



# Применение метода тепловых нейтронов в геофизических исследованиях

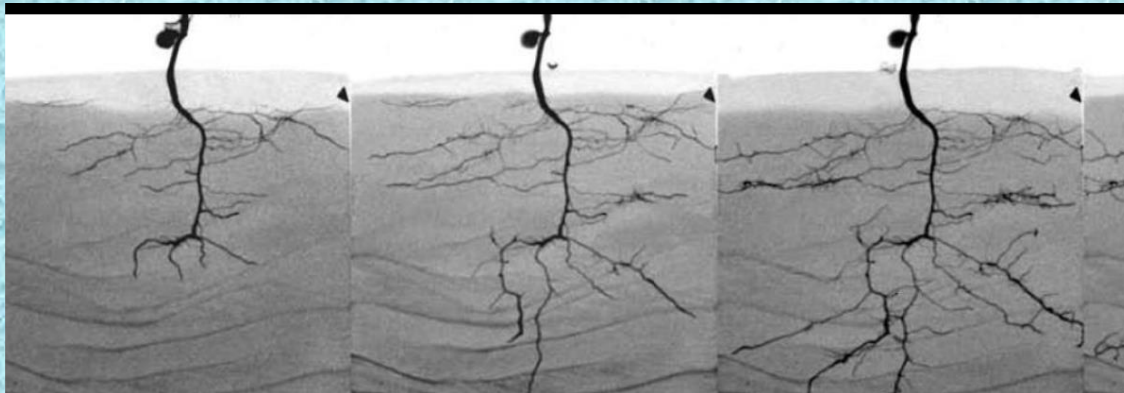
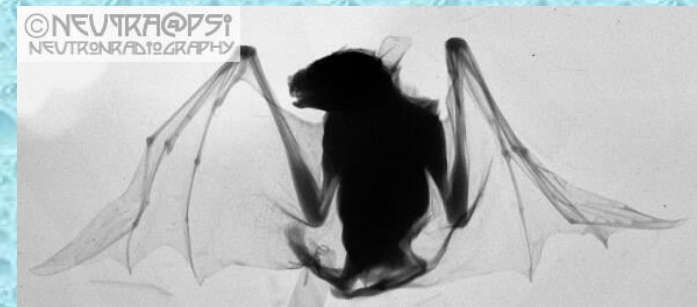
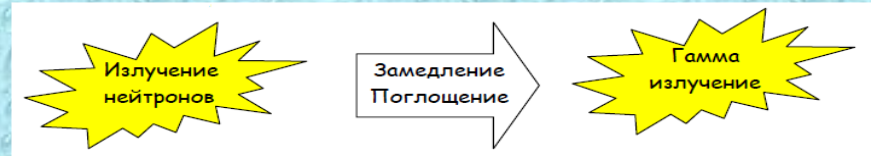
Стенькин Ю.В.  
ИЯИ РАН

# План доклада

1. Введение
2. Природные источники нейтронов (геонейтроны)
3. Исторический обзор
4. Нейтроны в геофизике
5. Мировая сеть эн-детекторов и обнаруженные эффекты
6. Нерешенные проблемы

# На самом деле нейтроны давно используются в геофизике, в технике и пр.:

- нейтронный каротаж
- неразрушающий контроль
- нейтронография
- материаловедение
- даже в сельском хозяйстве

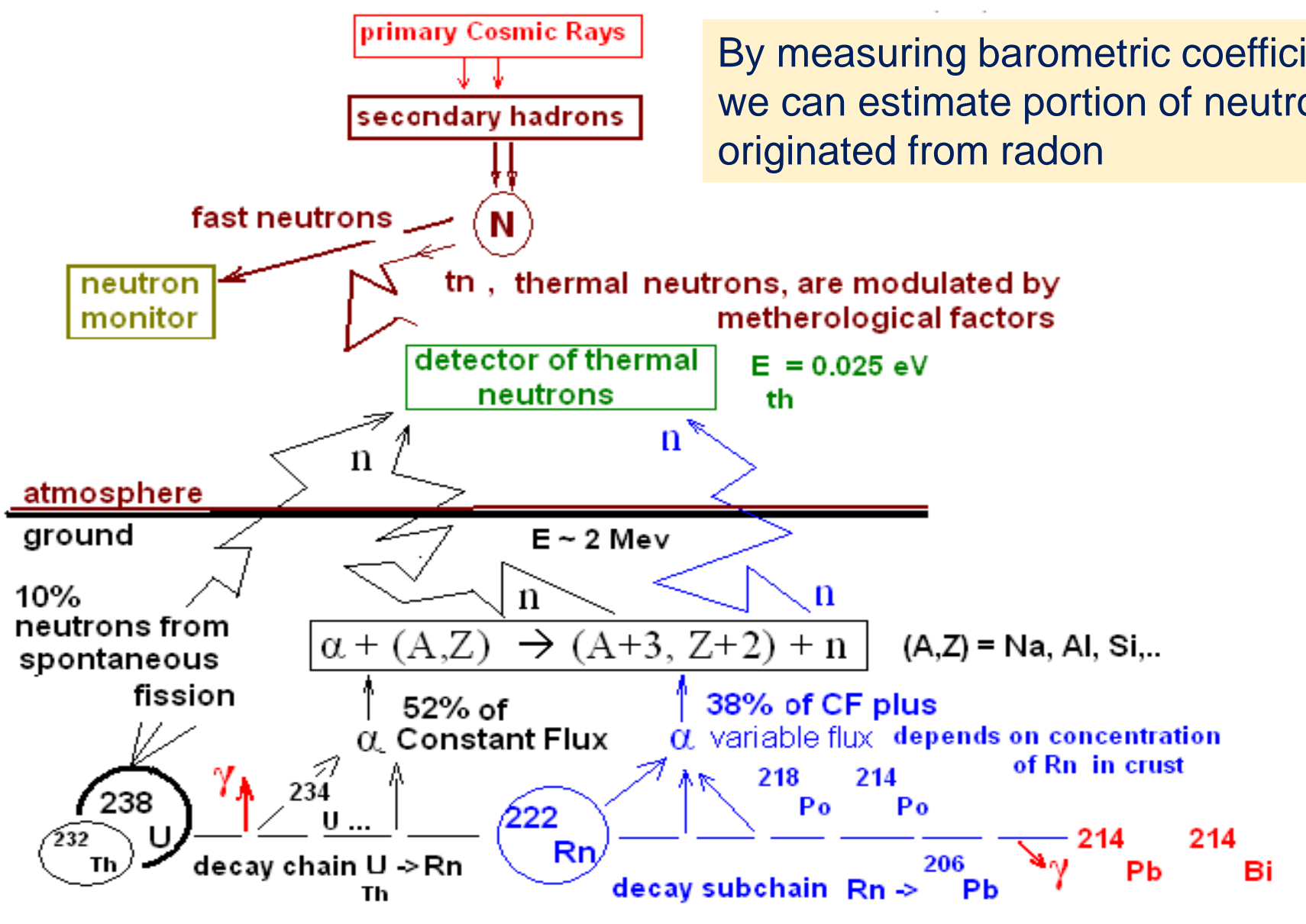


Однако во всех этих применениях используются искусственные источники нейтронов – нейтронные генераторы

# Environmental neutron sources: CR & Radon-due neutron production

## ГЕОНЕЙТРОНЫ

By measuring barometric coefficient we can estimate portion of neutrons originated from radon

