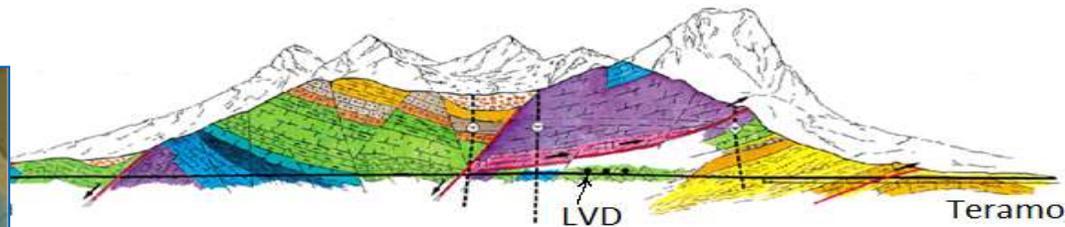


# **Лунно-месячные вариации гамма-квантов как фона для нейтринного эксперимента LVD**

Н.Ю. Агафонова, Е.А. Добрынина, Н.А. Филимонова, И.Р. Шакирьянова,  
В.В. Ашихмин, Р.И. Еникеев, В.Ф. Якушев  
и LVD Коллаборация

# Детектор Большого Объема LVD



Длина ×Ширина×Высота	22.7×13.2×10м
Масса железа	1020 т
Масса сцинтиллятора	1008 т
Число сцинт. счетчиков	840
Число PMTs (ФЭУ)	2520
Средняя глубина (минимальная)	3620 м в.э. (3000 м в.э.)
Средняя энергия мюонов	280 ГэВ
$E_{\mu}$ на уровне моря (мин.)	1.3 ТэВ
Скорость счета мюонов (на 1 башню)	$\sim 120 \text{ ч}^{-1}$
$\varepsilon_{\text{th}}$ порог	4 МэВ (0.5 МэВ)

Основная задача – **регистрация нейтрино от коллапсов звездных ядер**

# Фон детектора при поиске $\nu$

МЮОНЫ К.Л.

ЕСТЕСТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ

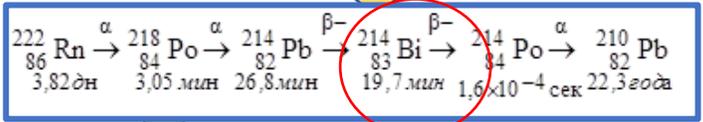
Ядерные ливни

Эл.-магн. ливни

$^{222}\text{Rn}$  - радон в помещении

$^{238}\text{U}, ^{232}\text{Th}$  - в скале и материалах установки

$^{40}\text{K}$



Спонтанное деление

$\alpha$ -распад

( $\alpha, n$ )-реакция

( $\alpha, n$ )-реакция

нейтроны

нейтроны

нейтроны

нейтроны

$\gamma$

$\gamma$

$\gamma$

$\gamma$

$\gamma$

$\gamma$

$\gamma$

$E_\gamma < 10 \text{ МэВ}$

$E_\gamma < 10 \text{ МэВ}$

0.6–2.4 МэВ

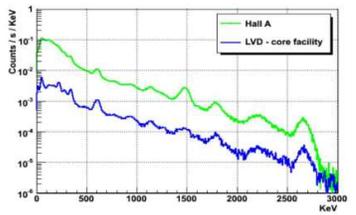
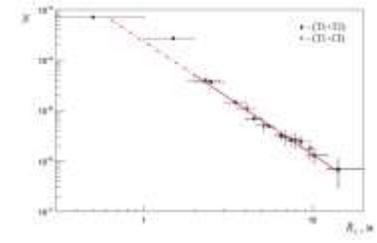
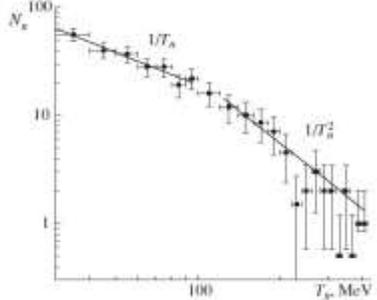
$E_\gamma < 10 \text{ МэВ}$

3–10 МэВ

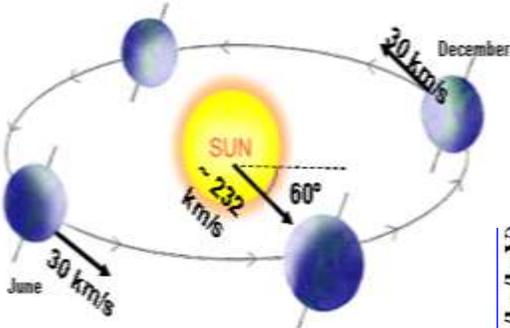
$E_\gamma < 10 \text{ МэВ}$

1.4 МэВ

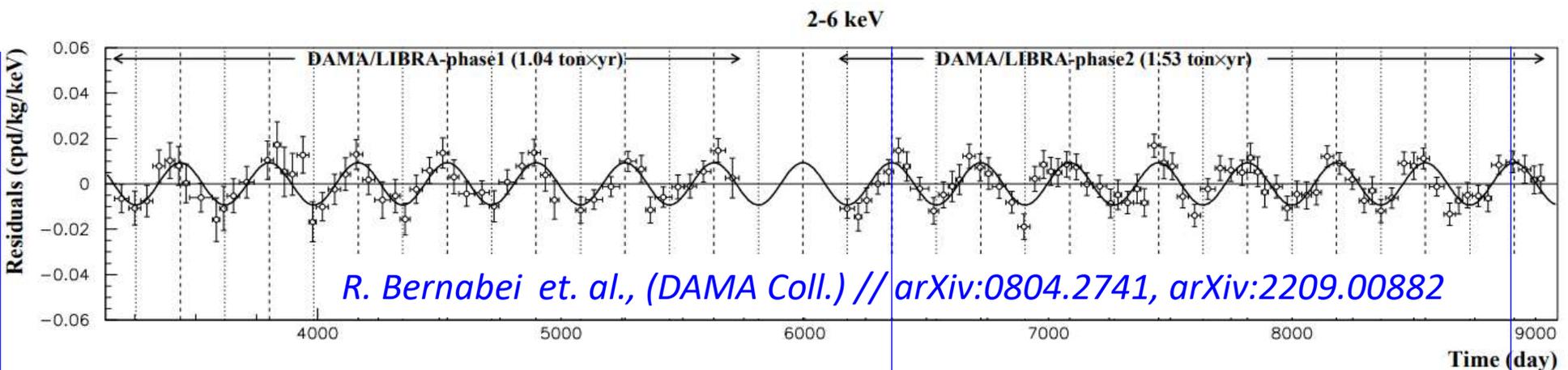
β-распад



# Мотивация I

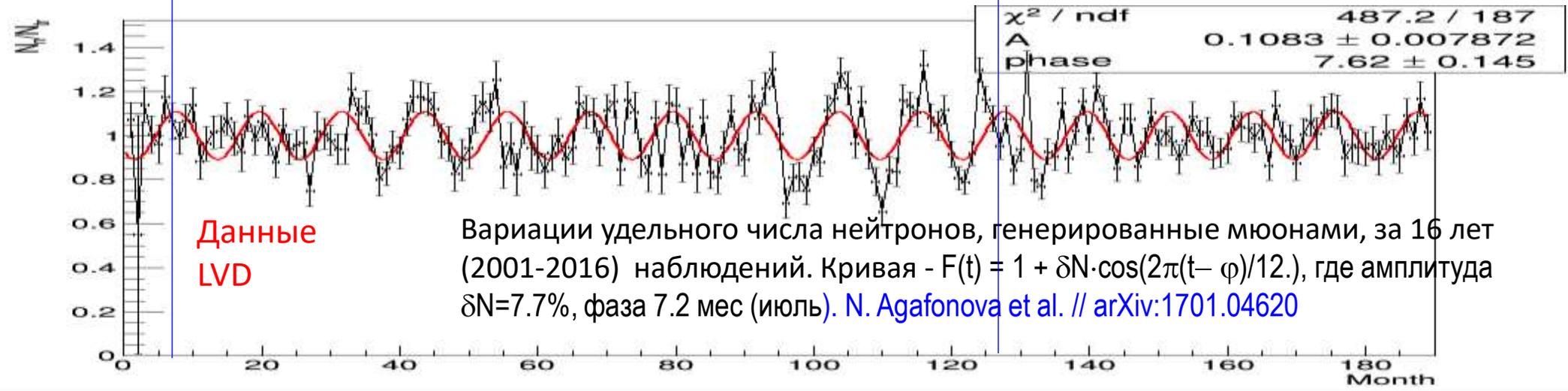


Обнаружение сигналов от взаимодействия темной материи. Вариация сигналов имеет синусоидальный характер и связан с движением земли в солнечной системе относительно гало нашей галактики. 2 июня скорость движения Земли сквозь гало максимальна.



*R. Bernabei et. al., (DAMA Coll.) // arXiv:0804.2741, arXiv:2209.00882*

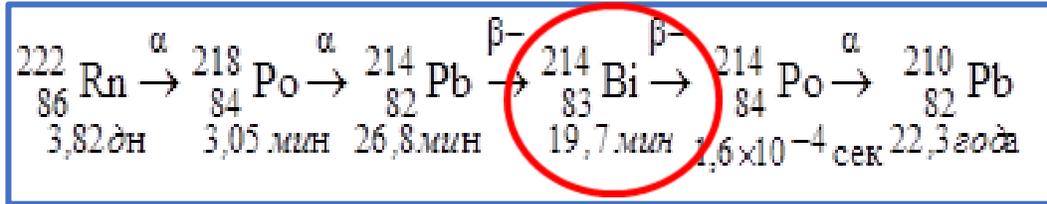
Экспериментальная скорость одиночных сцинтилляционных событий, измеренная с помощью DAMA/LIBRA-phase1 и DAMA/LIBRA-phase2 в интервалах энергий (2–6) кэВ, как функция времени. Наложенная кривая представляет собой косинусоидальные функциональные формы  $T = A \cos \omega(t - t_0)$  с периодом  $T = 2\pi/\omega = 1$  год, фазой  $t_0 = 152,5$  дня (2 июня) и амплитудой модуляции  $A$ .



Данные  
LVD

Вариации удельного числа нейтронов, генерированные мюонами, за 16 лет (2001-2016) наблюдений. Кривая -  $F(t) = 1 + \delta N \cdot \cos(2\pi(t - \phi)/12.)$ , где амплитуда  $\delta N = 7.7\%$ , фаза 7.2 мес (июль). *N. Agafonova et al. // arXiv:1701.04620*

# Регистрация событий в LVD от естественной радиоактивности



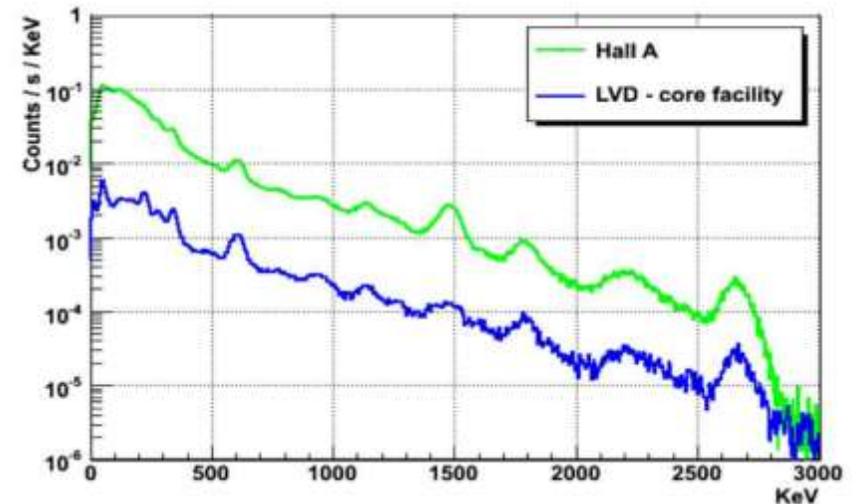
Основными источниками фона по низкому порогу в LVD являются естественная радиоактивность грунта и радон.

Мониторинг концентрации радона осуществляется с помощью регистрации  $\gamma$ -квантов от распадов дочерних ядер  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ , период полураспада которого 3,8 дня.

