarri<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, University of Turin and Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Turin, Italy

<sup>2</sup>Department of Environmental Sciences, Informatics and Statistics, University Ca' Foscari of Venice, Venice, Italy

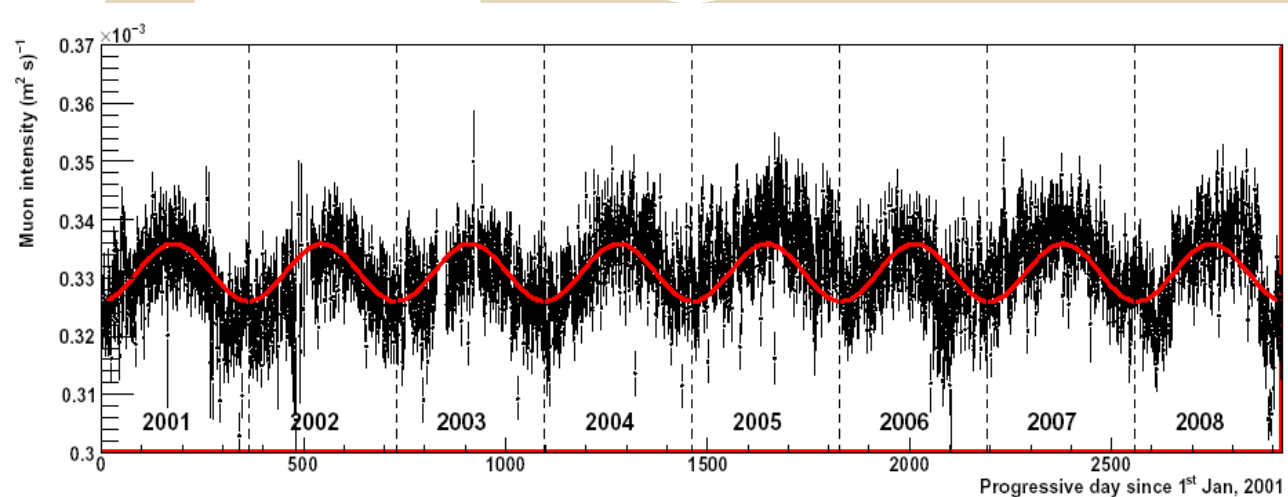
N. Yu. Agafonova,<sup>1</sup> M. Aglietta,<sup>2,3</sup> P. Antonioli,<sup>4</sup> V. V. Ashikhmin,<sup>1</sup> G. Bari,<sup>4</sup> G. Bruno,<sup>5,6</sup> E. A. Dobrynina,<sup>1</sup> R. I. Enikeev,<sup>1</sup> W. Fulgione,<sup>5,3</sup> P. Galeotti,<sup>2,3</sup> M. Garbini,<sup>4,7</sup> P. L. Ghia,<sup>8</sup> P. Giusti,<sup>4</sup> E. Kemp,<sup>9</sup> A. S. Malgin,<sup>1,7</sup> A. Molinario,<sup>2,3</sup> R. Persiani,<sup>4</sup> I. A. Pless,<sup>10</sup> O. G. Ryazhskaya,<sup>1,7</sup> G. Sartorelli,<sup>4</sup> I. R. Shakiryanova,<sup>1</sup> M. Selvi,<sup>4</sup> G. C. Trinchero,<sup>2,3</sup> C. F. Vigorito,<sup>2</sup> V. F. Yakushev,<sup>1</sup> and A. Zichichi<sup>4,7</sup>  
(I.V.D. Collaboration)

Анализ с использованием передовых спектральных методов: когерентности вейвлет-преобразования (WTC) и анализа сингулярного спектра (SSA).

Помимо хорошо известной годовой модуляции интенсивности мюонов, мы выявили две многолетние компоненты с периодами около 4 и 10 лет.

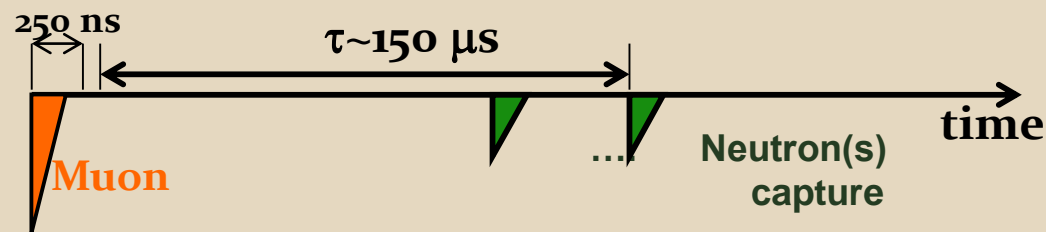
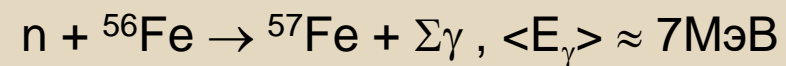
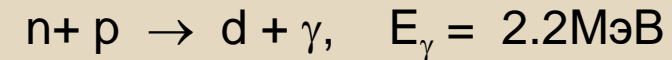