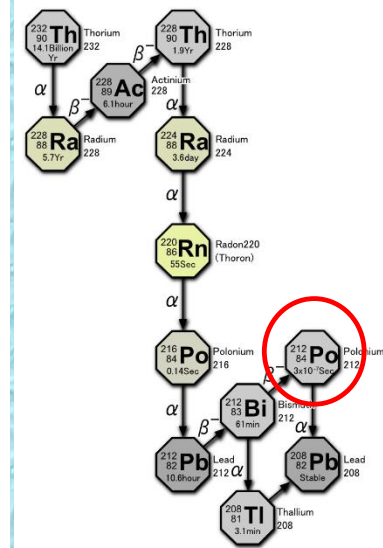
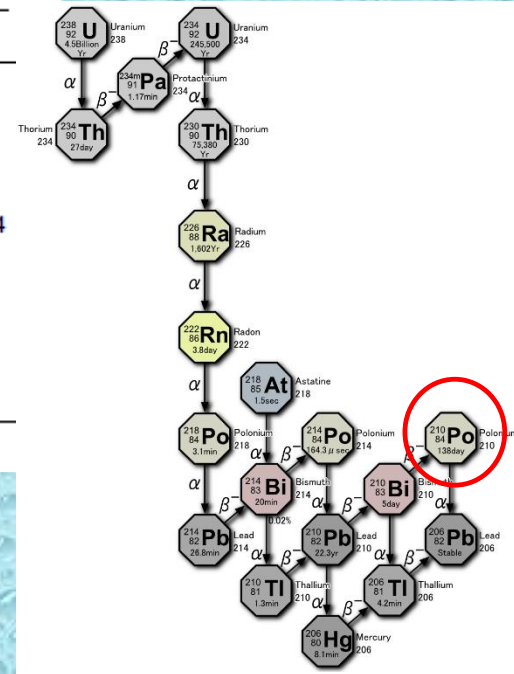
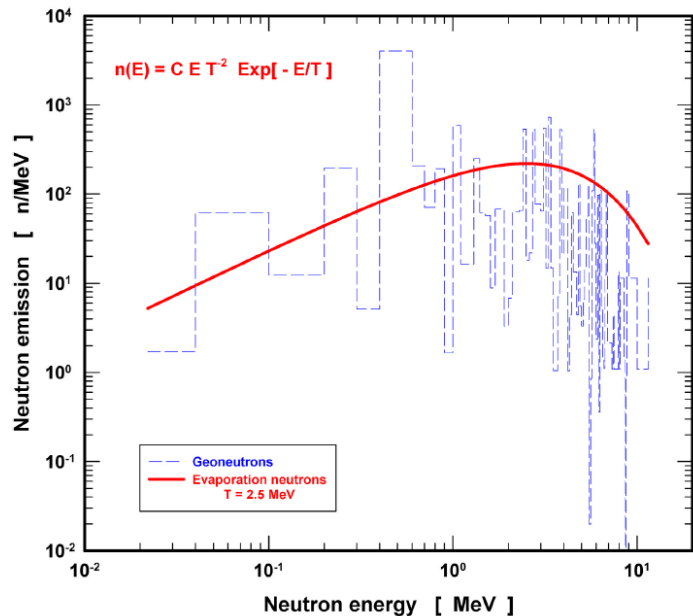


# Энергетический спектр геонейтронов

Vega-Carillo et al. Geoneutrons. Radiation Physics and Chemistry, 2022, Article 110215

Energy and emission probability of  $\alpha$ -particles produced by radioisotopes in soil.

Radioisotope	$E_{\alpha}$ ( $p_{\alpha}$ )	
	[MeV]	[%]
$^{212}\text{Bi}$	6.089 (27.12), 6.051 (69.91), 5.768 (1.7), 5.626 (0.157), 5.607 (1.13), 5.481 (0.013), 5.345 (0.001), 5.302 (0.00011)	
$^{212}\text{Po}$	8.785 (100)	
$^{210}\text{Po}$	6.778 (99.99), 5.985 (0.0019)	
$^{224}\text{Ra}$	5.685 (94.92), 5.449 (5.06), 5.161 (0.0071), 5.051 (0.0076), 5.034 (0.003)	
$^{220}\text{Rn}$	6.288 (99.886), 5.747 (0.114)	
$^{228}\text{Th}$	5.423 (73.4), 5.340 (26.0), 5.211 (0.408), 5.173 (0.218), 5.138 (0.036)	
$^{232}\text{Th}$	4.012 (78.2), 3.947 (21.7), 3.811 (0.069)	



За время порядка 0.5 мс эти быстрые нейтроны замедляются в грунте до тепловой энергии.  
 Время жизни тепловых нейтронов в стандартном грунте ~ 1 мс, в воздухе – десятки мс.

# Чем измерять поток тепловых нейтронов?

Первое, что приходит в голову – это существующая сеть нейтронных мониторов (НМ).

Но они совершенно не пригодны для этой цели! Почему?

Да потому, что их разработчики ставили перед собой другую цель:

максимально экранировать детекторы от влияния внешних факторов, таких как погодные явления, осадки, температура среды и прочее, чтобы измерять потоки космических лучей. Единственный фактор, влияющий на показания НМ, это атмосферное давление, на которое вводится поправка.

Мы ставим перед собой обратную задачу – регистрация природного потока тепловых нейтронов (геонейтронов), находящегося в равновесии со средой, и изучая вариации этого потока, изучать динамику и свойства среды. Для этого нужны незэкранированные детекторы тепловых нейтронов большой площади и обладающие достаточной эффективностью и долговременной стабильностью.

## Исторический обзор

Впервые вопрос о нейтронах в атмосфере был рассмотрен теоретически в классической работе Bethe et al. (H. A. Bethe, S. A. Kroff, and G. Placzek, *Phys. Rev.* **57**, 573 (1940)) еще 82 года назад. Было показано, что нейтроны не успевают уйти далеко от точки рождения и что их поток над водой мал.

Одна из первых попыток экспериментального изучения природных потоков тепловых нейтронов была предпринята в СССР в середине прошлого века. В работе Горшкова и др. (G. V. Gorshkov, V. A. Zabkin, N. M. Lyatkovskaya, and O. S. Tsvetkov, *Natural Neutron Background of the Atmosphere and the Earth's Crust* (Atomizdat, Moscow, 1966) использовались открытые сцинтилляционные детекторы тепловых нейтронов на основе ZnS и было показано, что вблизи поверхности земли основная часть нейтронов создается космическими лучами. Был также отмечен и вклад естественной радиоактивности в генерацию нейтронов.

Позже эта работа была продолжена группой из НИИЯФ МГУ под руководством Б.М. Кужевского (B. M. Kuzhevskij, *Geofiz. process i Biosfera* **4**, no. 1/2, 18 (2005); B. M. Kuzhevskij, O. Yu. Nechaev, and E. A. Sigaeva, *Nat. Haz. Earth Syst. Sci.* **3**, ....). Они использовали газовые детекторы, наполненные He-3. В этих работах искались (и, как правило, находились) корреляции потока тепловых нейтронов с различными геофизическими явлениями. К сожалению, работа счетчиков была не стабильной, что видно из приведенных в статьях графиках.

К сожалению, во многих работах по измерению природных нейтронов было «обнаружено» много различных «аномалий», которым давались самые абсурдные объяснения:

- Резкие «возрастания» во время гроз;
- «Всплески» во время солнечного затмения;
- «Всплески» во время или до или после землетрясений;
- «аномальные приливные волны» и т. д.

На мой взгляд, проблема состоит в том, что эти темы привлекают людей плохо знающих экспериментальную ядерную физику, используются старые, простейшие методы наблюдений, типа: детектор-> дискриминатор -> счетчик импульсов. В результате, за нейтронные вспышки, часто принимаются пачки импульсов от помех и наводок. Это особенно актуально при измерениях во время гроз.