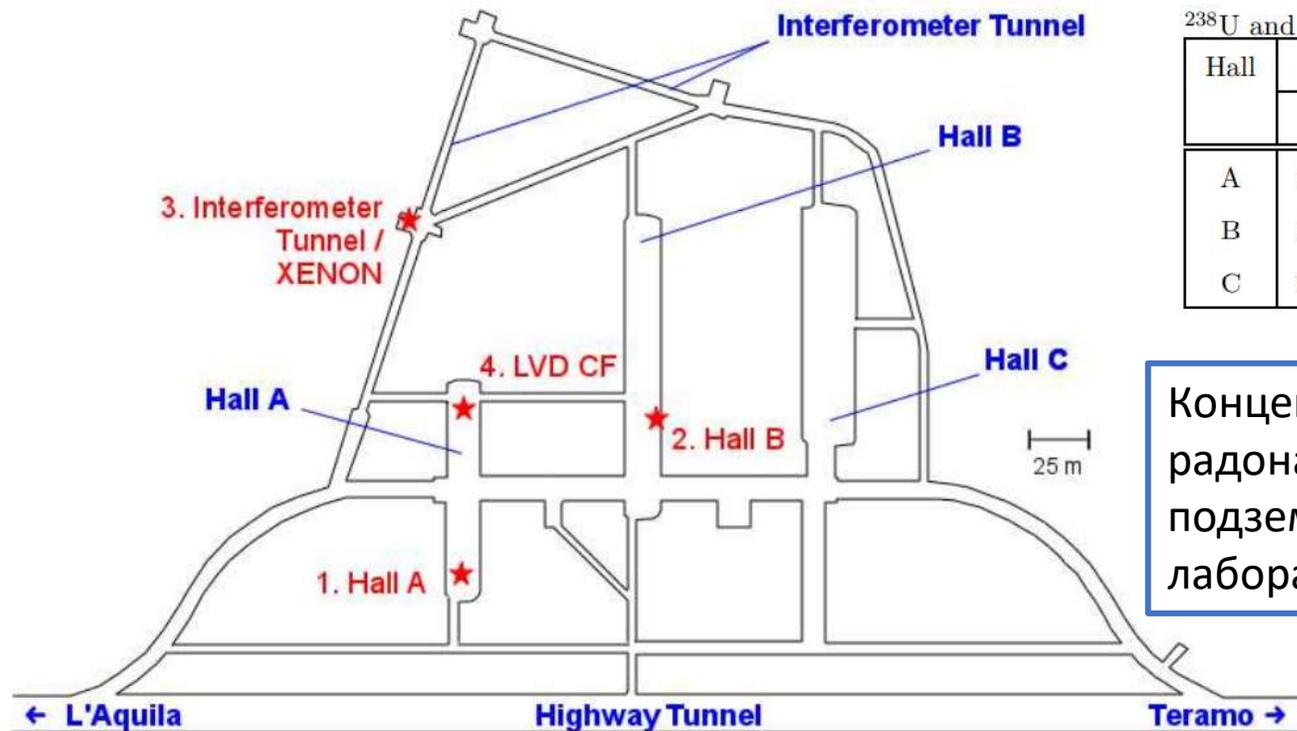
Энергия $\gamma$ -кванта, МэВ	Количество $\gamma$ -квантов на 100 ядер ${}^{214}\text{Bi}$
0,609	47
1,764	17
1,120	17
1,238	6
2,204	5
1,378	5
0,769	5
1,400	4
2,445	2

Темп счета LVD по низкому порогу, соотнесенный с показаниями радонметра

Средняя концентрация ${}^{222}\text{Rn}$	
Hall A	26 Bq/m <sup>3</sup>
Hall B	43 Bq/m <sup>3</sup>
Hall C	104 Bq/m <sup>3</sup>



Энергетический спектр гамма-квантов, измеренный внутри LVD (синяя линия) и в зале А (зеленая линия).



$^{238}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$  activities in LNGS rock.

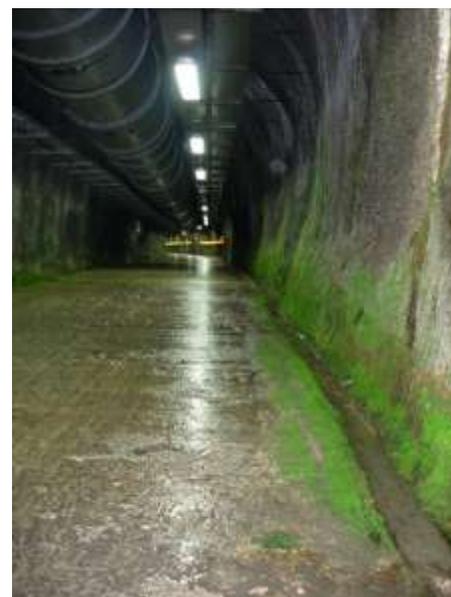
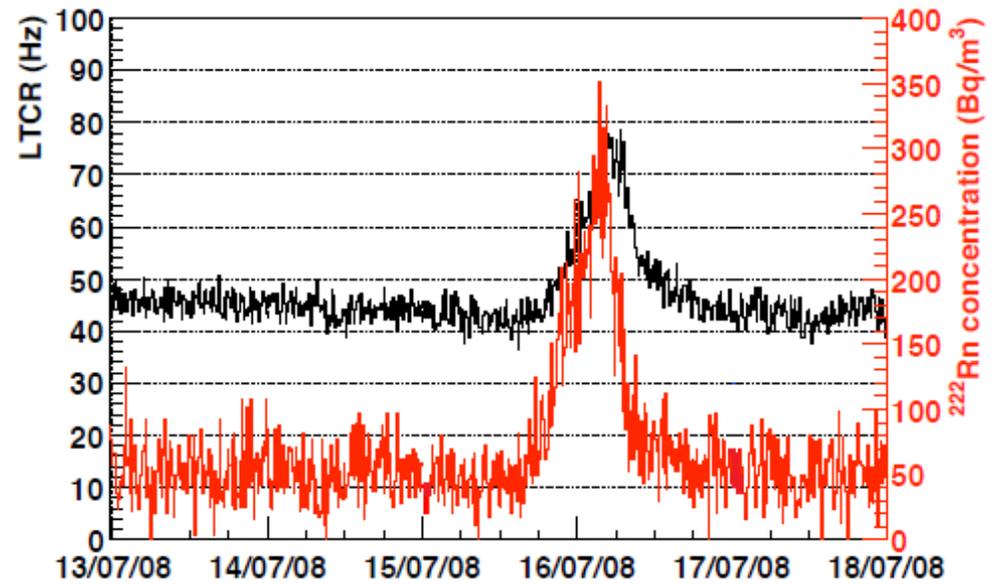
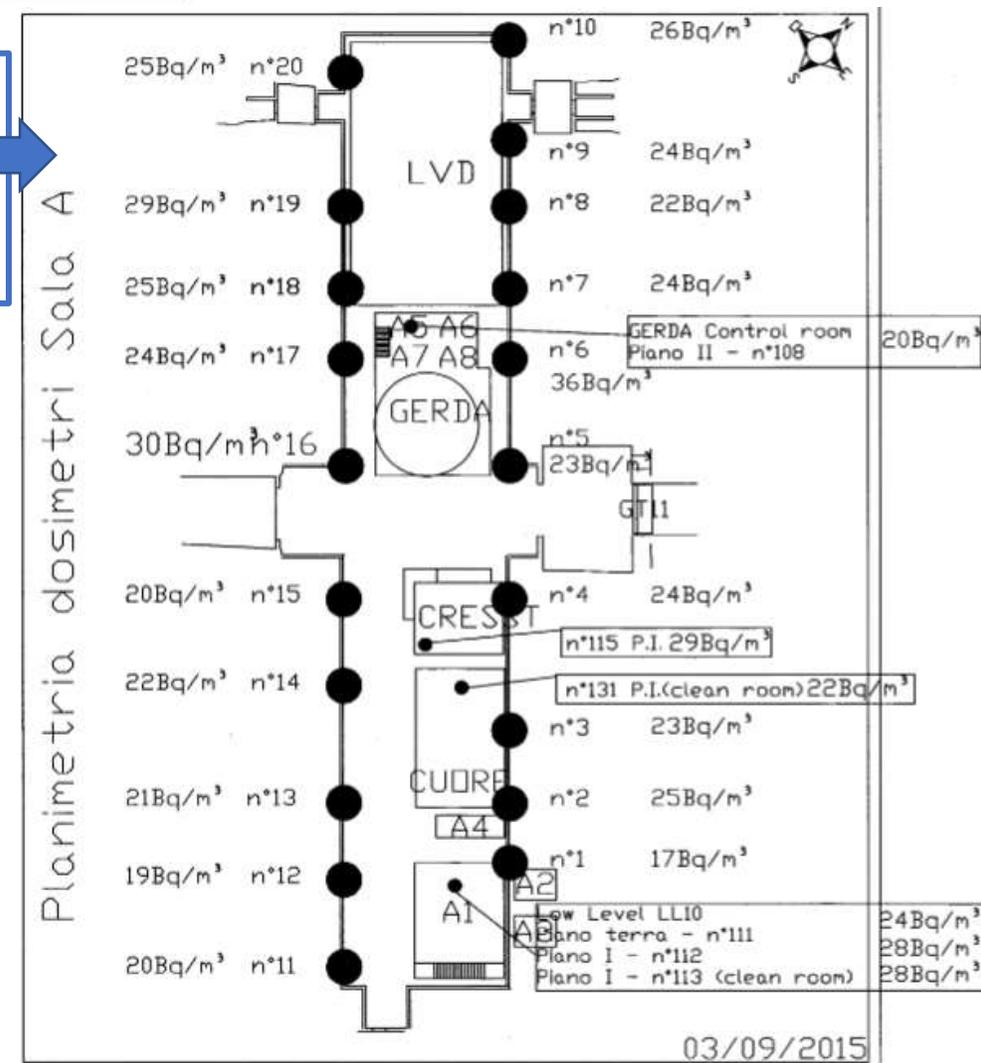
Hall	Activities (ppm)	
	$^{238}\text{U}$	$^{232}\text{Th}$
A	$6.80 \pm 0.67$	$2.167 \pm 0.074$
B	$0.42 \pm 0.10$	$0.062 \pm 0.020$
C	$0.66 \pm 0.14$	$0.066 \pm 0.025$

Chemical composition of LNGS rock.

Element	C	O	Mg	Al	Si	K	Ca
% Weight	11.88	47.91	5.58	1.03	1.27	1.03	30.29

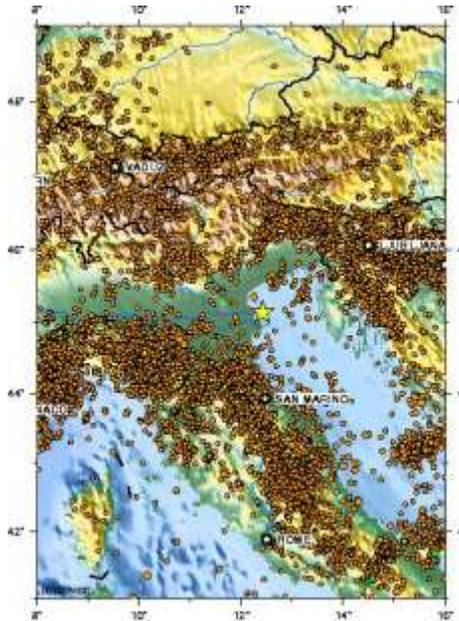
порода Гран-Сассо содержит в основном  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{MgCO}_3$ , плотность  $2,71 \pm 0,05 \text{ г/см}^3$ .