# Вариации интенсивности полного потока мюонов

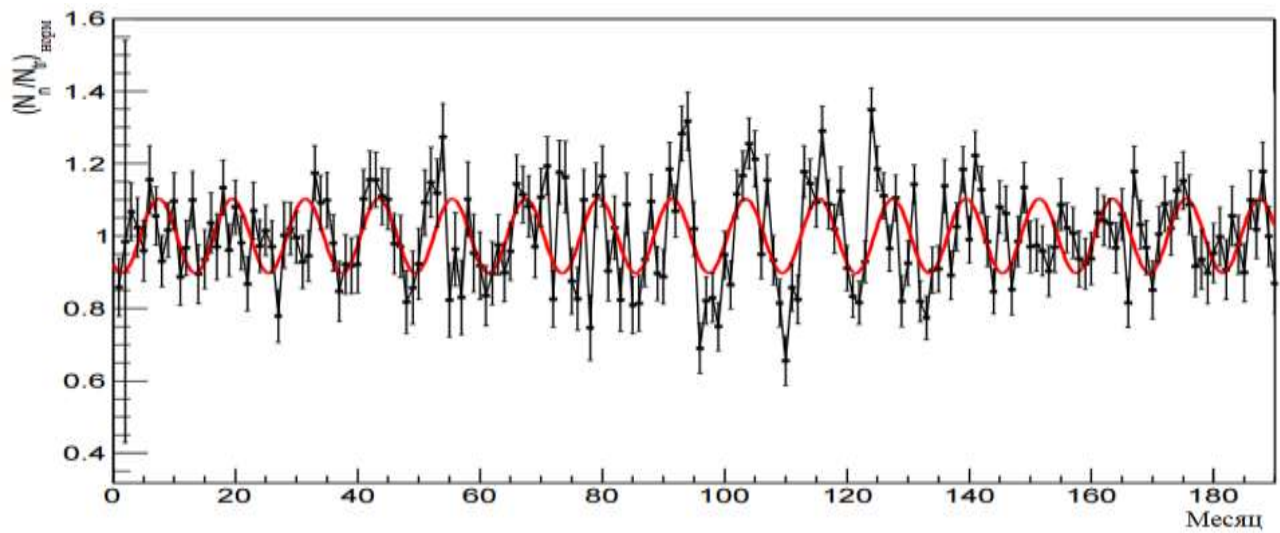


# Нейтроны от мюонов

$$\frac{\delta N_\mu}{N_\mu} = 1.5\%$$

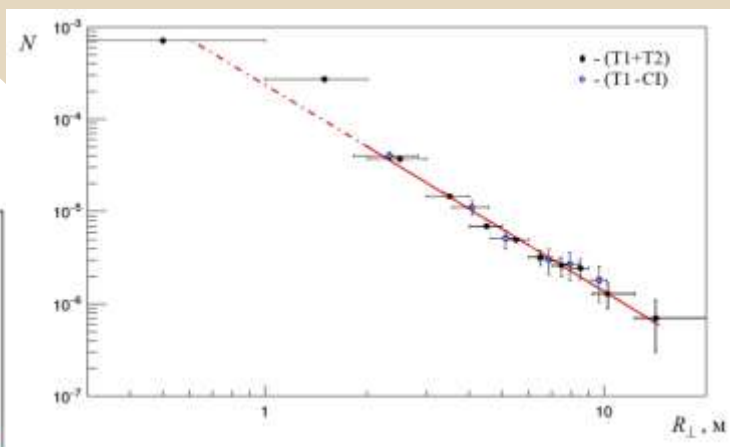
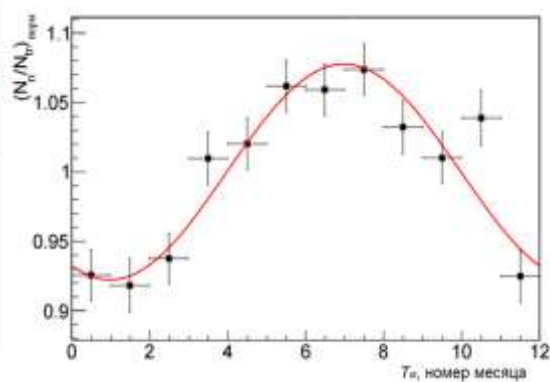