Нужна современная методика с полной оцифровкой сигналов и их фильтрацией по форме импульса.



Рисунок из статьи  
Кужевский, 2005

Ясно, что такого «возмущения  
нейтронного поля» просто не может  
быть в природе.

Я называю это «эффектом  
чайника», т. е. срабатывание от  
включения рядом с детектором  
какого-либо электроприбора, **при  
отсутствии контроля формы  
импульса.**

Ясно также, что корреляции с чем угодно,  
всегда найдутся

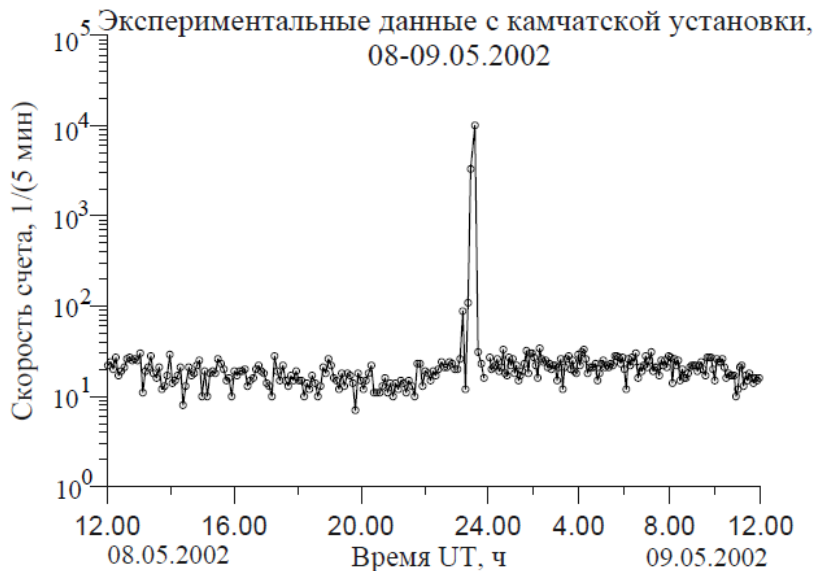


Рис. 3. Возмущение нейтронного поля Земли, зарегистрированное на Камчатке, в точке с координатами:  $52^{\circ} 49'$  с.ш. и  $158^{\circ} 07'$  в.д. (по оси абсцисс – мировое время, по оси ординат – количество зарегистрированных нейтронов за пять минут). Через сутки на Камчатке произошло землетрясение с магнитудой 4,7 балла. Координаты эпицентра:  $52,27^{\circ}$  с.ш. и  $160,50^{\circ}$  в.д.

Тем не менее, работы этой группы инициировали наш интерес к данной проблеме.

Вообще на эту тему существует множество публикаций, в том числе и в зарубежных журналах, но их содержание вызывает порой изумление. Вот пример:

*Максудов & Зуфаров. Earthquake science. (2017) 30(5–6):283–288. Measurement of neutron and charged particle fluxes toward earthquake prediction*, где не просто «установлена связь нейтронного потока с землетрясениями», но всерьез утверждается, что регистрируемые ими нейтроны «прилетели» в Ташкент из Японии, причем за 2 дня до начала там ЗТ с М5.2 !

# Geophysical researches with thermal neutrons

- Seasonal variations
- Moon tidal waves
- Neutrons in thunderstorms
- Forbush-effect and environmental neutrons
- Barometric pumping effect for neutrons
- Earth free oscillations in neutrons
- Earthquakes
- Strong magnetic storms

# Электронно-нейтронный детектор

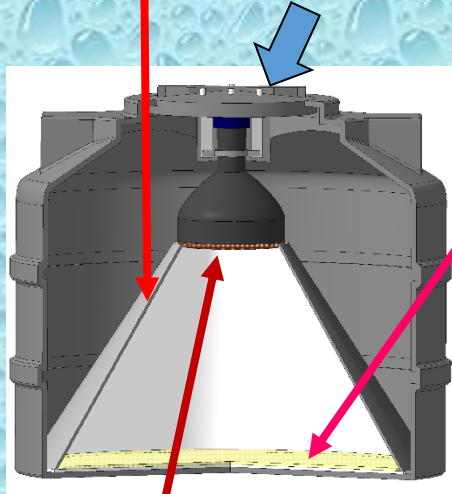
Boron scintillator compound  
(~20% efficiency at 50 mg/cm<sup>2</sup>)  
ZnS(Ag)+B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