Концентрация радона в подземной лаборатории



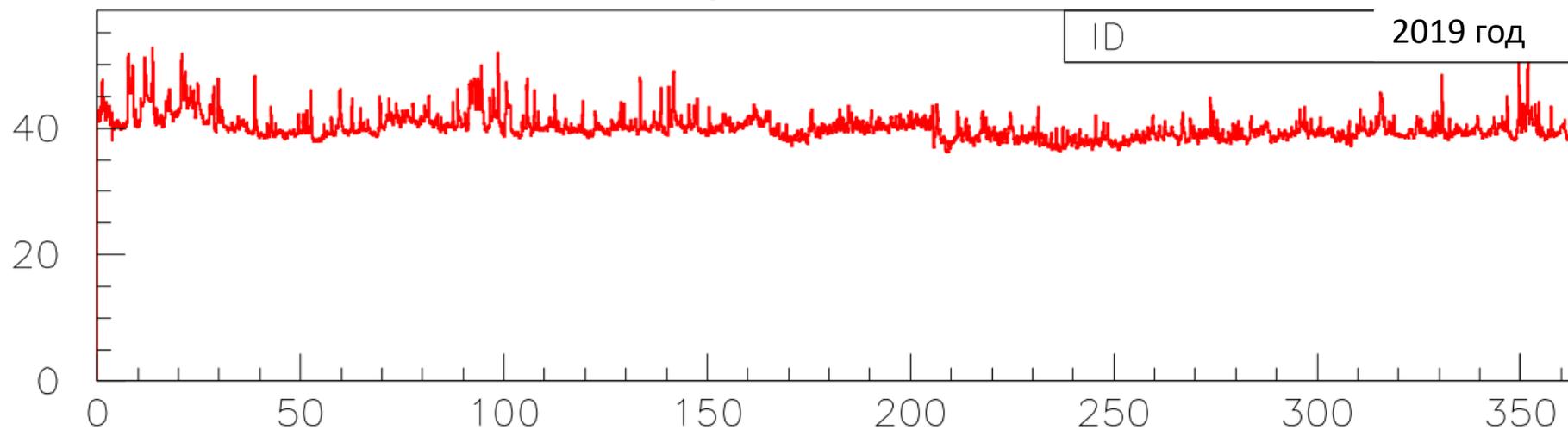
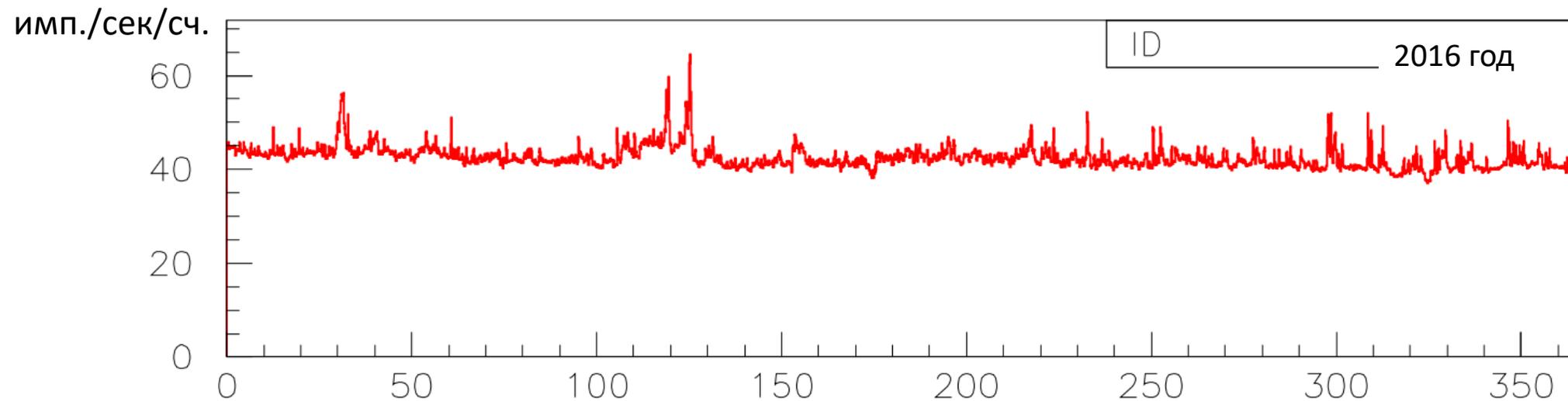
# Мотивация II

- Согласно теории дилатансно-диффузионной модели [*Aggarwal, Y. P., Sykes, L. R., Armbruster, J. & Sbar, M. L., Nature, 1973*] в качестве основной причины изменения концентрации радона предлагается изменение поля напряжений и рост трещин в горных породах. Джардини и др. [*Giardini, A. A., Subbarayudu, G. V. & Melton, C. E., Geophys. Res. Lett. 3(6), 355–358 (1976).*] также пришли к аналогичным выводам для других газов в земной коре.
- За несколько недель или всего за несколько часов до землетрясения наблюдается аномалия в концентрации радона, которая интерпретируется ее как предвестник этого события.

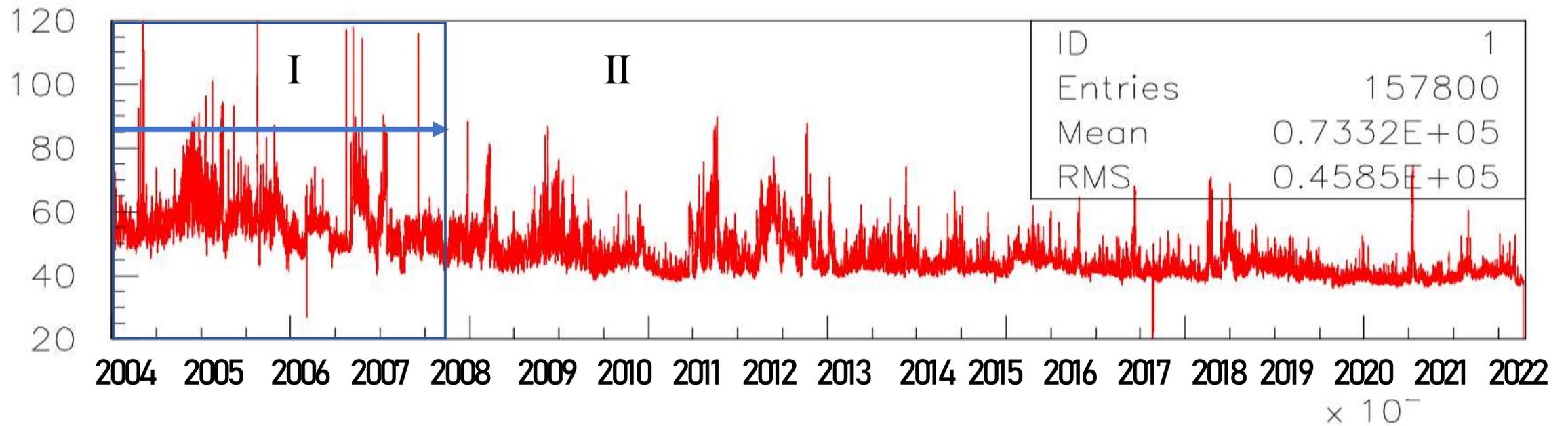
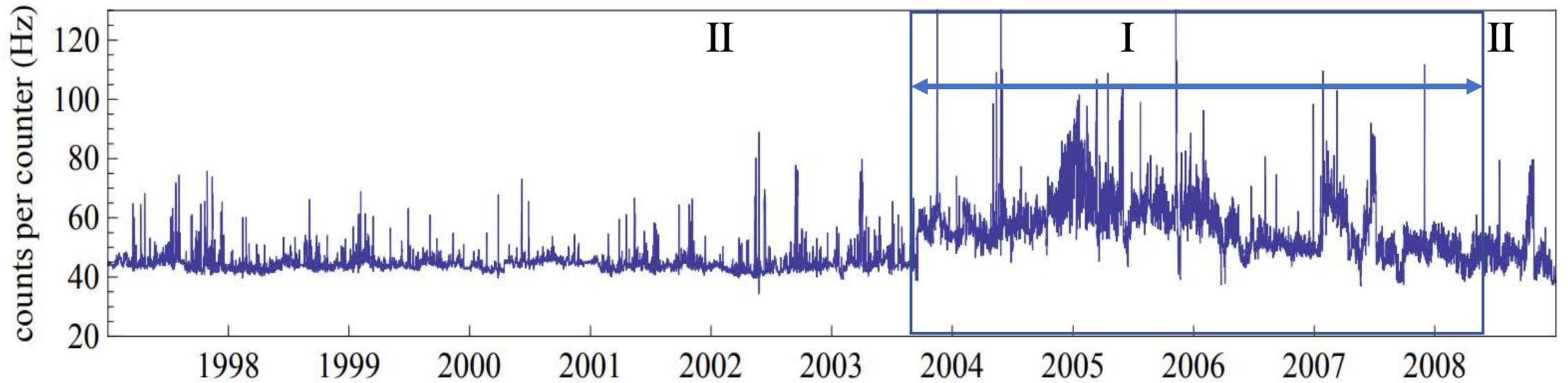


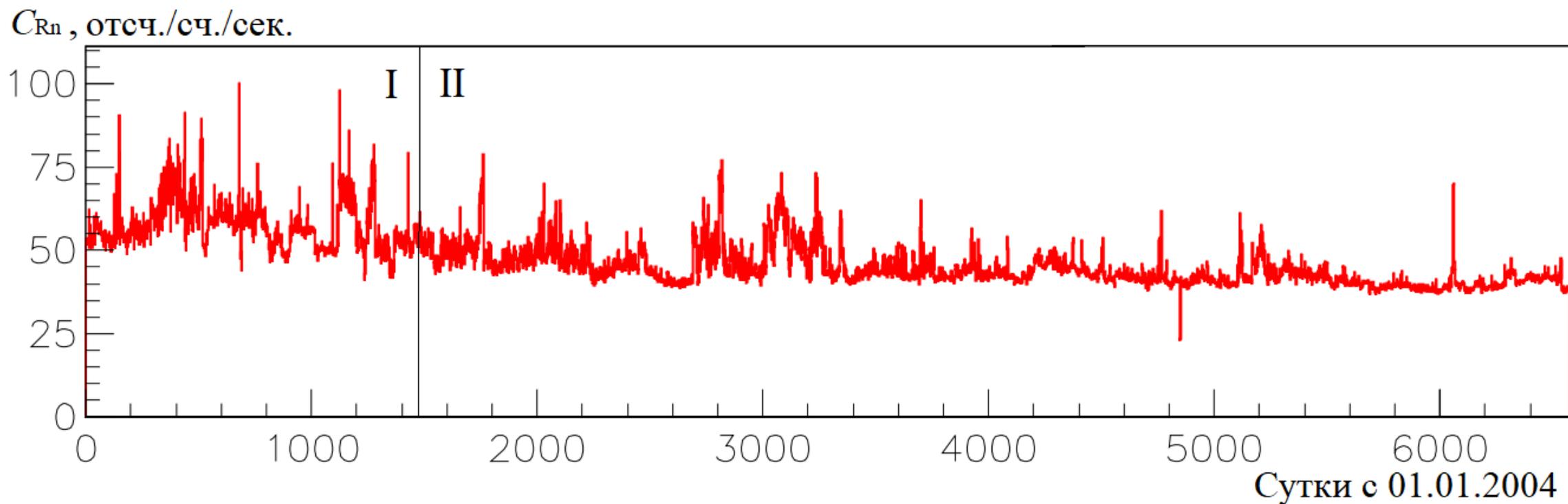
- Экспериментальные исследования показали особенно важную и прямую зависимость изменений радона от внешних факторов, таких как колебания грунта приливными силами, давления, ветра, температуры и т. д. [*Clements, W. E. & Wilkening, M. H. Atmospheric pressure effects on  $^{222}\text{Rn}$  transport across the earth-air interface. J. Geophys. Res. 79(33), 5025–5029 (1974).*; *Barbosa, S. M., Zafrir, H., Malik, U. & Piatibratova, O. Multiyear to daily radon variability from continuous monitoring at the Amram tunnel, southern Israel. Geophys. J. Int. 182(2), 829–842 (2010).*] Поскольку атмосферные колебания происходят как на ежедневной, так и на сезонной основе, иногда достигая экстремальных уровней, необходим мониторинг всех атмосферных параметров и долгосрочная корреляция с концентрацией радона в грунте.