# Вариации нейтронов, генерированные мюонами

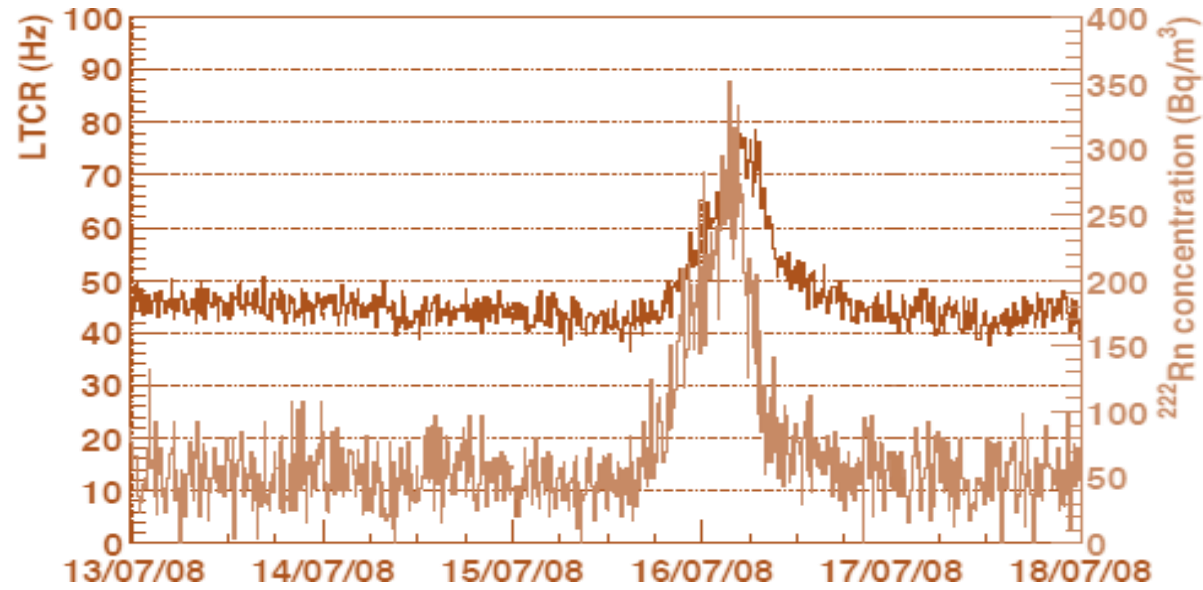


# Пространственное распределение нейтронов

$$\frac{\delta N_n}{N_n} = 7.7\%$$



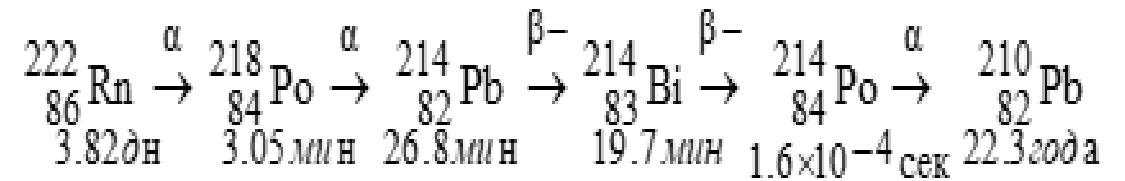
# Гамма-Фон



*Скорость счета LVD по низкому порогу, соотнесенная с показаниями радонметра.*

*Установка LVD регистрирует гамма-кванты от распадов дочерних ядер радона  $^{222}\text{Rn}$ , период полураспада которого 3.8 дня.*

*Основная задача LVD - регистрация нейтрино от вспышек Сверхновых. Фоном для поиска нейтрино являются мюоны и гамма-кванты от естественной радиоактивности.*



*На изменение концентрации радона влияют геофизические, техногенные факторы и сейсмическая активность, что приводит к ускоренному высвобождению радона из почвы*

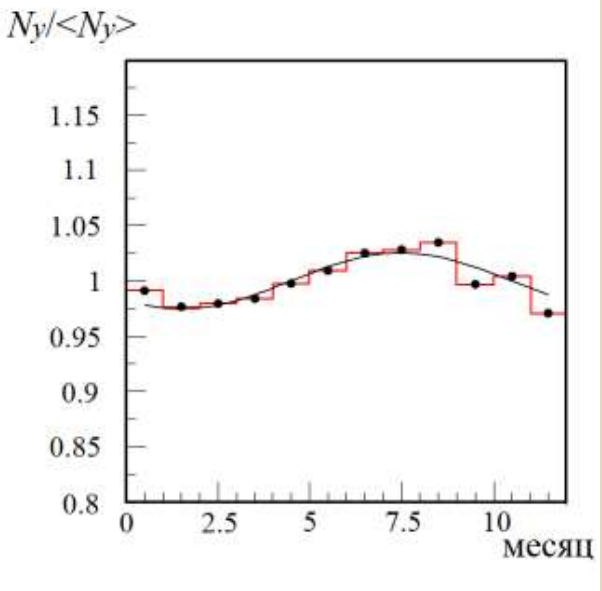
*Открывание и закрывание ворот в зал, где находится установка: приточная вентиляция создает избыток давления, при открывании ворот давление падает и радон из стен начинает интенсивно выходить.*

*Прохождение машин по транспортному туннелю: вызывает вибрацию грунта, вследствие чего увеличивается выход радона в атмосферу зала.*

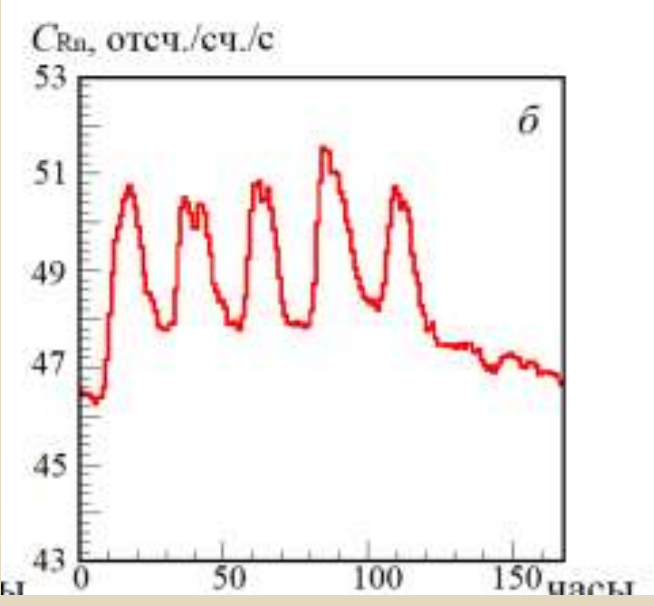
*Сезонные вариации концентрации радона: летом насыщенность водой грунта выше, что приводит к ускоренному переносу радона.*

*Сейсмическая активность: при деформациях земной коры увеличивается количество микротрещин, возникает напряжение и усиливается вибрация грунта, что приводит к значительному повышению концентрации радона.*

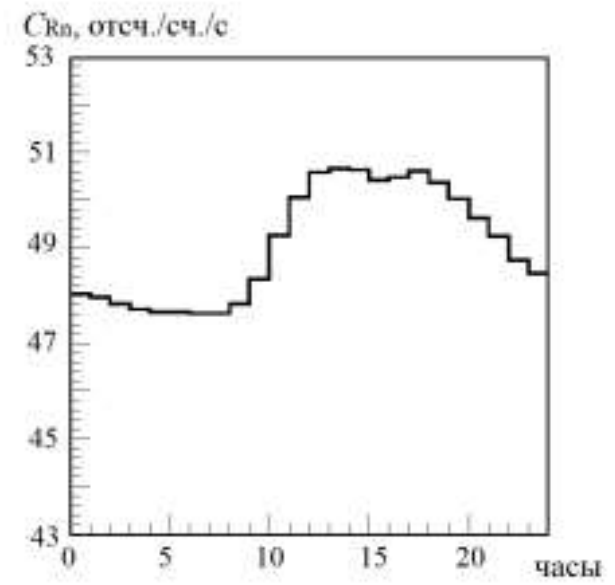
*Приливные силы, связанные с лунным циклом: вероятно, должны усиливать выход радона.*