Detector counting rate ~0.5 / s at surface  
and 0.08 / s at BUST

Light collecting cone

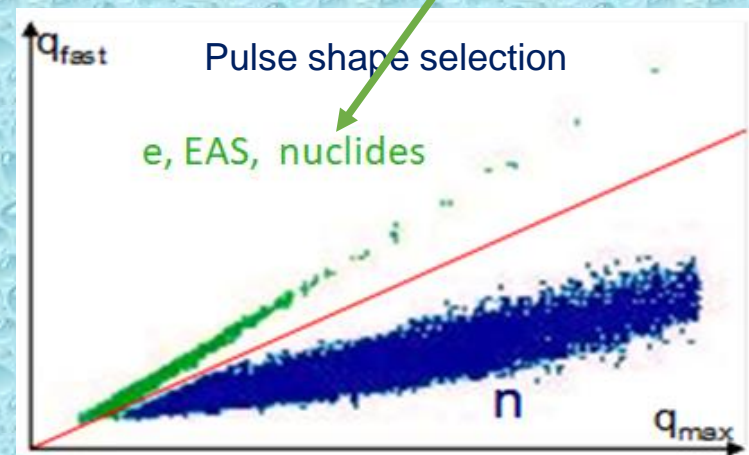
ENDA-LHAASO en-detector



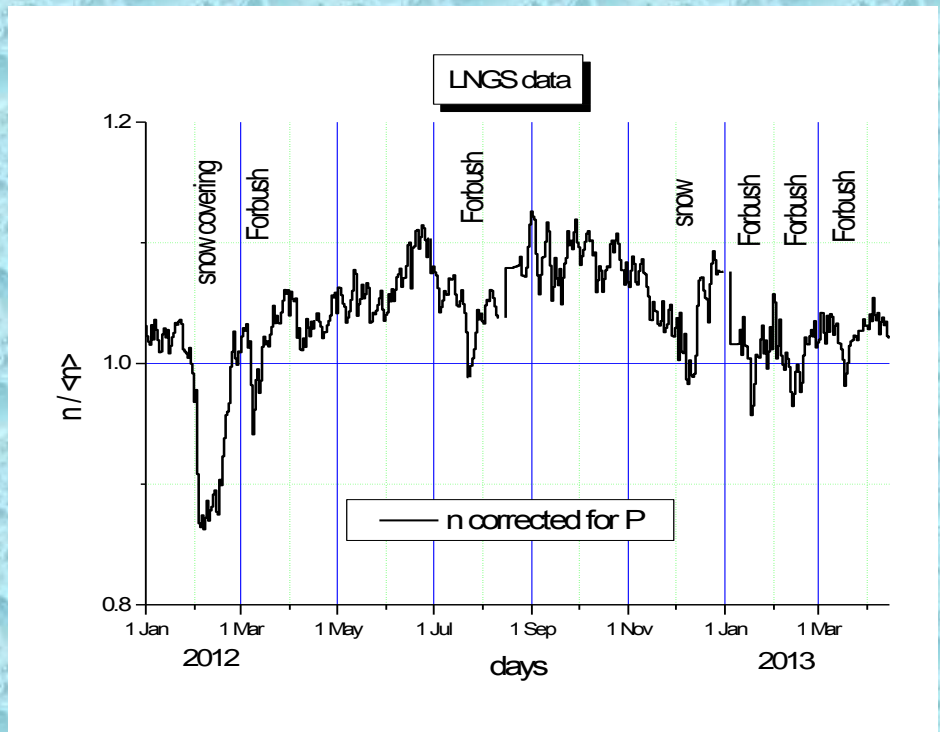
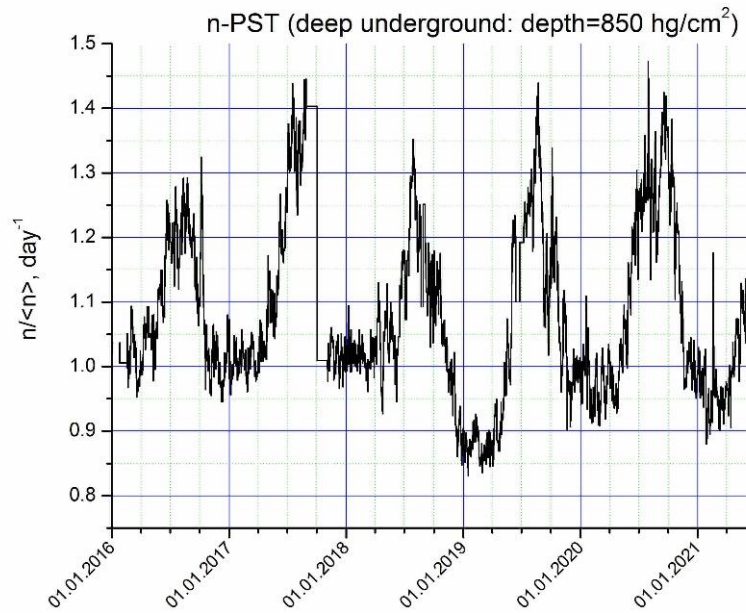
Кроме этого, эн-детекторы чувствительны к  $\beta$ -распадам вблизи детектора и, тем самым, чувствительны к концентрации радона и его продуктов в воздухе, расширяя тем самым область их применения для геофизических исследований.

All pulses are digitized and its shape is analyzed on-line

4" PMT CR165 (Beijing Hamamtsu)



## For comparison: how do our en-detectors work for a long period



Only seasonal wave with amplitude of ~25% is seen in neutrons deep underground

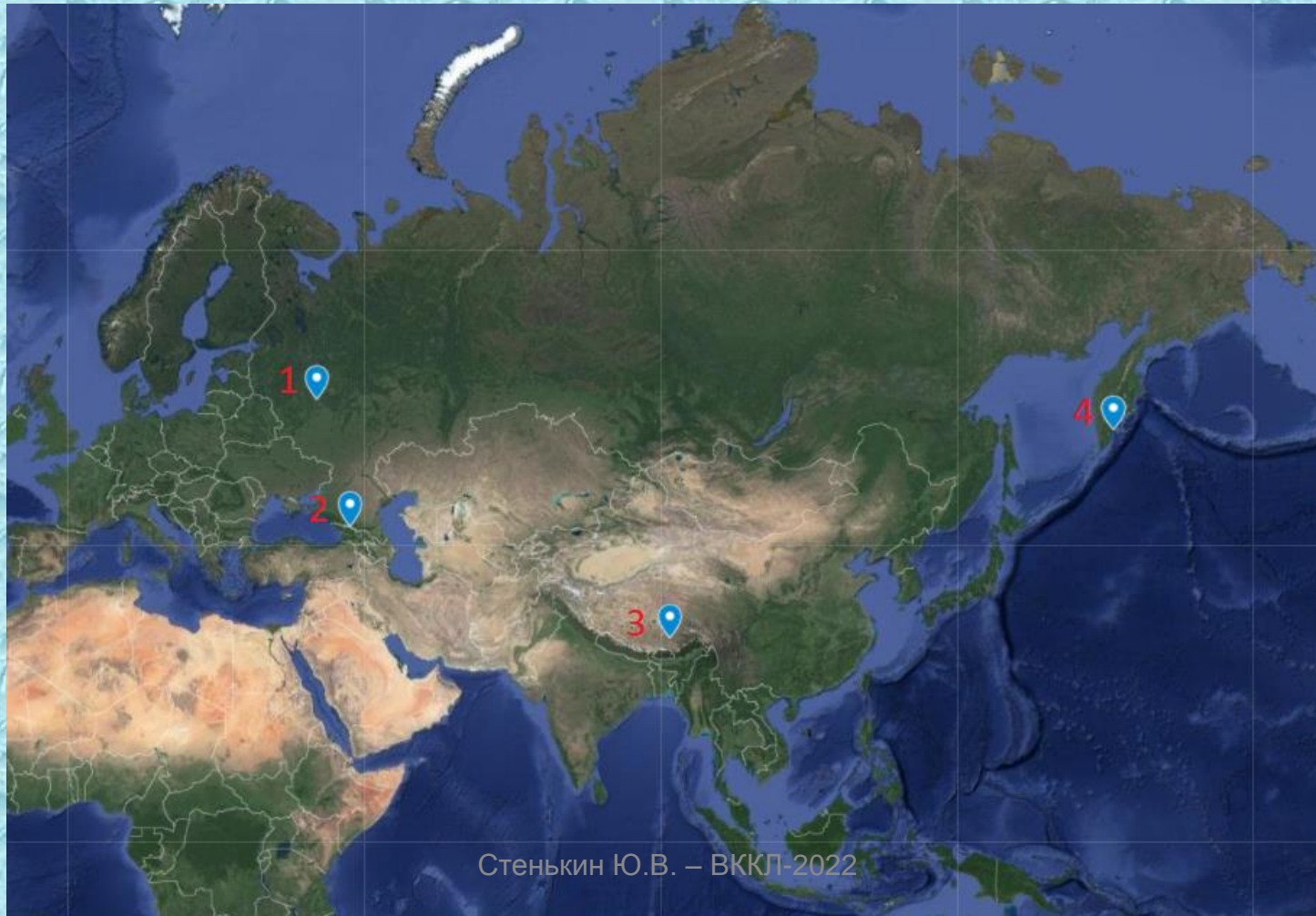
seasonal wave with amplitude ~10%, Forbush decreases and snow covering are seen at surface detector

Итак, сформулируем требования к проведению геофизических исследований с помощью измерений геонейтронов:

- Детекторы должны обладать высокой эффективностью и долговременной стабильностью
- Все импульсы должны оцифровываться и отбираться по форме
- Старые системы, типа детектор – дискриминатор – счетчик должны быть исключены
- Использование газовых счетчиков не желательно.