# Временные ряды фоновых событий (примеры 2016 и 2019 года)

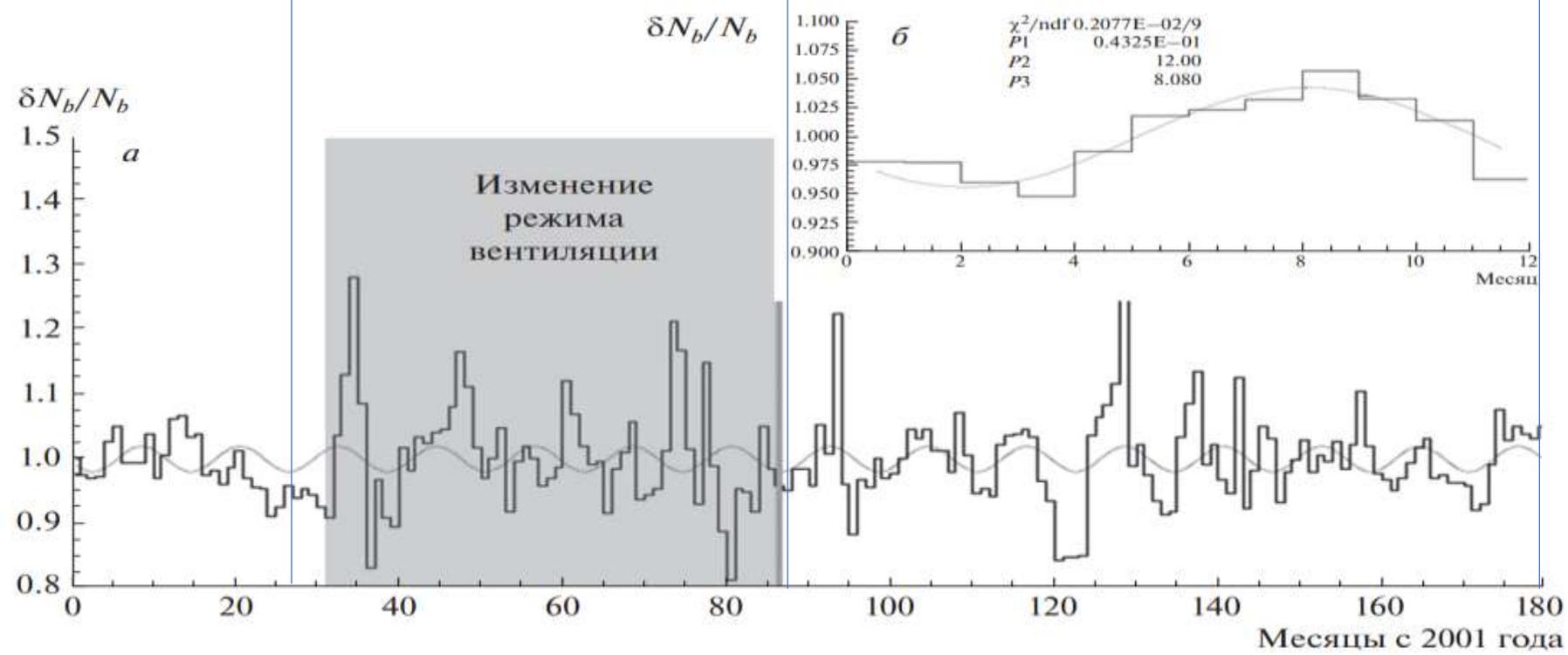
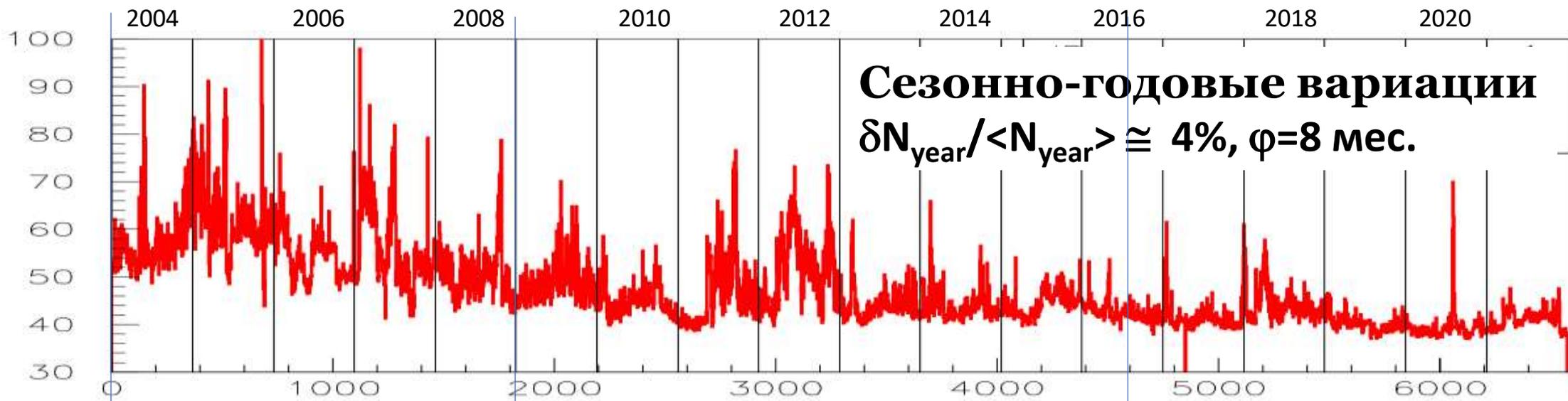


# Временной ряд часовых данных LVD



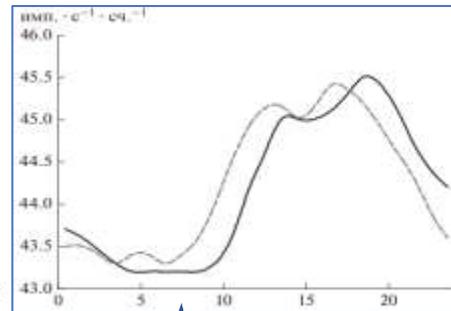
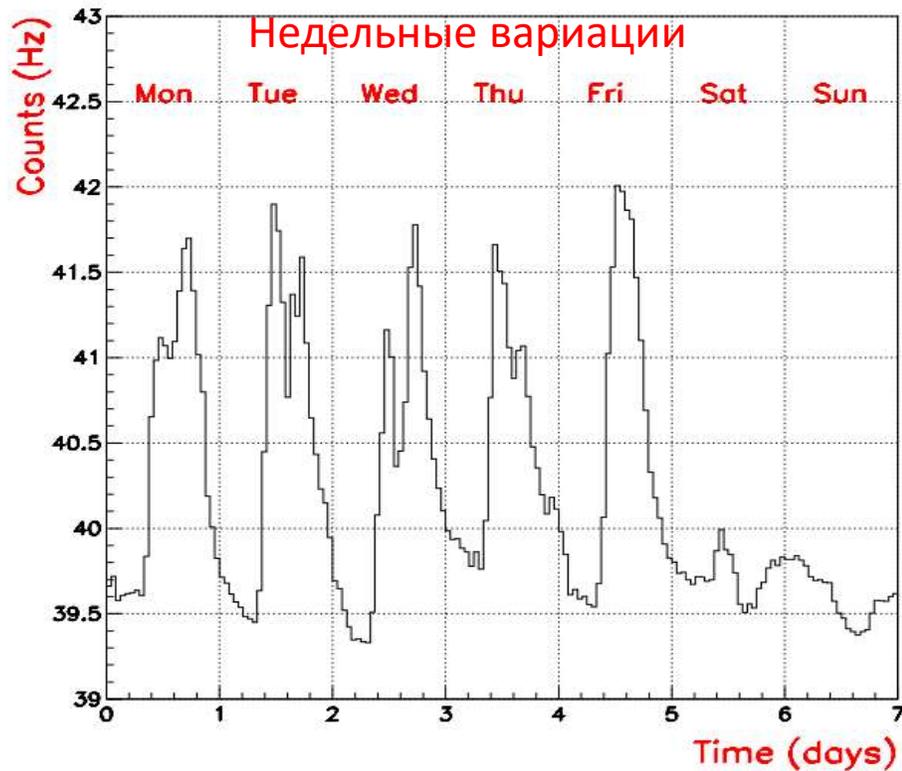


Временной ряд суточных данных LVD с 2004 по 2022 г. (18 лет)

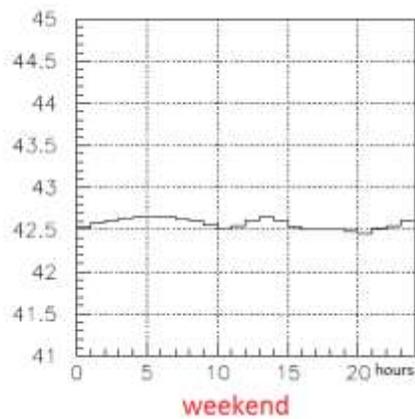
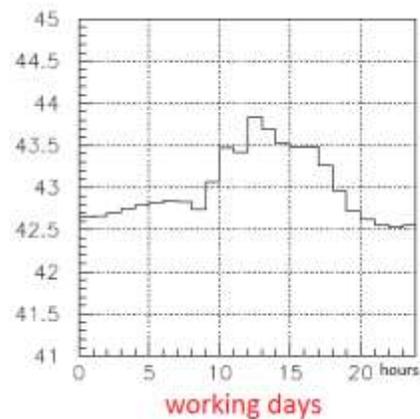


Агафонова Н.Ю. и др.  
 Известия РАН. Сер.  
 Физ., 2017, т.81 №4, с.  
 551-554

# Недельные и суточные модуляции



Переход с зимнего на летнее время



Это не гео-эффекты!  
Агафонова Н.Ю. и др. Препринт  
ИЯИ РАН 2001, Известия РАН  
Сер. Физ., 2019, том 83, № 5, с.  
673-675

# Мотивация III

ФИЗИКА ЗЕМЛИ, 2009, № 8, с. 91–100

УДК 550.3:539.1

## СВЯЗЬ ВАРИАЦИЙ ПОТОКА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ ИЗ ЗЕМНОЙ КОРЫ С ЛУНЫМИ ПЕРИОДАМИ И СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТЬЮ

© 2009 г. В. В. Алексеенко<sup>1</sup>, Ю. М. Гаврилок<sup>1</sup>, Д. М. Громушкин<sup>3</sup>, Д. Д. Джаппуев<sup>1</sup>, А. У. Куджаев<sup>1</sup>, В. В. Кузьминов<sup>1</sup>, О. И. Михайлова<sup>1</sup>, Ю. В. Стенькин<sup>2</sup>, В. И. Степанов<sup>2</sup>

Приведены результаты долговременной регистрации потока тепловых нейтронов вблизи земной поверхности с использованием незранированного сцинтилляционного детектора тепловых нейтронов. Полученные данные свидетельствуют о наличии периодических вариаций потока с лунно-суточными и лунно-месячными периодами. Сформулирована и подтверждена экспериментально гипотеза о существовании в земной коре *радон-нейтронных* приливных вариаций концентрации тепловых нейтронов, связанных с лунными периодами и имеющих гравитационное происхождение. Предложена простая математическая модель, удовлетворительно описывающая наблюдаемые вариации. Представлен случай аномального поведения потока тепловых нейтронов, коррелирующий с высокой локальной сейсмической активностью.