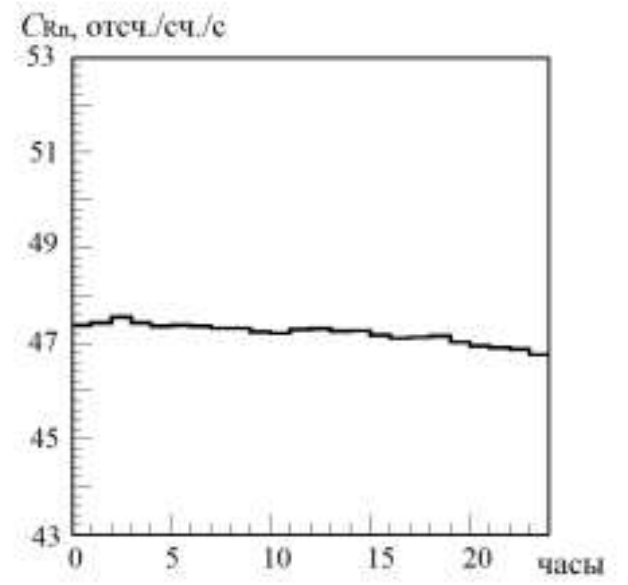
Годовые вариации темпа счета



Недельные вариации темпа счета

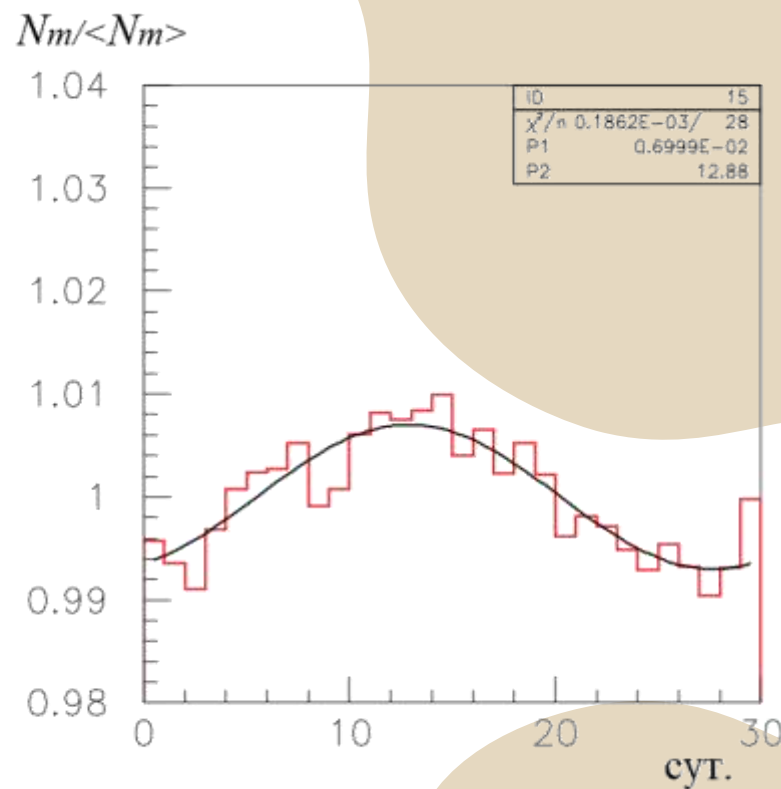
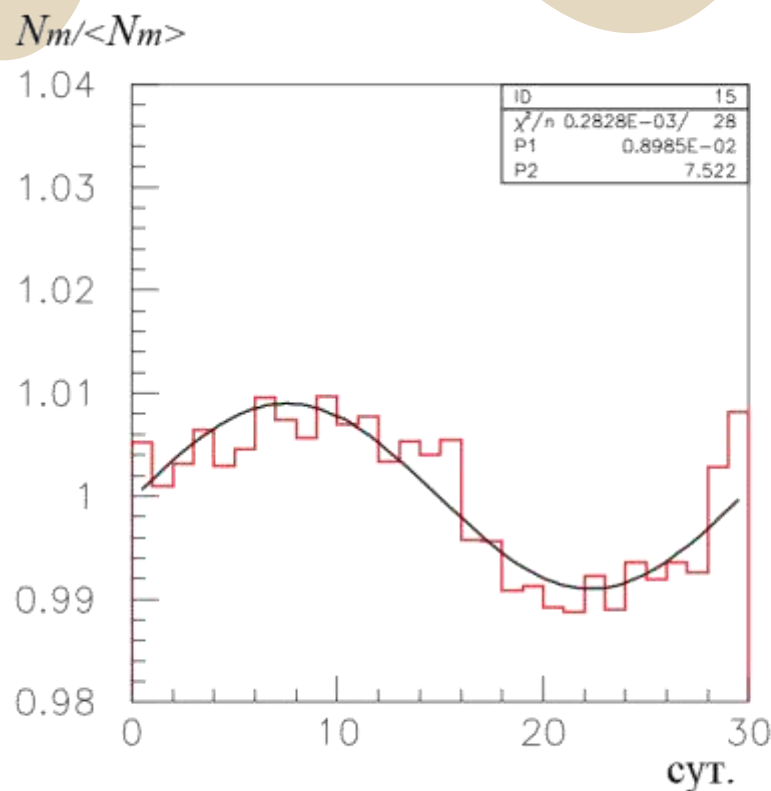