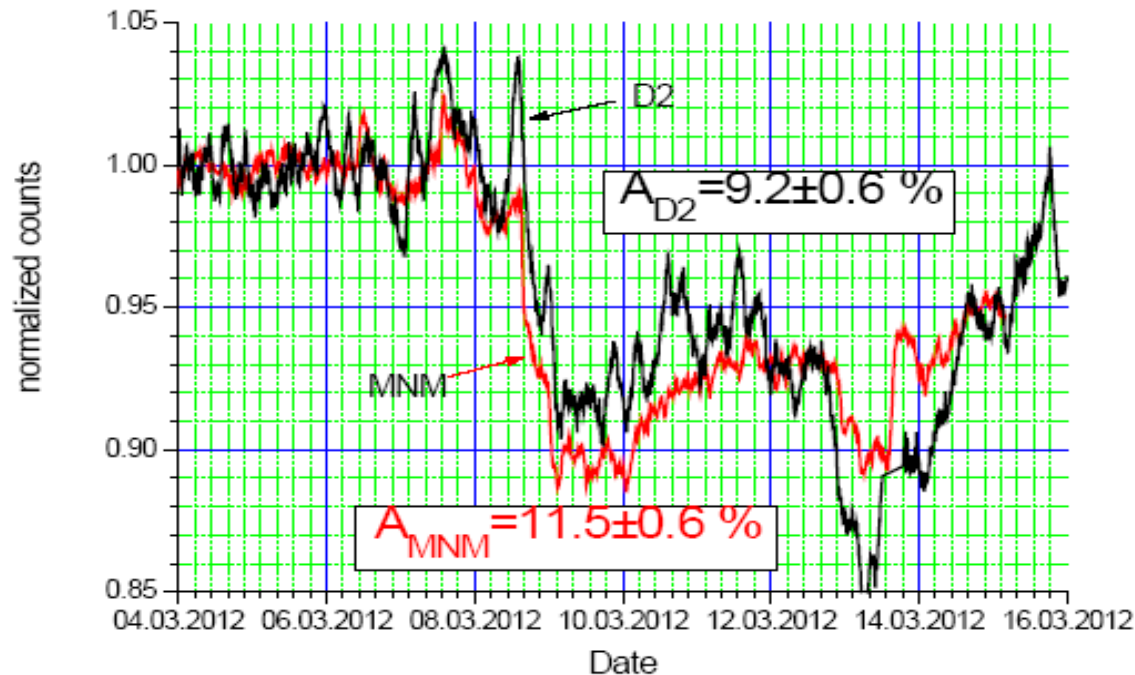
## Карта мировой сети ЭН-Детекторов

- 1. Москва: МИФИ, МГУ, ИЯИ РАН
- 2. Баксанская Нейтринная Обсерватория
- 3. Тибет, г. Лхаса, Тибетский университет
- 4. Петропавловск – Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН



## Forbush decreases

08.03.2012 D2 & MNM



(установка «Нейтрон» в МИФИ)

Fine structure is seen

V. Alekseenko, F Arneodo, et al. Registration of Forbush decrease 2012/03/08 with a global net of the thermal neutron scintillation *en*-detectors. Journal of Physics:Conference Series **409** (2013) 012190

## Decrease of Atmospheric Neutron Counts Observed during Thunderstorms

V. Alekseenko,<sup>1</sup> F. Arneodo,<sup>2</sup> G. Bruno,<sup>3,\*</sup> A. Di Giovanni,<sup>2</sup> W. Fulgione,<sup>3,4</sup> D. Gromushkin,<sup>5</sup> O. Shchegolev,<sup>6</sup>  
Yu. Stenkin,<sup>5,6</sup> V. Stepanov,<sup>6</sup> V. Sulakov,<sup>7</sup> and I. Yashin<sup>5</sup>

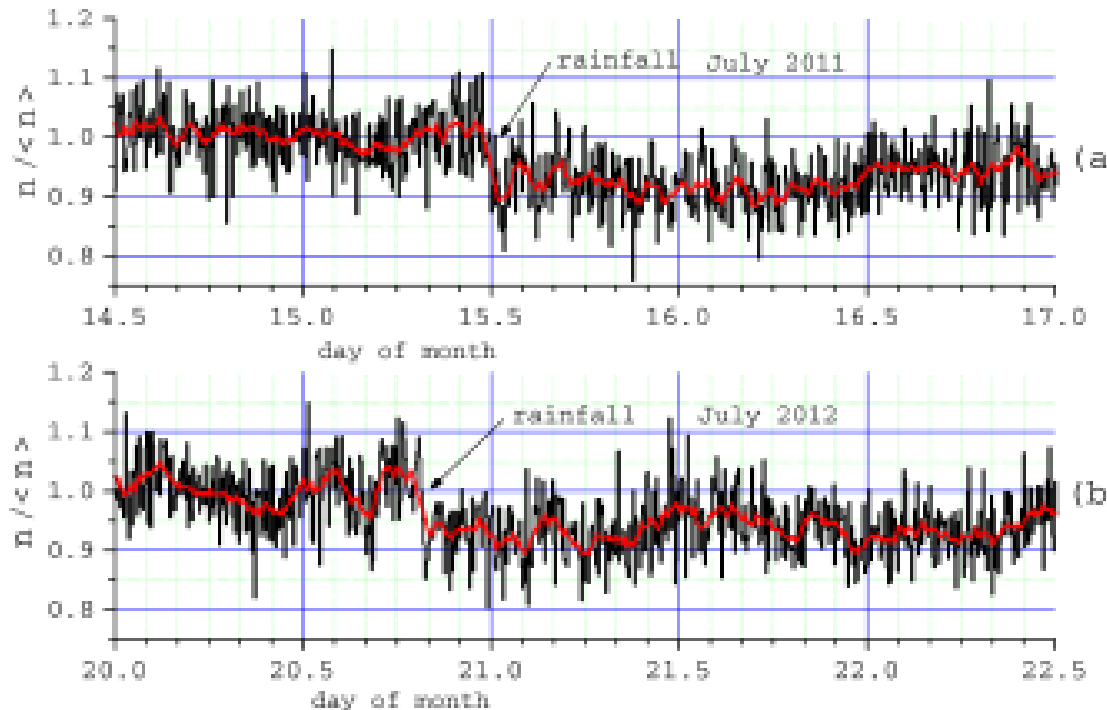


FIG. 5 (color online). Neutron counting rate as a function of the time for two different rainfalls [panels (a) and (b)]. Pressure corrected data.

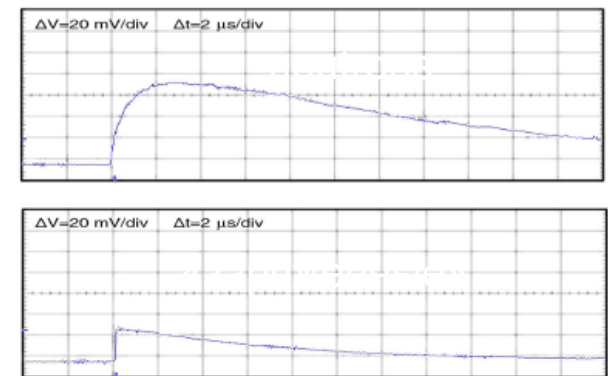


FIG. 2 (color online). Pulse induced by neutron capture ("neutrons," top panel) and background "sharp" pulse (bottom panel).