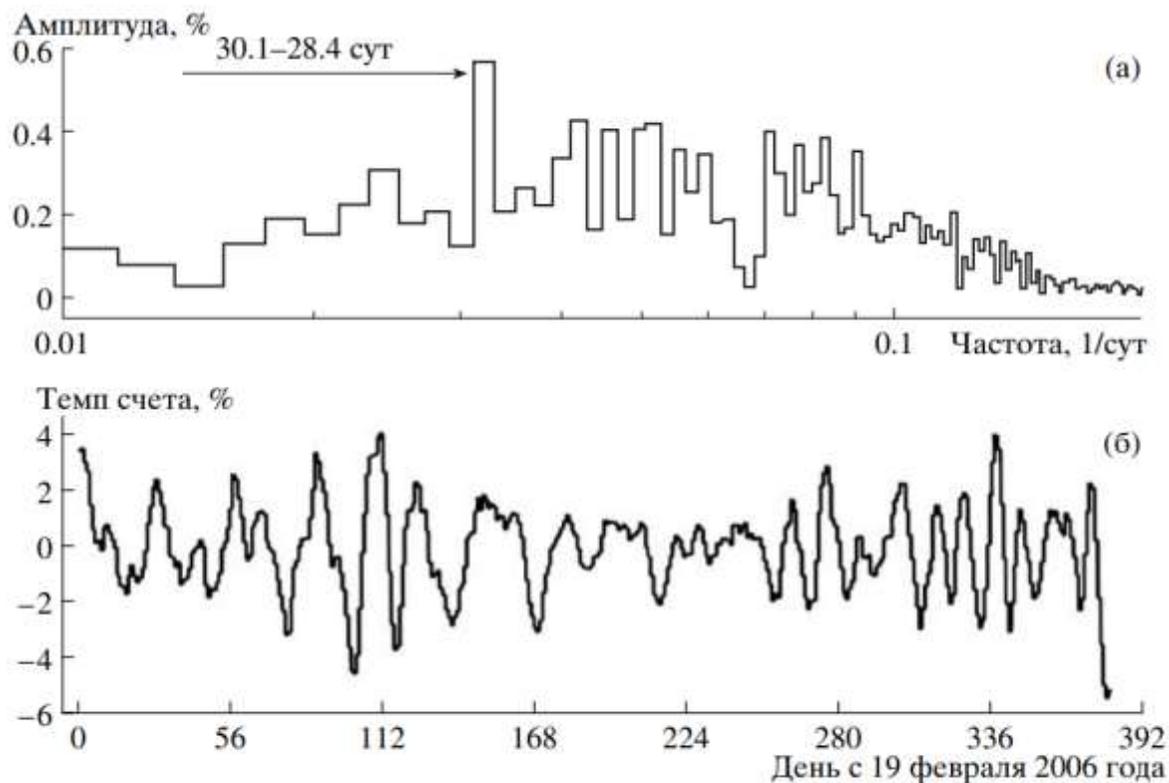
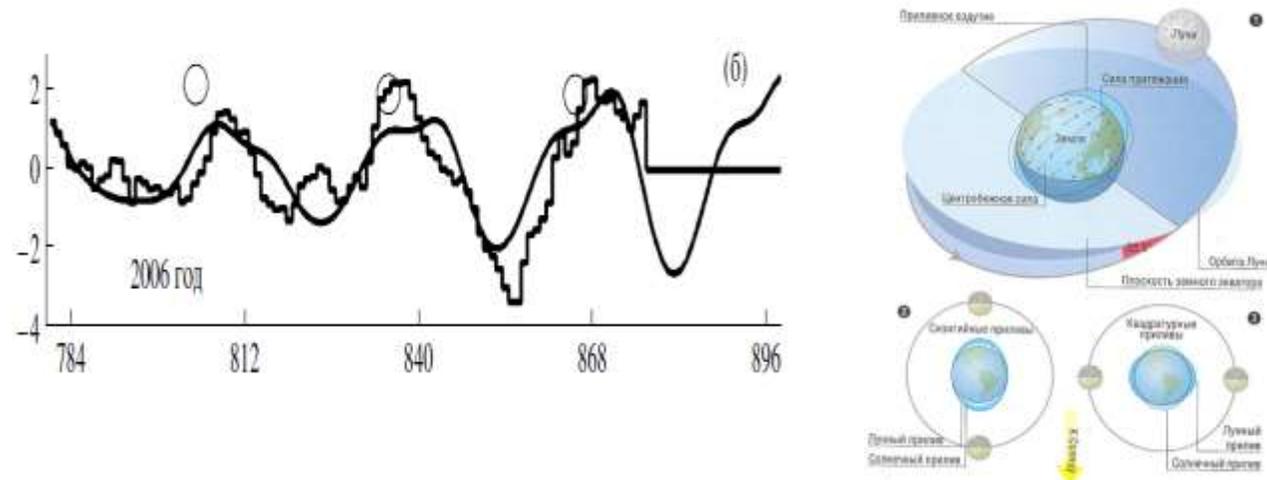
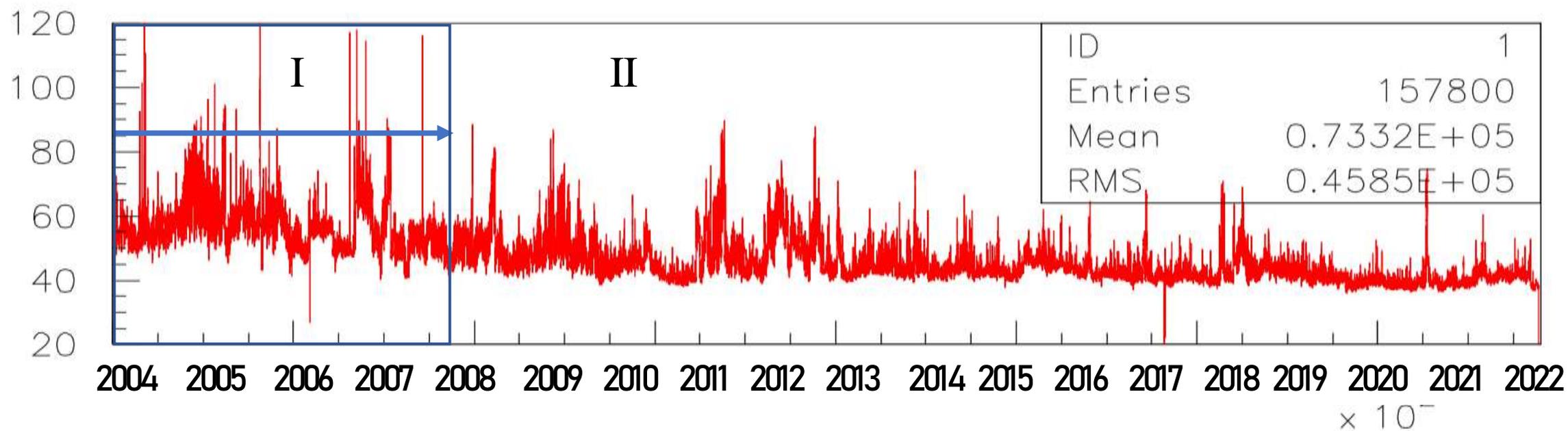
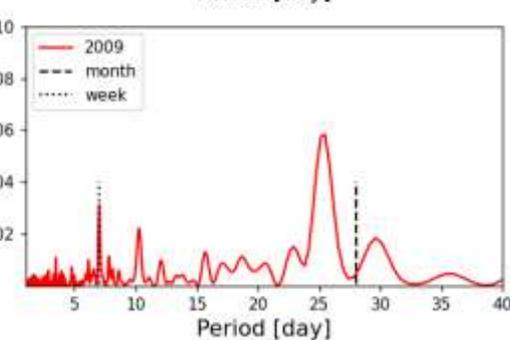
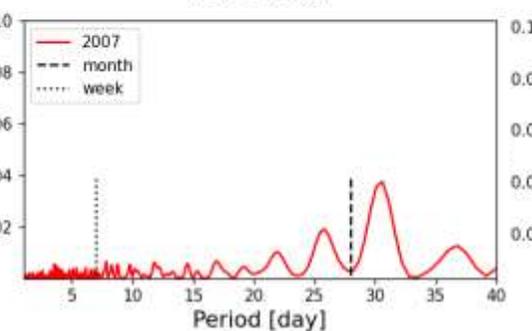
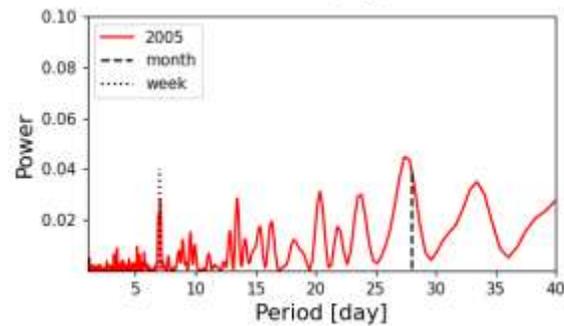
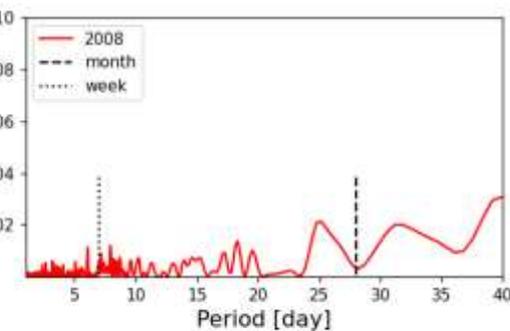
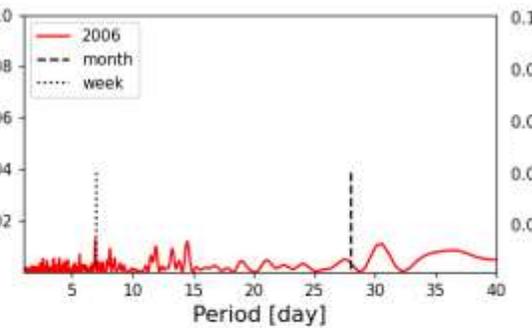
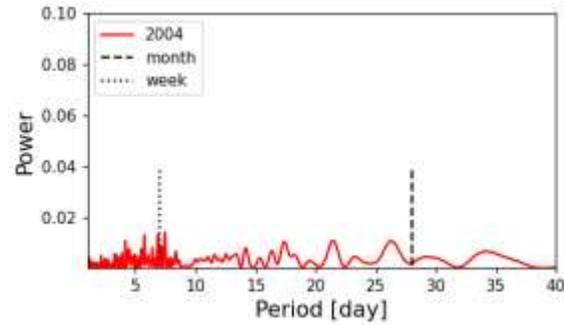
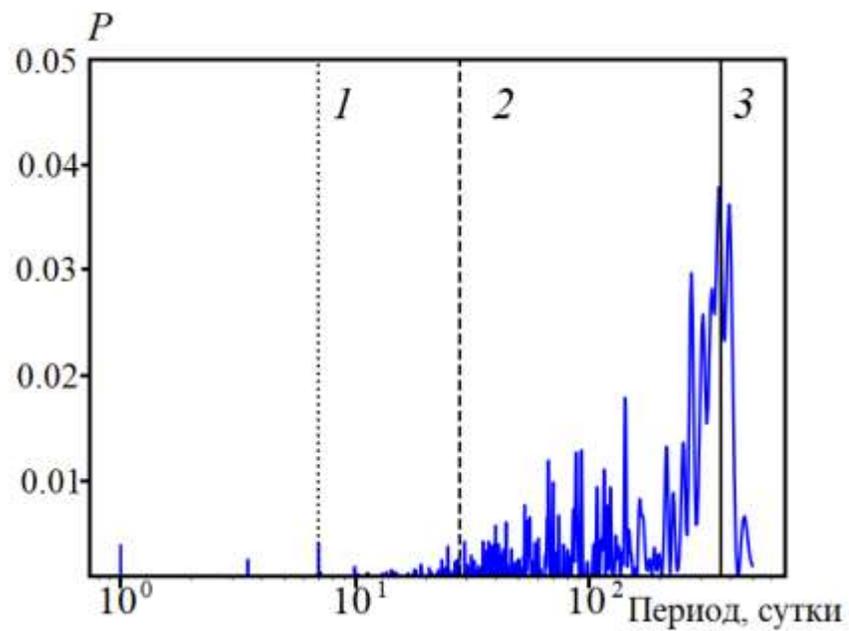


Рис. 7. Лунно-месячные периодичности темпа счета нейтронов.