Суточные



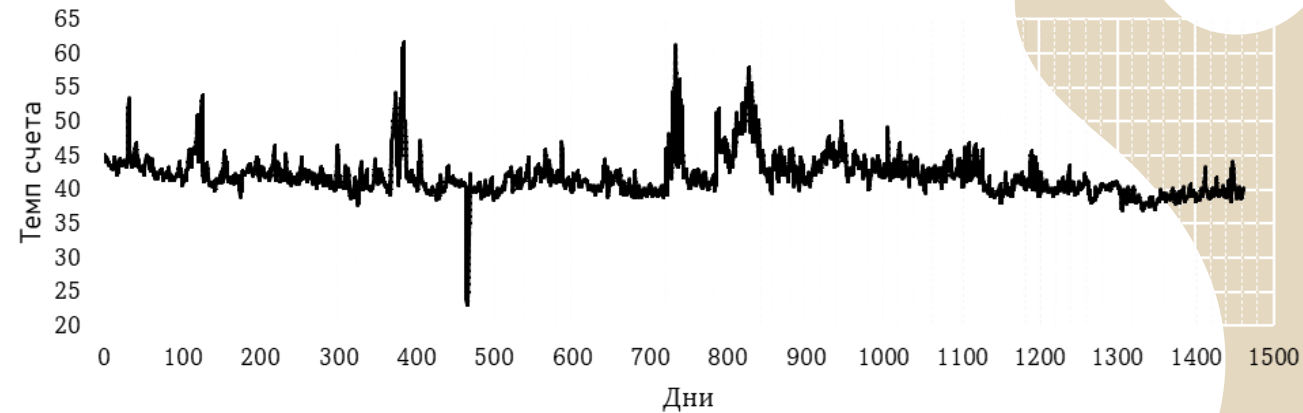
# Вариации темпа счета установки

# Влияние Лунных Циклов. Результат метода наложения лунно-месячных эпох

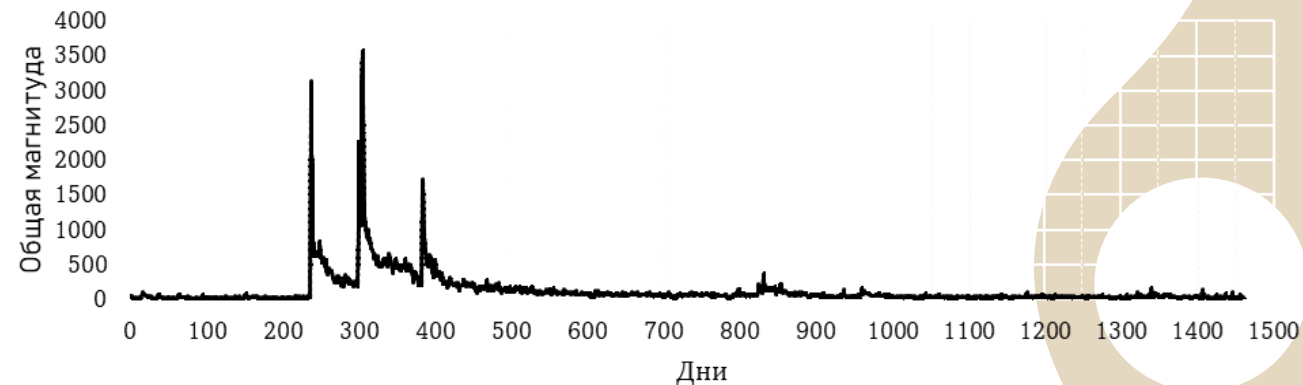


$N_m(t) = 1 + \delta N_m / \langle N_m \rangle \times \cos(2\pi(t - \varphi_m) / T)$   
с бином 1 сутки и  $T=29,5$  сут. Были получены значения величин модуляции  $\delta N_m / \langle N_m \rangle = (0,8 \pm 0,15)\%$  и фаза  $\varphi_m$  (максимум кривой) соответствует дню полнолуний. Фаза лунно-месячных вариаций – полнолуние – получается одинаковой для любого периода наблюдений (2004—2008, 2009—2019).

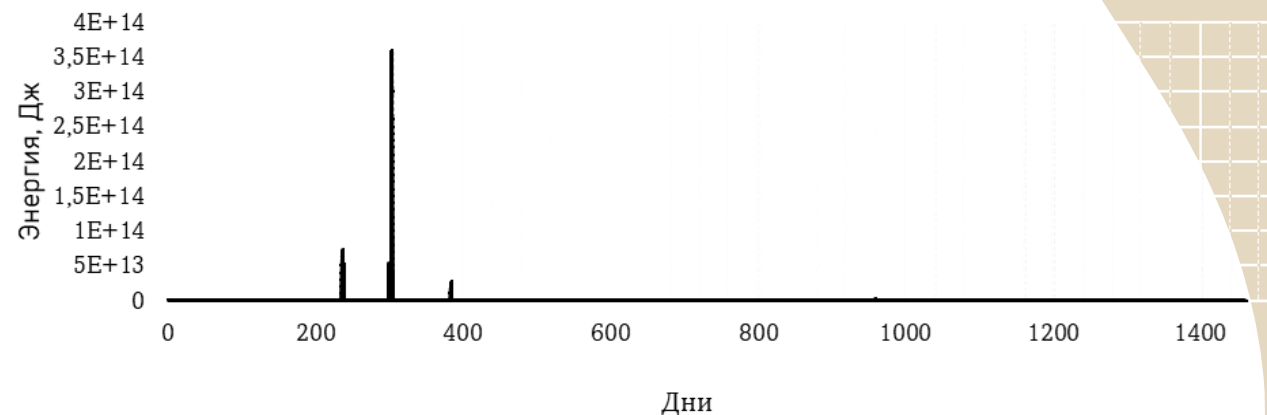
Средний суточный темп счета установки 2016-2019 года