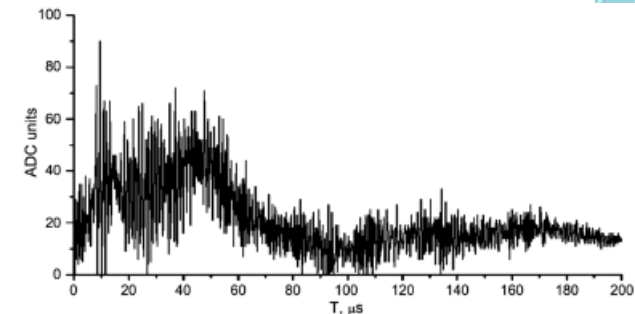
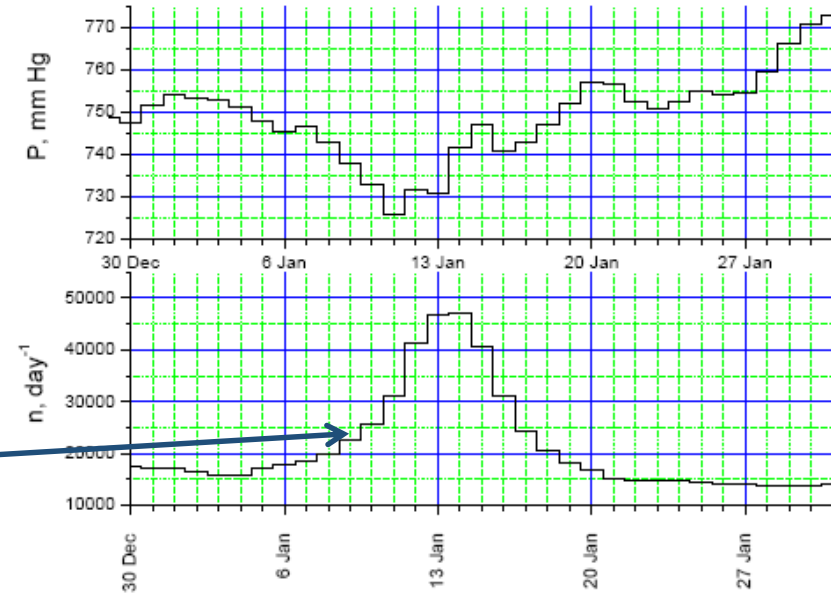
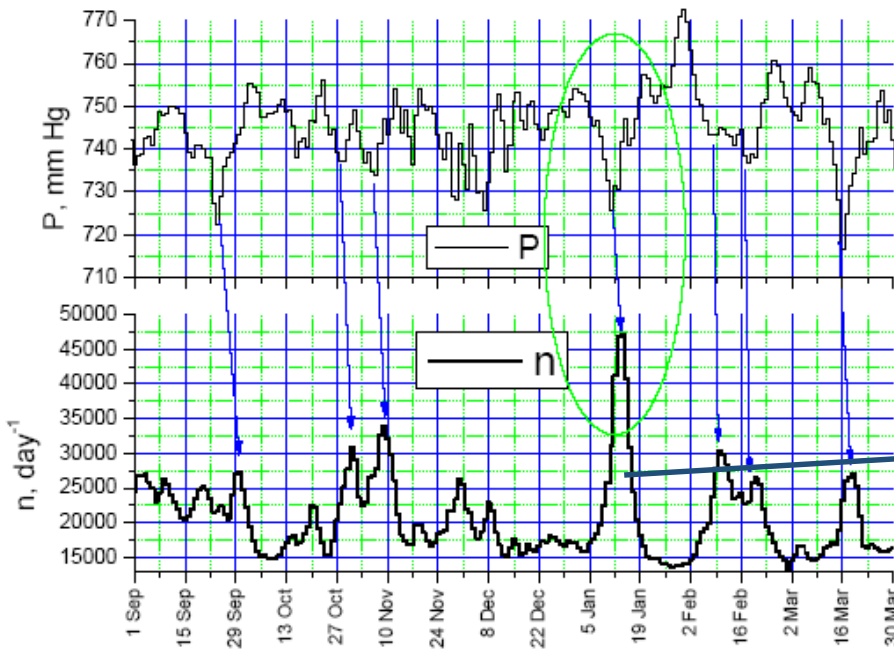


FIG. 3. Noise pulse shape produced by lightning.

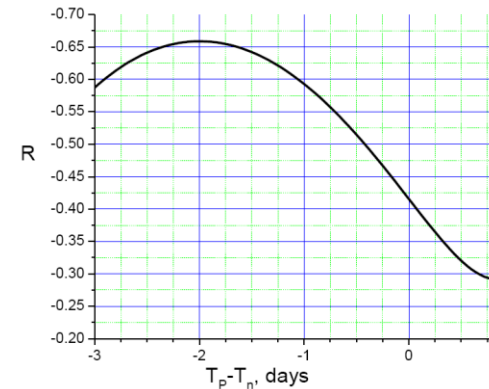
**Summary:** no any neutron excess during thunderstorms but instead sometimes we see decrease of neutron flux (after a dry period)

# Delayed barometric pumping effect in underground neutrons

Thermal neutrons underground, 25 m of w. e. (MSU basement)

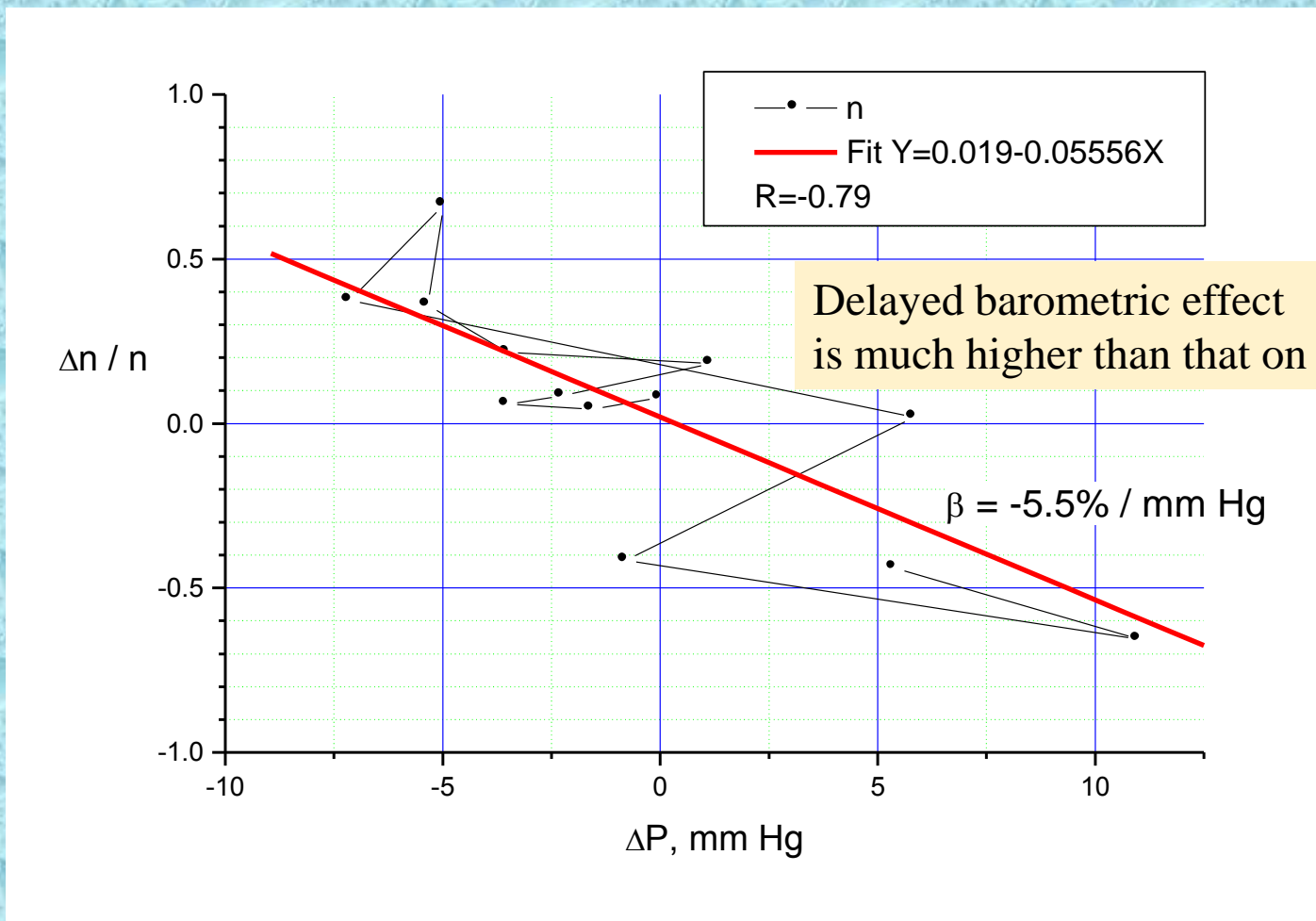


Yu. V. Stenkin, V. V. Alekseenko, D. M. Gromushkin, V. P. Sulakov and O. B. Shchegolev. Underground Physics and the Barometric Pumping Effect Observed for Thermal Neutron Flux Underground. //Journal of Experimental and Theoretical Physics, 2017, Vol. 124, No. 5, pp. 718–721.