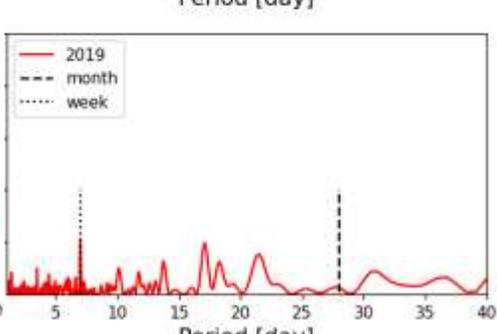
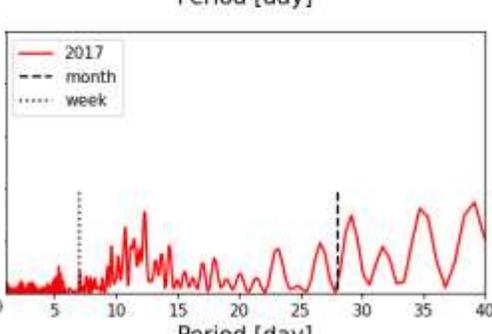
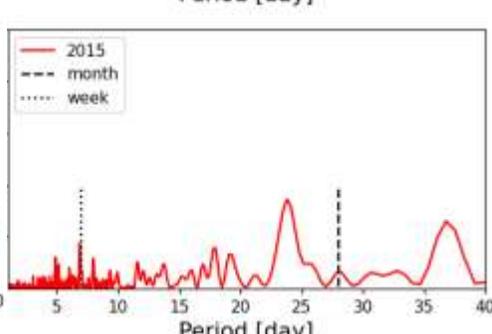
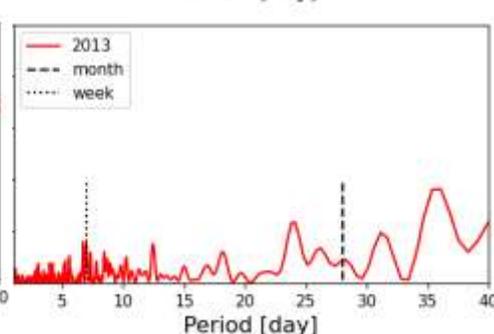
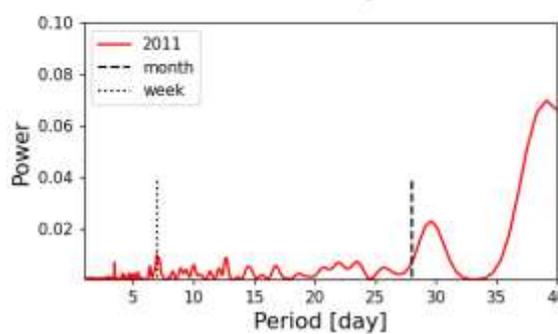
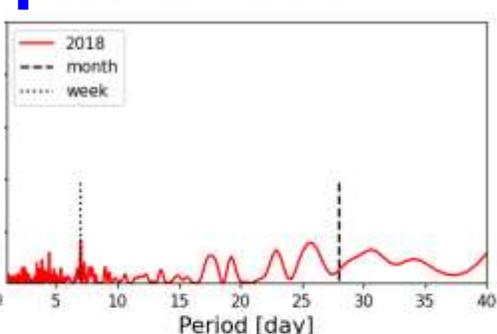
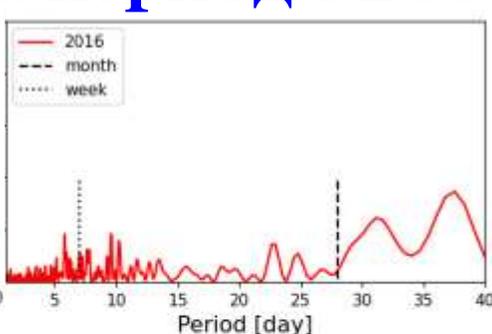
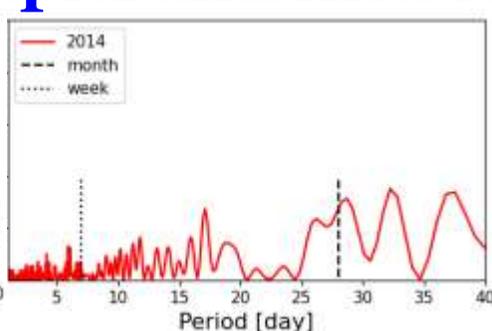
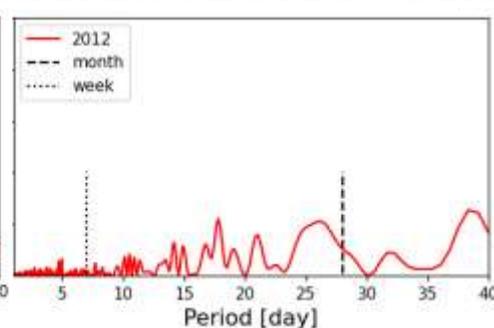
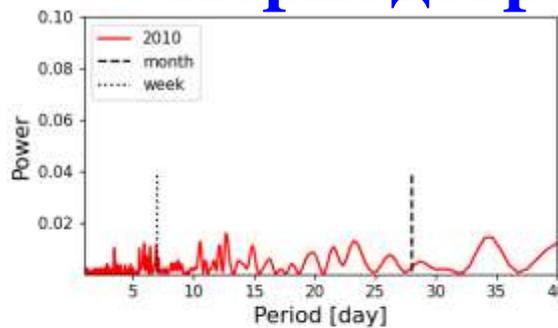


Временной ряд часовых данных LVD с 2004 по 2022 год





## Периодограмма Ломб-Скаргл анализа за период с 2004 по 2021 г



# Метод наложения эпох для лунно-месячных вариаций ( способ I )

Эпоха - 708 часов = 708/24= 29,5 суток.

За 13 лет - около 160 периодов.

В каждом бине 5260 часов.

Аппроксимация:

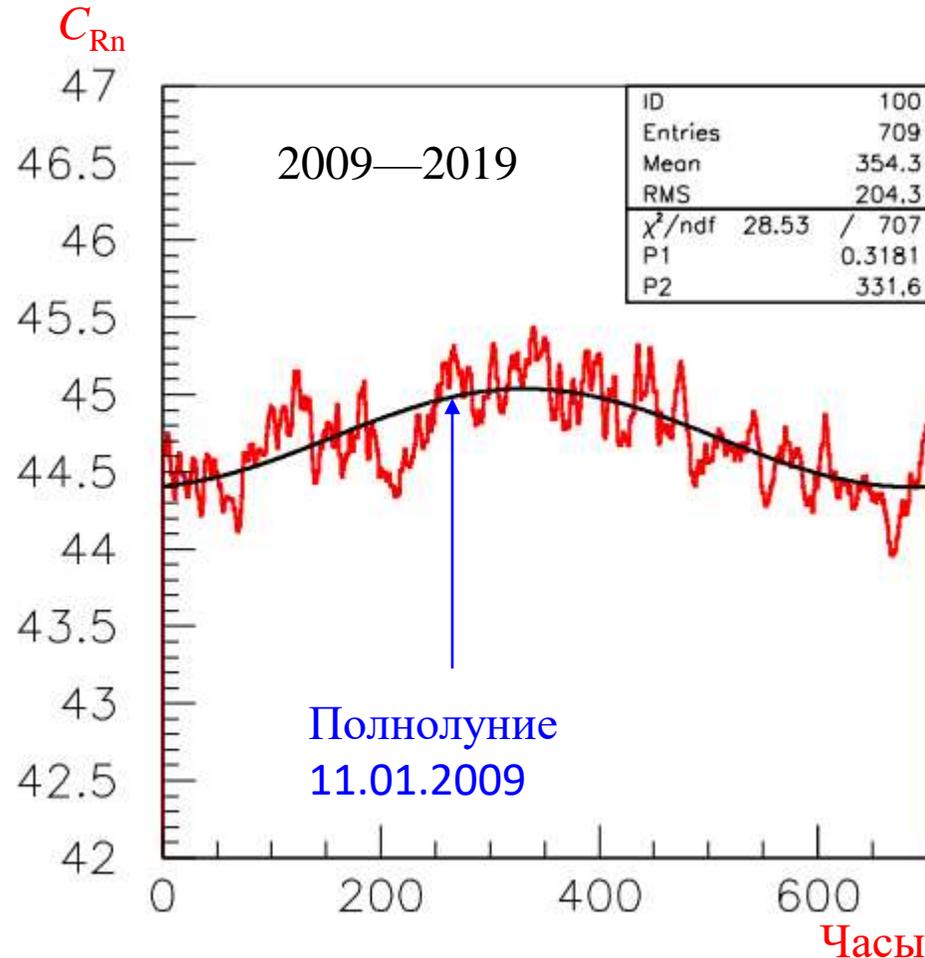
$$C_{Rn} = N_m(t) = N_m + \delta N_m \times \cos(2\pi(t - \varphi_m)/T)$$

бин - 1 сутки,  $T=708$  часов,

$$\delta N_m / \langle N_m \rangle = (0,72 \pm 0,15)\%$$

фаза  $\varphi_m$  (максимум кривой) соответствует дню

полнолуний  $\varphi_m = 331/29.5 = 11.22$  сут.



В этом методе с выбранной даты, например 01.01.2009, каждому часу присваивается номер от 0 до конца эпохи в 708 часов, затем начинается новая эпоха также от 0 до 708. Потом суммируются данные с одинаковыми часами и делятся на число значений записанных в этот час.

# Метод наложения эпох (способ I)

Будет опубликовано  
в ЖЭТФ

Эпоха - 708 часов = 708/24 = 29,5 суток.

За 13 лет - около 160 периодов.

В каждом бине 5260 часов.

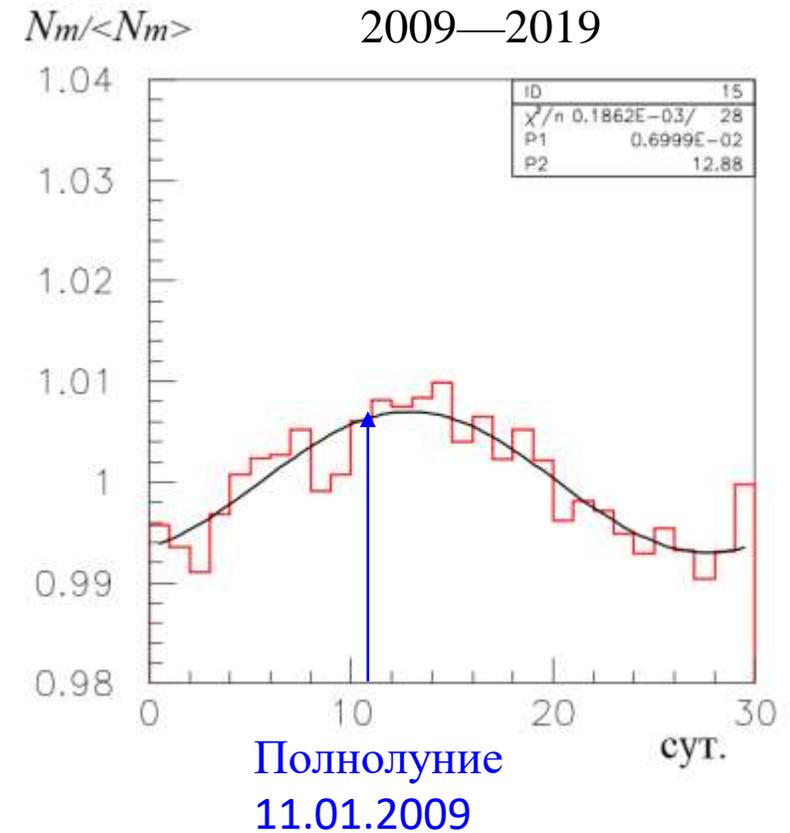
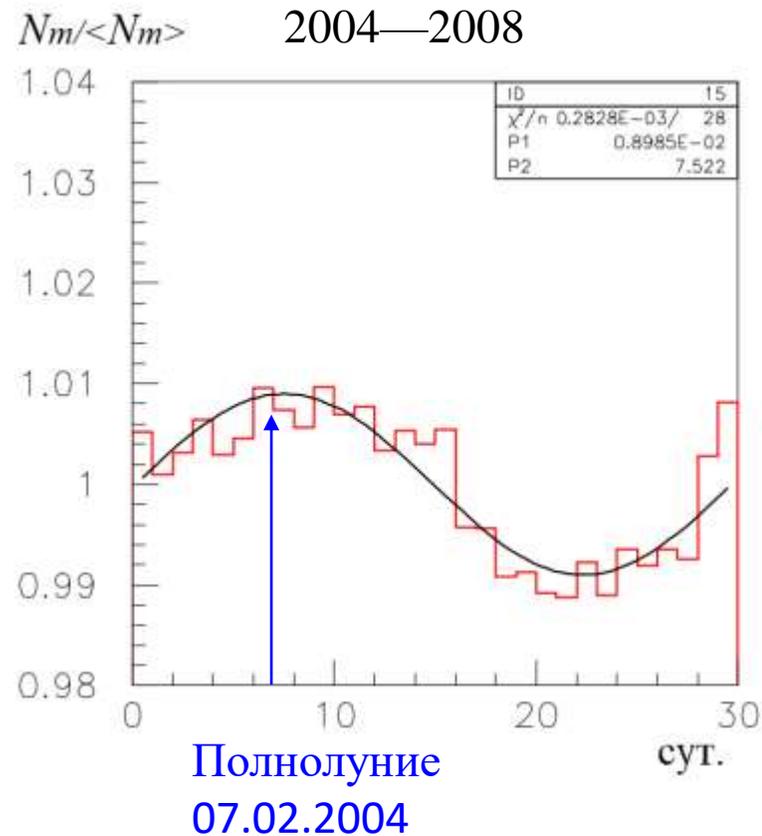
Аппроксимация:

$$N_m(t) = 1 + \delta N_m / \langle N_m \rangle \times \cos(2\pi(t - \varphi_m) / T)$$

бин - 1 сутки,  $T=29,5$  сут.,

$$\delta N_m / \langle N_m \rangle = (0,8 \pm 0,15)\%$$

фаза  $\varphi_m$  (максимум кривой) соответствует дню полнолуний.