Общая магнитуда в 250 км вокруг установки 2016-2019



Общая энергия, Дж, пересчет с магнитуды



# Период: 2016 – 2019 года

$$\lg E \text{ (эрг)} = 1,5M + 11,8$$

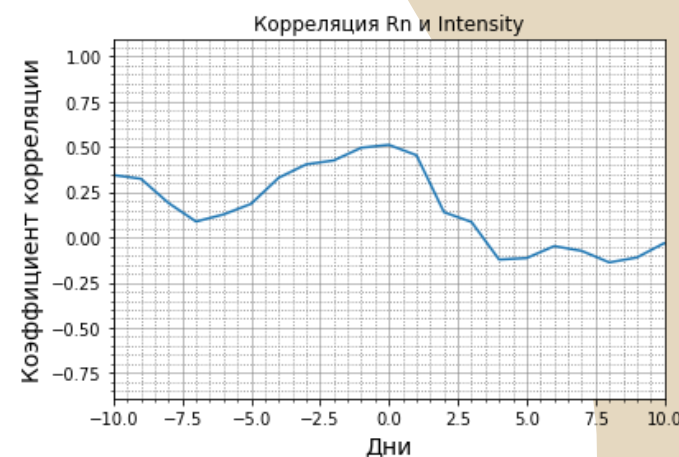
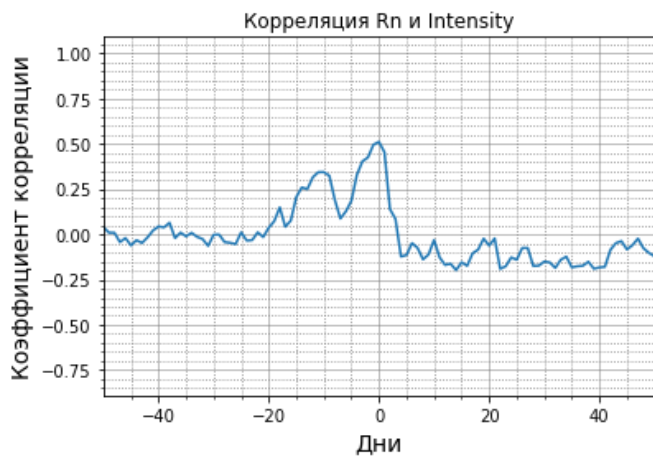
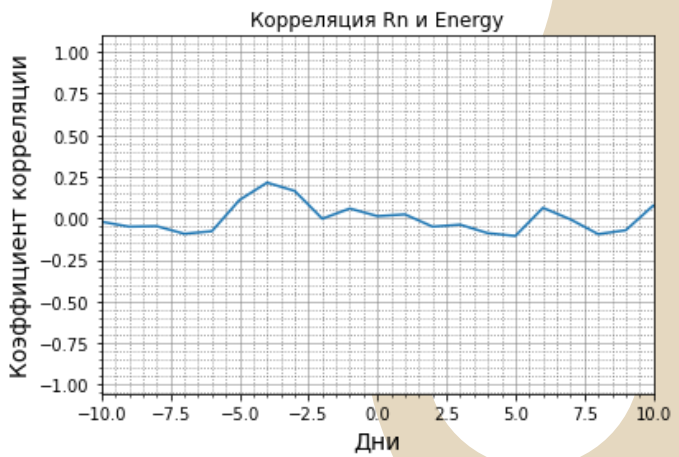
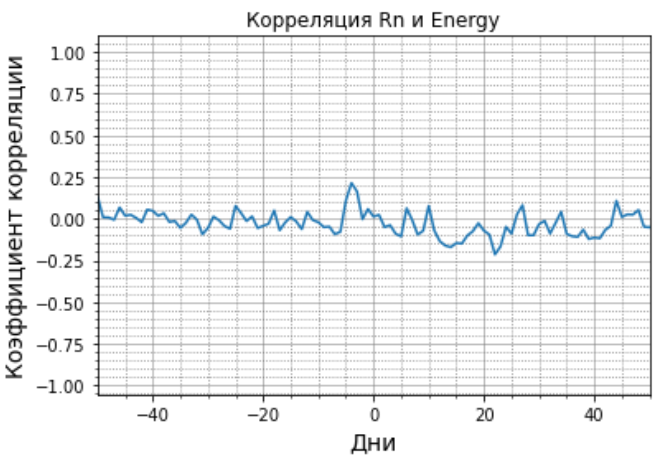
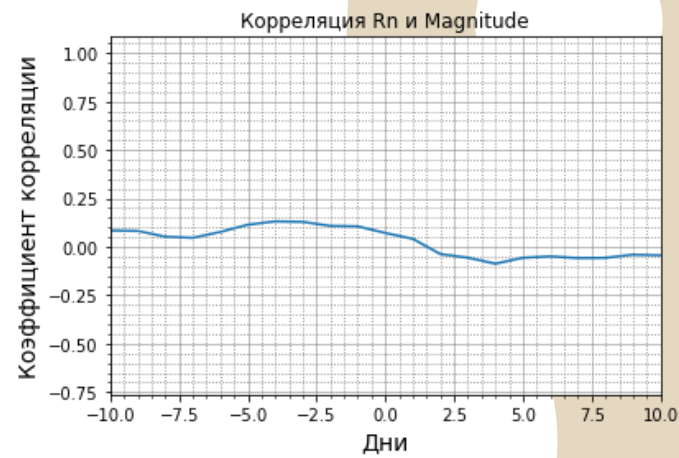
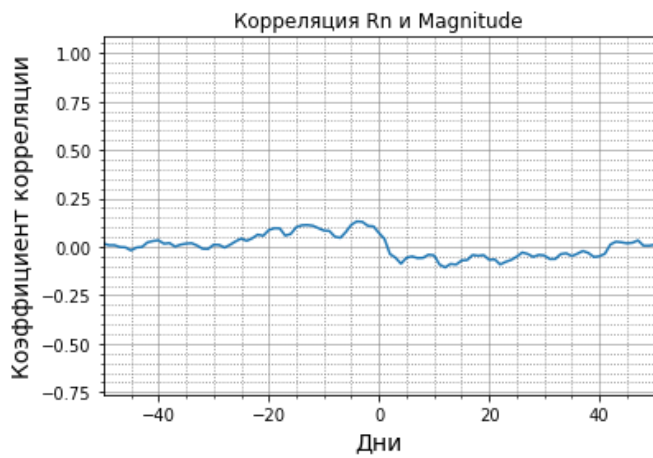
$$E \text{ (эрг)} = 10^{1,5M+11,8}$$

$$E = 10^{16} \text{ Дж} = 10^{23} \text{ эрг}$$

$$I = 3 + 1,5 * M - 3,5 * \lg(\sqrt{H^2 + R^2})$$

Подсчет коэффициентов корреляции Пирсона показал отсутствие зависимости темпа счет установки от магнитуды и энергии