# 2-day delayed correlation



This effect should be taken into account in underground experiments ( DM or  $2\beta$ , etc)

# Задержанный нелинейный пампинг-эффект для гамма-фона (уст. n-MSU)

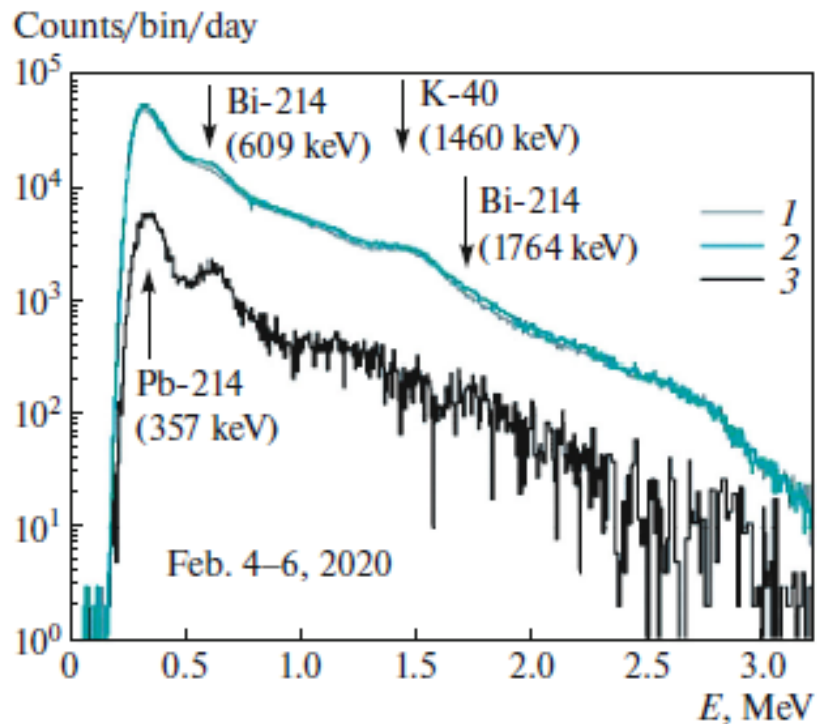


Fig. 3. (In color online) Daily energy spectra of the gamma-ray background on February 6, 2020, (1) and February 4, 2020, (2) and their difference (3).

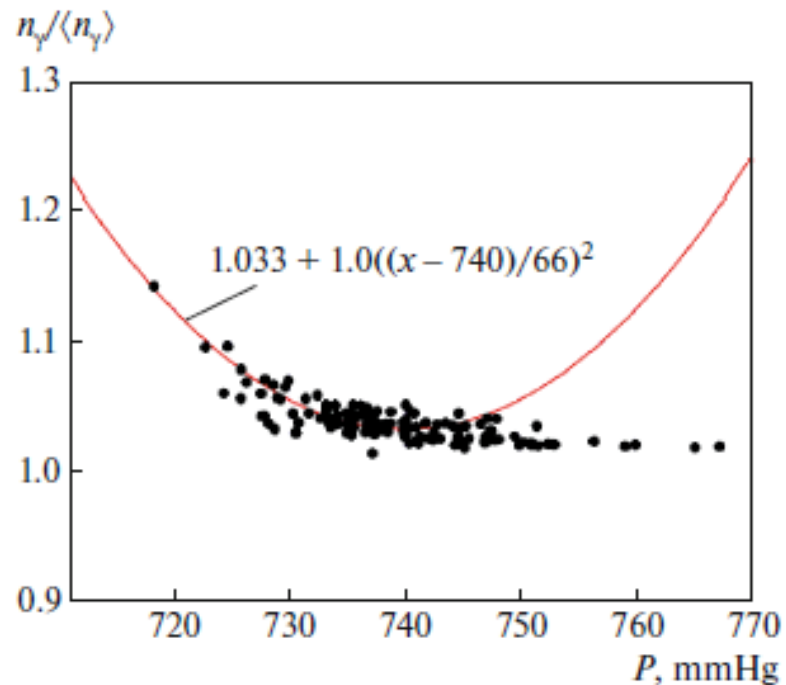


Fig. 4. Gamma-ray background intensity normalized to the value averaged over the entire time of observations versus atmospheric pressure.

Stenkin et al. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2020, Vol. 131, No. 3, pp. 418–421.

Эффект обнаружен в подземной лаборатории ШАЛ-МГУ. Проявляется только при аномально низком атмосферном давлении

This effect should be taken into account in underground experiments ( DM or  $2\beta$ , etc)



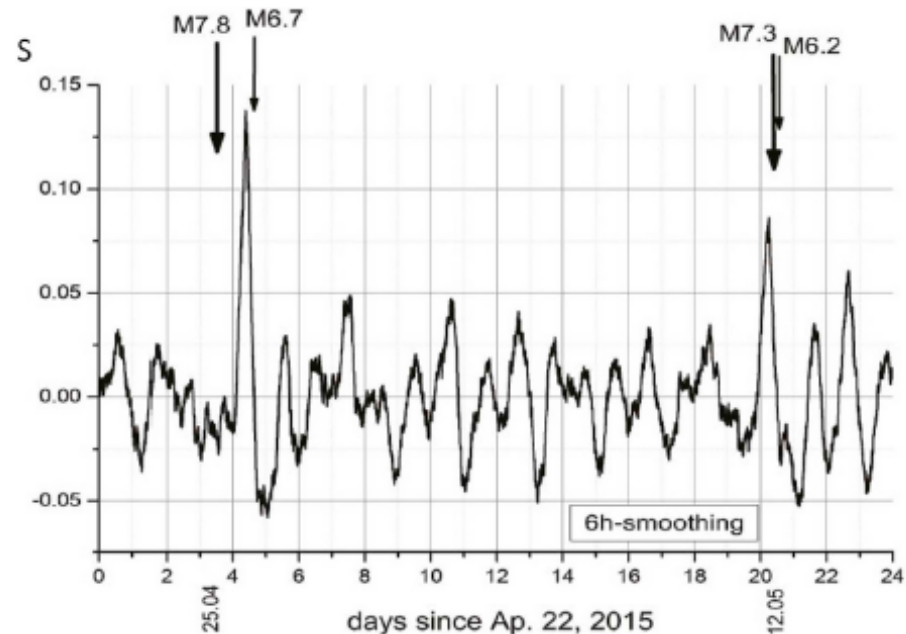
# Response of the environmental thermal neutron flux to earthquakes

**Table 1**

Main shocks of Nepal earthquakes in April–May 2015.