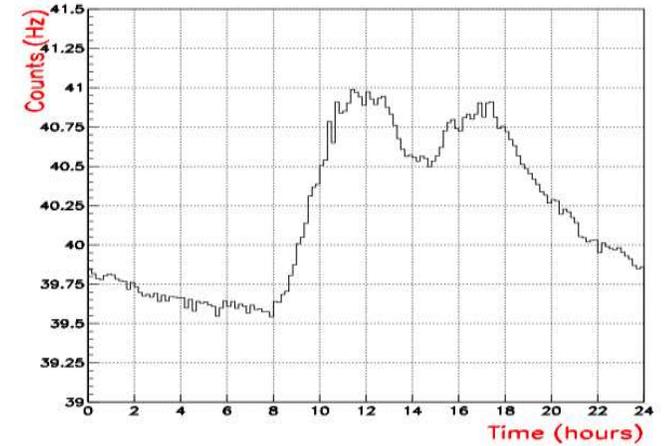
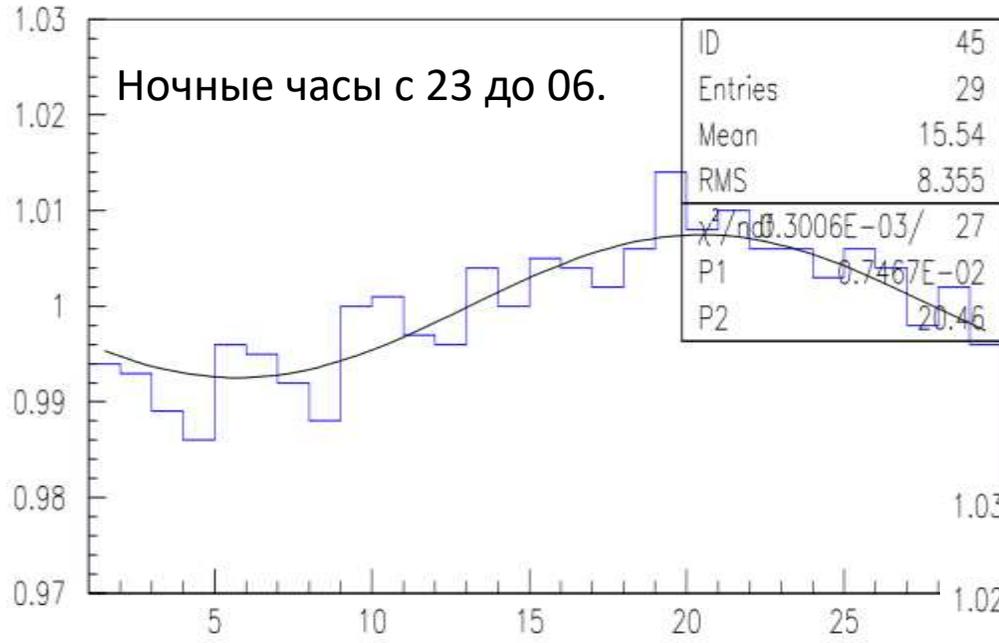
Лунно-месячные вариации  $S_{Rn}$  концентрации радона

# Метод наложения эпох (способ II)

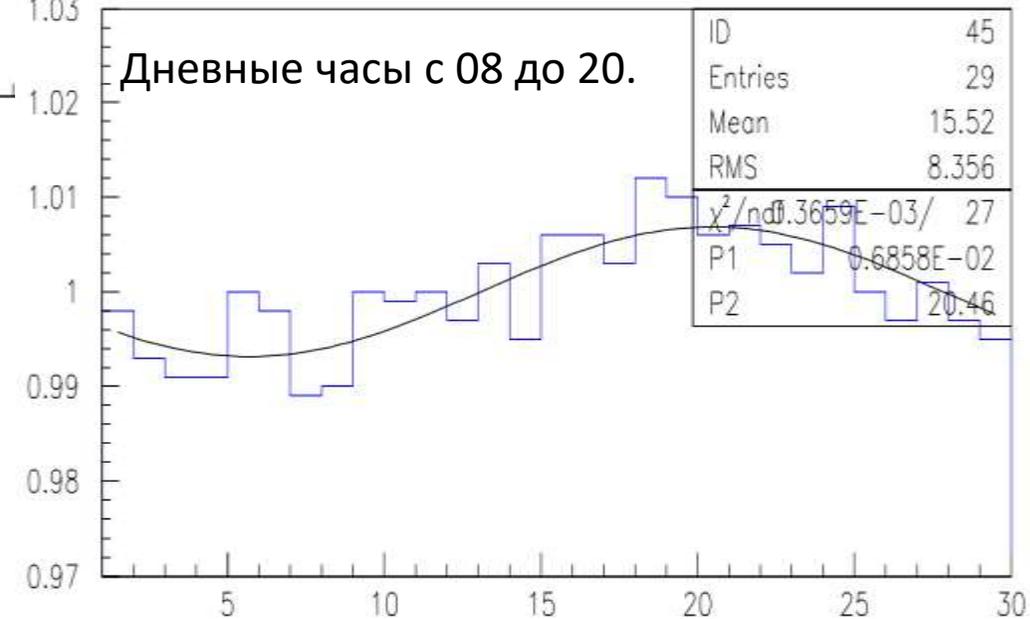
Для этого метода в каждый лунный месяц узнается день полнолуния и этому дню присваивается индекс 15.

Отсчитывая 14 дней вправо и в лево по временной шкале, формируются данные для каждого лунного месяца.

Суммируются данные в каждый бин (сутки) за 30 дней и делятся на число попавших значений в сутки.



$$\delta N_m / \langle N_m \rangle = (0,7 \pm 0,2)\%$$



# Заключение

Нами обнаружена модуляция концентрации радона связанная с лунно-месячными циклами. Фаза подъема приходится на дни полнолуния. Амплитуда вариаций варьируется от 0.5 до 0.8 % . Мы объясняем эту модуляцию деформацией земной коры [Hirose, I., Kawasaki, I., Takemoto, S. & Tamura, Y. *Temporal variations of tidal constituents in strainmeter records prior to the occurrence of two large earthquakes. J. Geod. Soc. Jpn.* **49**, 227–242 (2003)] . Локально различные поля напряжений могут быть объяснены изменением порового давления, связанным с подъемом глубинных потоков в земной коре.

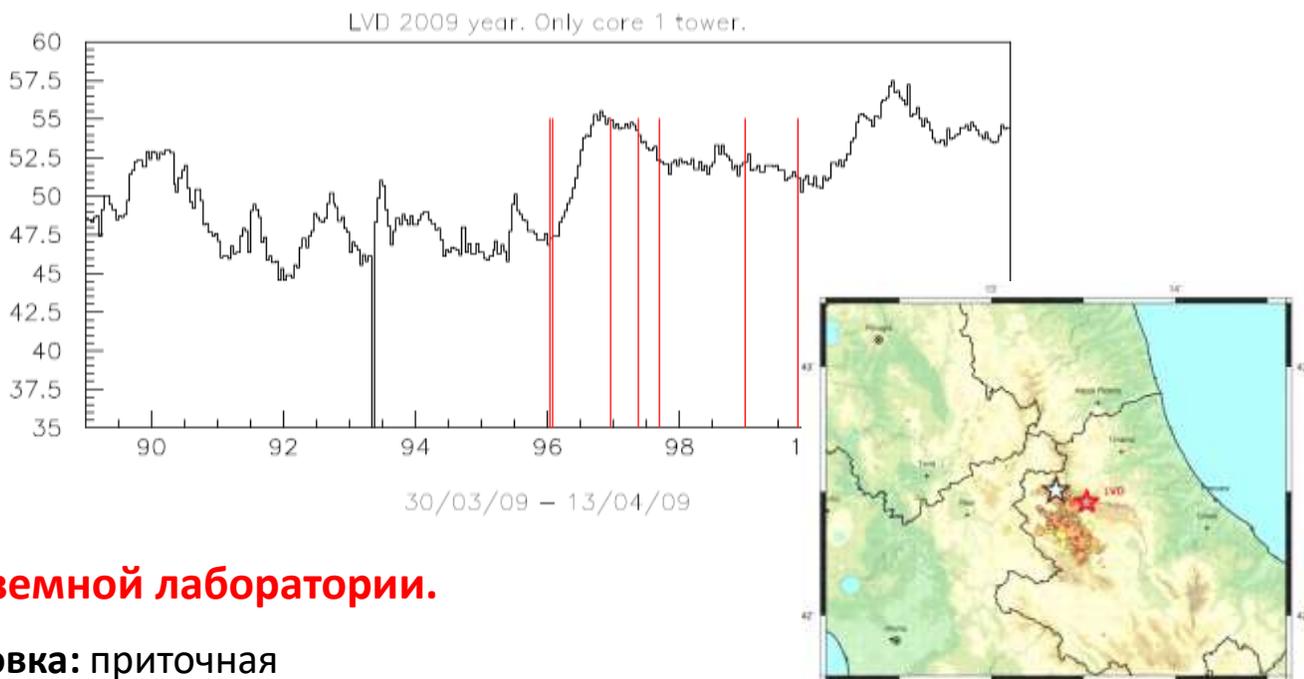
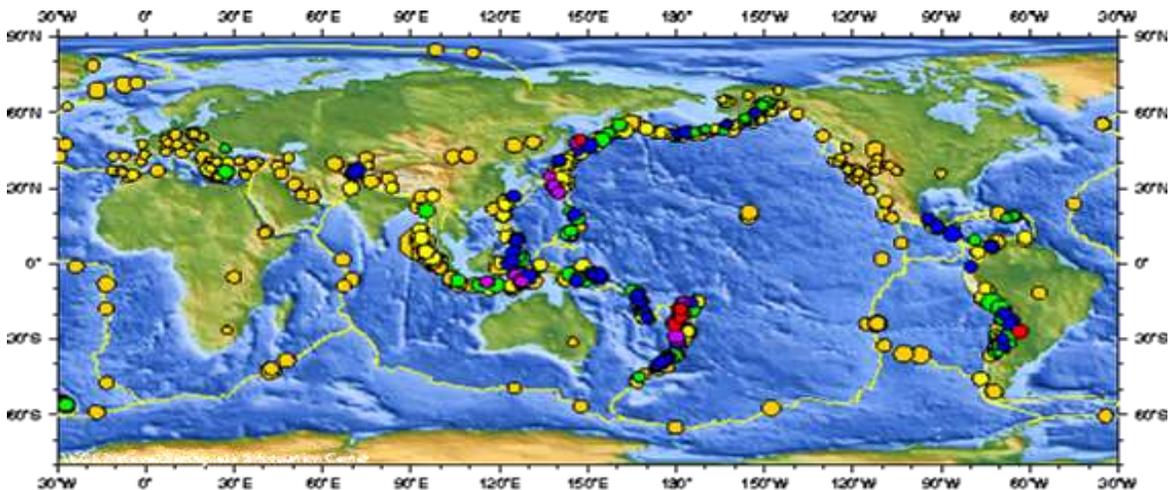
Однако же есть работы, например [Weinlich, F. H. et al. *Seismically induced variations in Mariánské Lázně fault gas composition in the NW Bohemian swarm quake region, Czech Republic—a continuous gas monitoring. Tectonophysics* **421**, 89–110 (2006).], показывающие, что землетрясения и тектонические подвижки могут изменить поровое давление и уменьшать эффективное напряжение на плоскости разлома, что даст отклик на малую величину. То есть величина модуляции может изменяться в зависимости от периода наблюдения.





# Землетрясения

## L'Aquila, Абруццо, рядом с установкой LVD



### Факторы, влияющие на концентрацию радона в подземной лаборатории.

1. **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.
2. **Прохождение машин по транспортному туннелю:** вызывает вибрацию грунта, вследствие чего увеличивается выход радона в атмосферу зала.
3. **Сезонные вариации концентрации радона:** летом насыщенность водой грунта выше, что приводит к ускоренному переносу радона.
4. **Сейсмическая активность:** при деформациях земной коры увеличивается количество микротрещин, возникает напряжение и усиливается вибрация грунта, что приводит к значительному повышению концентрации радона.
5. **Приливные силы, связанные с лунным циклом:** усиливают выход радона (в полнолуния).