# Период: 2016 – 2019 года



$$\lg E (\text{эрг}) = 1,5M + 11,8$$

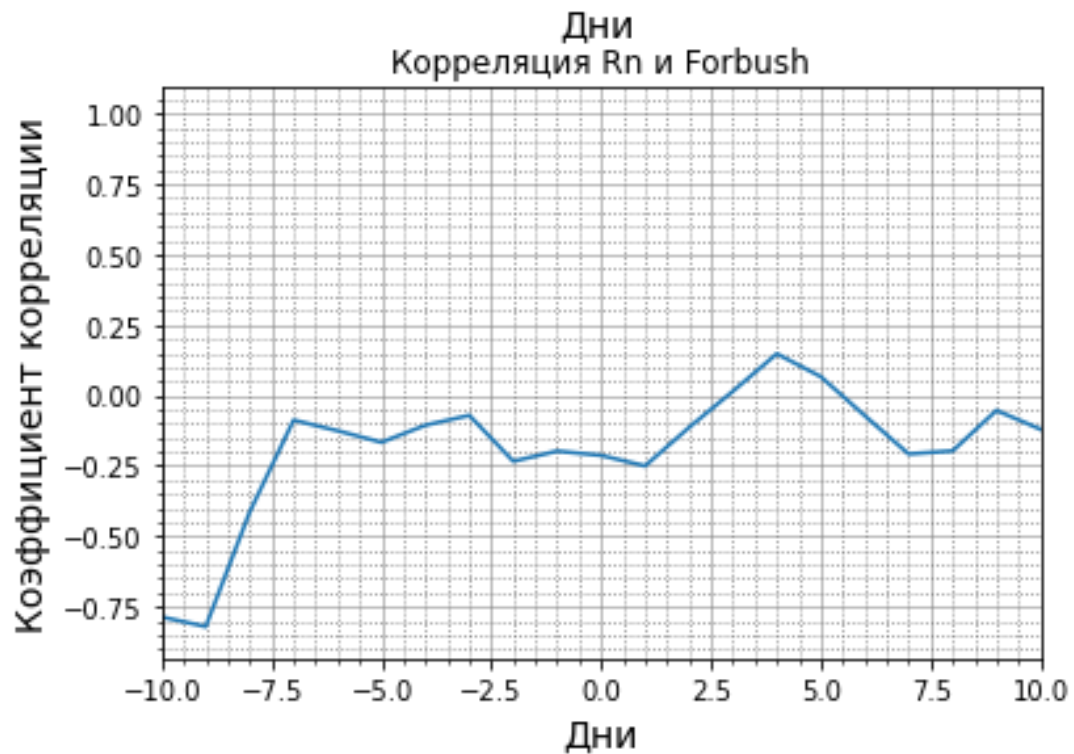
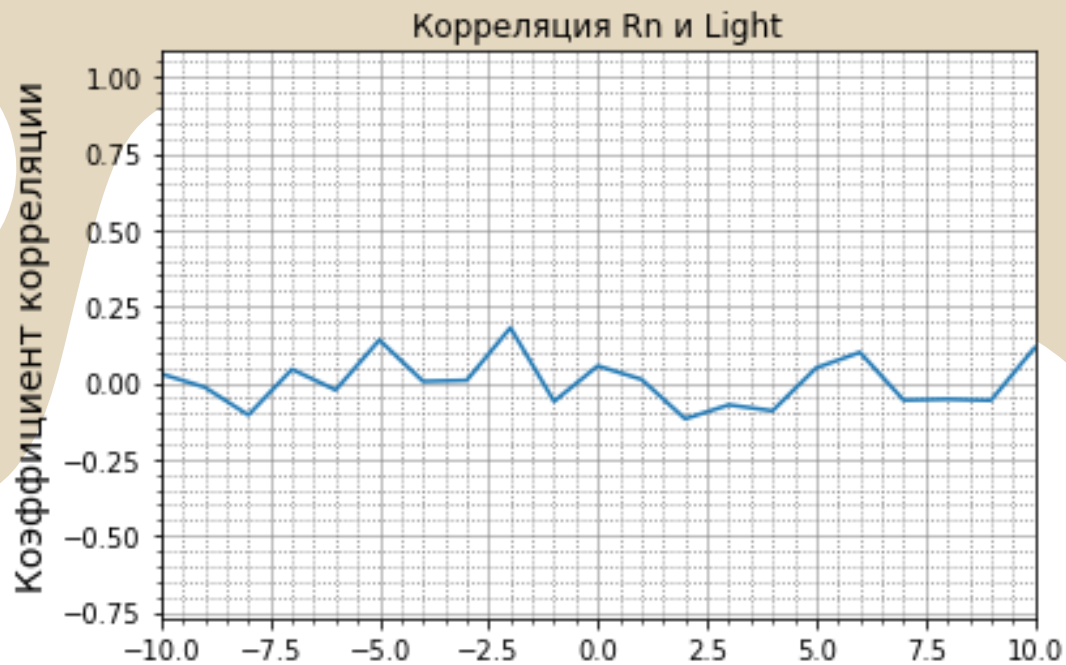
$$E (\text{эрг}) = 10^{1,5M+11,8}$$

$$E = 10^{16} \text{ Дж} = 10^{23} \text{ эрг}$$

$$I = 3 + 1,5 * M - 3,5 * \lg(\sqrt{H^2 + R^2})$$

Результаты корреляционного анализа показывают отсутствие корреляции с магнитудой и энергией.