Data e Ora (UTC) [E]	Magnitudo	Provincia/Zona	Profondità	Latitudine	Longitudine
2009-04-09 19:38:16	5.0	L'AQUILA	9	42.50	13.35
2009-04-09 08:52:59	5.2	L'AQUILA	11	42.49	13.35
2009-04-07 17:47:37	5.4	L'AQUILA	17	42.50	13.49
2009-04-07 09:26:28	4.9	L'AQUILA	10	42.54	13.39
2009-04-06 23:15:36	5.0	L'AQUILA	10	42.45	13.39
2009-04-06 02:37:04	4.9	L'AQUILA	9	42.56	13.33
2009-04-06 01:36:29	4.7	L'AQUILA	10	42.55	13.35
2009-04-06 01:32:40	6.1	L'AQUILA	8	42.54	13.38

<http://cnt.rm.ingv.it/>

$C_{Rn}$ , отсч./сч./сек.

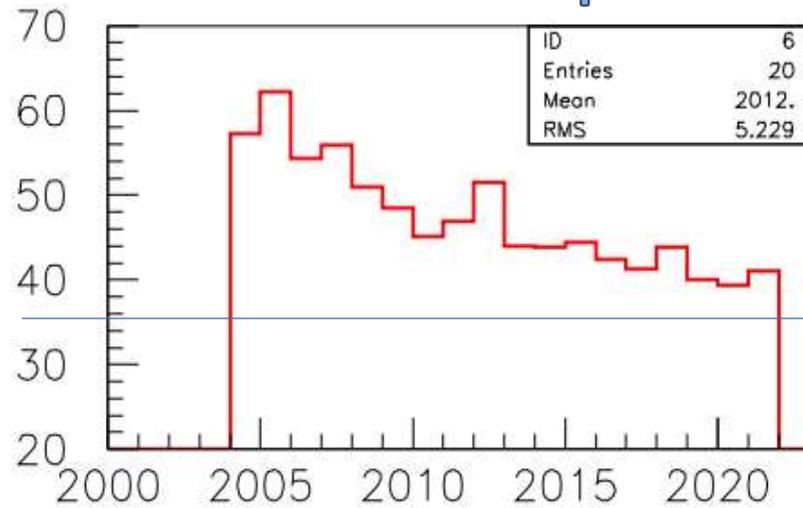


Радон непрерывно генерируется в горных породах в процессе радиоактивного распада, то есть всегда присутствует в любом горном массиве.

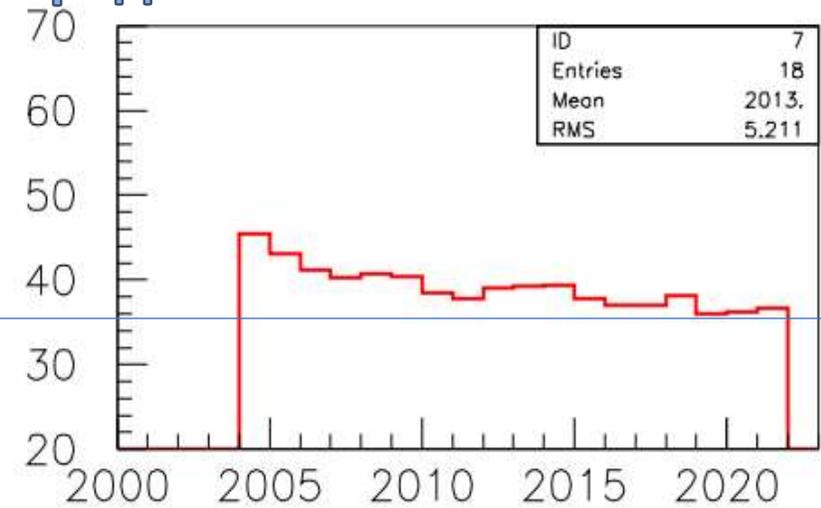
Уменьшение его концентрации как за счёт распада (период полураспада радона равен 3,825 дня), так и за счёт миграции из массива в воздух постоянно компенсируется новой генерацией этого газа.

Поэтому среднее содержание радона в массиве всегда постоянно и определяется концентрацией урана и тория в горном массиве Гран Сассо.

## Определение средней и минимальной величины скорости счета «радоновых» имп. LVD



Average per year

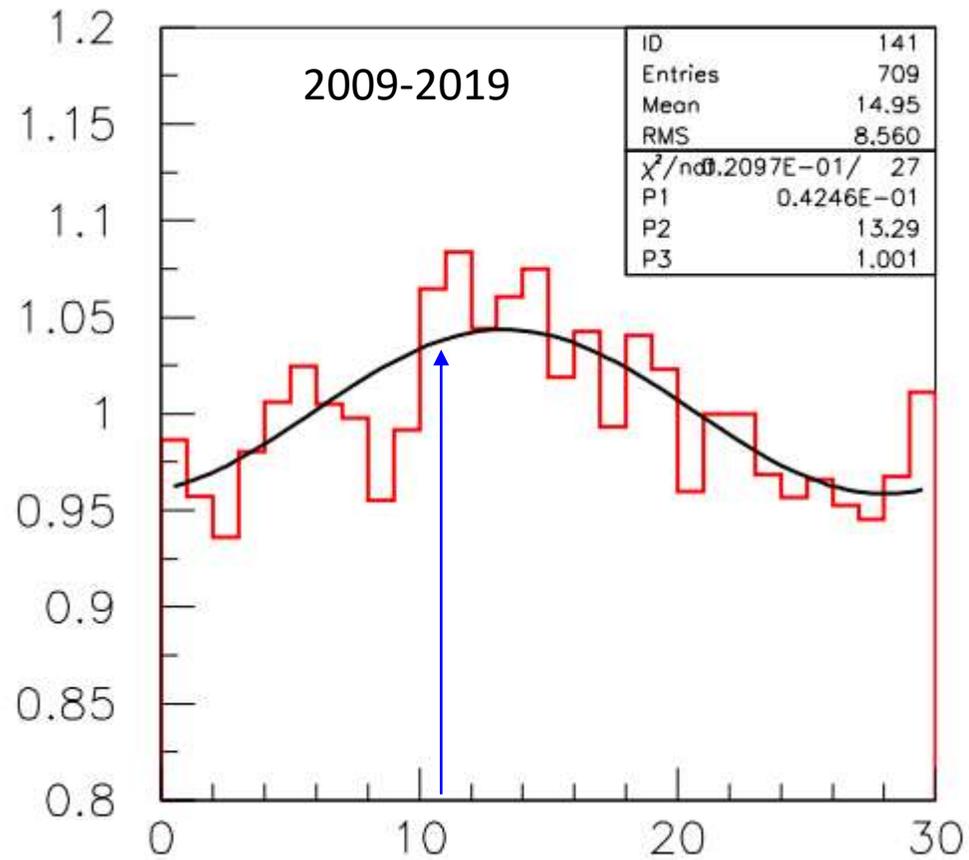


Minimum per year

С вычитанием фона

$$\delta C_{Rn}/C_{Rn} = (Y_i - \text{Min}) / (\text{Aver} - \text{Min})$$

$$\delta C_{Rn}/C_{Rn} = 0.043$$

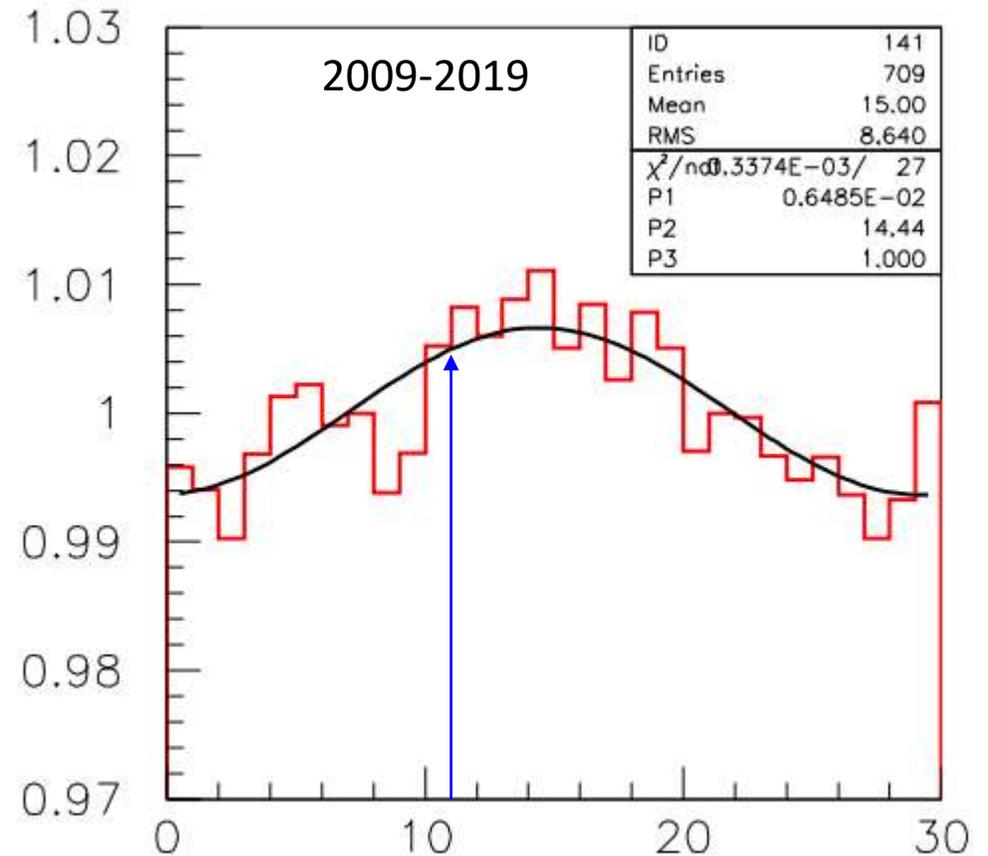


Полнолуние 11.01.2009

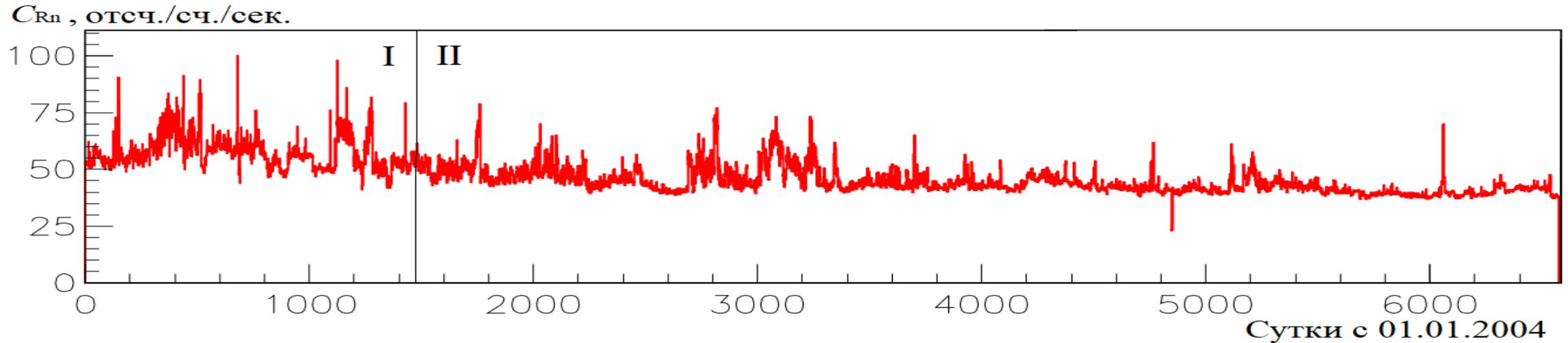
С фоном

$$\delta C_{Rn}/C_{Rn} = (Y_i) / (\text{Aver})$$

$$\delta C_{Rn}/C_{Rn} = 0.0065$$



Полнолуние 11.01.2009



Радон непрерывно генерируется в горных породах в процессе радиоактивного распада, то есть всегда присутствует в любом горном массиве.

Уменьшение его концентрации как за счёт распада (период полураспада радона равен 3,825 дня), так и за счёт миграции из массива в воздух постоянно компенсируется новой генерацией этого газа.

Поэтому среднее содержание радона в массиве всегда постоянно и определяется концентрацией урана и тория в горном массиве Гран Сассо.