Однако на графике Rn-Intensity виден рост корреляции данных в области предсказания



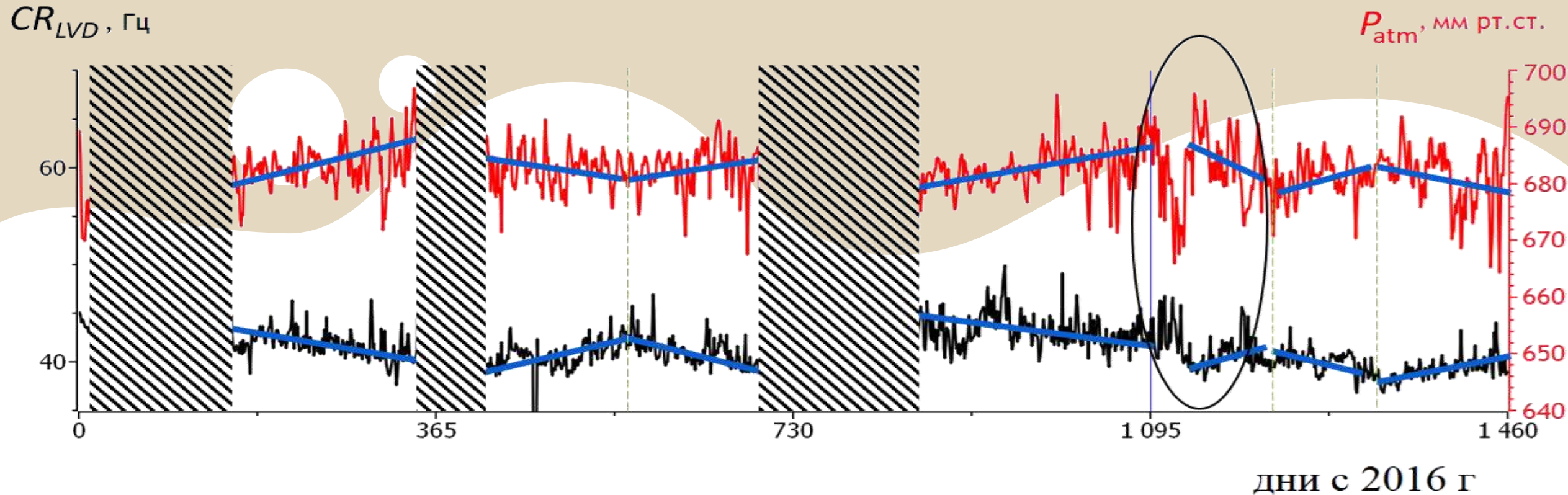
# Период: 2016 – 2019 года

Результаты корреляционного анализа показывают отсутствие корреляции радоновых данных с грозами

Интерпретация графика корреляций Rn-Forbush говорит о возможном небольшом повышении корреляции в районе 4 дней после Форбуш-эффекта. Принято решение посмотреть часовые данные интенсивности космических лучей.



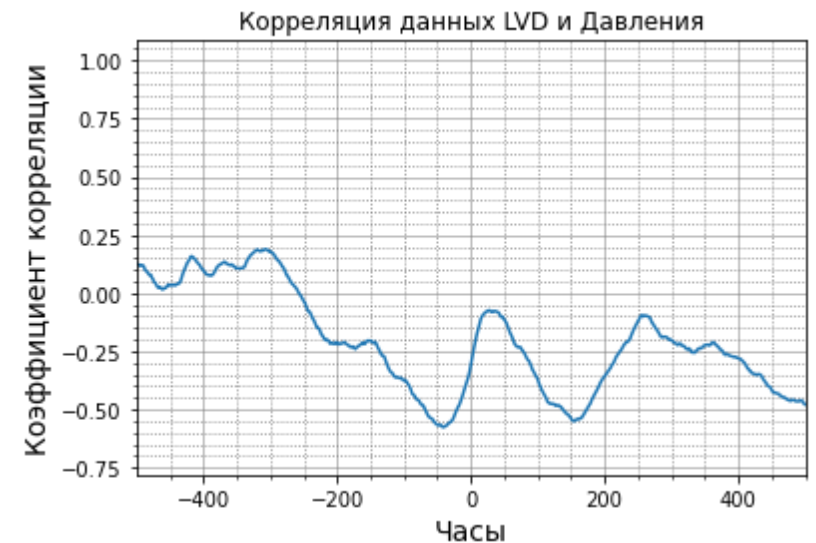
# Антикорреляция между временными рядами фоновых событий LVD и атмосферного давления на поверхности.



Временные ряды атмосферного давления  $P_{atm}$  на поверхности (верхняя кривая, значения справа) и  $CR_{LVD}$  скорости счета LVD (нижняя кривая, значения слева) за 4 года наблюдений. Заштрихованные области - периоды аномальных выбросов в данных LVD, связанных, вероятно, с тектонической активностью в регионе.

# Антикорреляция между временными рядами фоновых событий LVD и атмосферного давления на поверхности

Результаты корреляционного анализа показывают наличие антикорреляции с коэффициентом  $-0.57$  в точке  $-41$  час





# Выводы и Дальнейшие планы

Детектор LVD собираются разобрать, однако мы продолжаем заниматься обработкой данных по мюонам, нейтронам и радиоактивности.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке по гранту Российского научного фонда 23-22-00048, <https://rscf.ru/project/23-22-00048/>.