Date	UTC	deg., N	deg., E	depth, km	Mw
25.05.2015	06: 11: 26.9	28.24	84.74	15	7.8
25.05.2015	06: 45: 22.2	28.29	84.90	15	6.7
26.05.2015	07: 09: 10.3	27.86	86.08	15	6.7
12.05.2015	07: 05: 19.0	27.89	86.17	10	7.3
12.05.2015	07: 36: 53.7	27.65	86.31	10	6.2

It is believed that radon concentration could be used as a precursor of earthquakes ((Cicerone et al., 2009)) due to its long (3.8 d) half-life that allows its migration for longer distances both in air and soil compared to thermal neutron diffusion length (corresponding to a few meters in soil and tens of meters in air). Radon could migrate for much longer distances than neutrons inside the soil (up to 15–20 m, depending on the soil conditions). We should emphasize that neutrons are

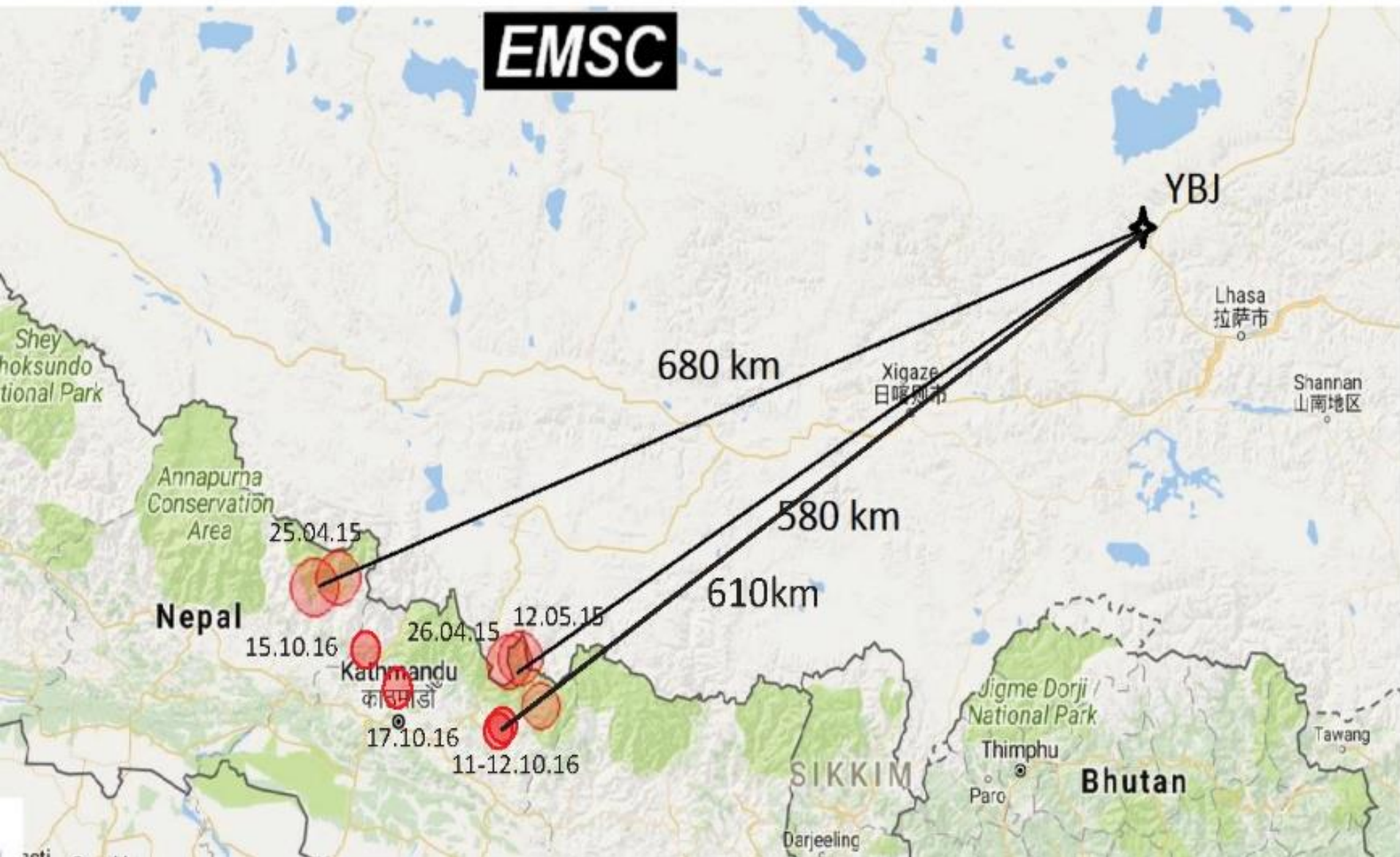


**Table 2**

Parameters of the most significant peaks ( $S > 6\sigma$ ) in detectors 1 & 4 (sum of normalized neutron and charged particle signals in standard deviations).

Date (day. month.year)	Signal in d1 ( $\sigma$ )	Signal in d4 ( $\sigma$ )	Event	Comments
07.02.15	9.2	7.1	?	not understood
26.04.15	9.6	9.4	25.04: Nepal M = 7.8; 25.04: Nepal M = 6.7; 26.04: Nepal M = 6.7	3 huge EQs within $-0.5$ and $-25$ h between them and many aftershocks
12.05.15	6.7	6.3	12.05: Nepal M = 7.3; 12.05: Nepal M = 6.2	2 huge EQs within $-0.5$ h between them
29.03.16	6.2	6.7	?	not understood
08.05.16	9.0	6.3	08.05: Magnetic storm $K_p = 7$	big magnetic storm
12.10.16	10.9	8.4	11.10: Nepal M = 4.6; 12.10: Nepal M = 4.1	2 EQs within $-24$ h between them

# EMSC



# Сбой фазы суточной волны в дни землетрясений

## Нормальная волна

## Нейтронная волна в дни ЗТ

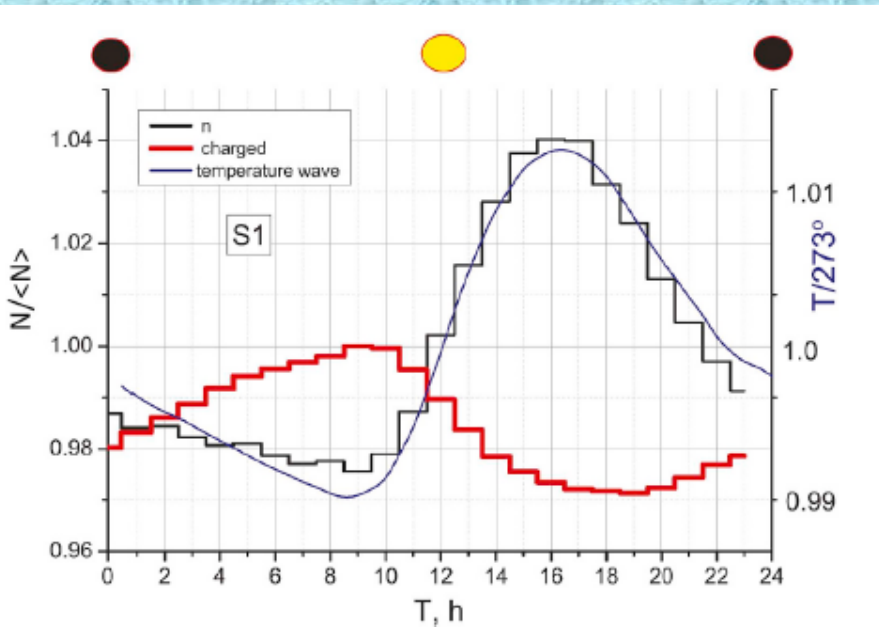


Fig. 1. Diurnal wave observed in the PRISMA-YBJ EN-detectors (“neutron” and “charged” channels, see text) and in absolute temperature inside the experimental hall (in K degrees) normalized to 0 °C vs astronomical local time. Circles indicate Sun upper (yellow) and lower (black) culminations. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

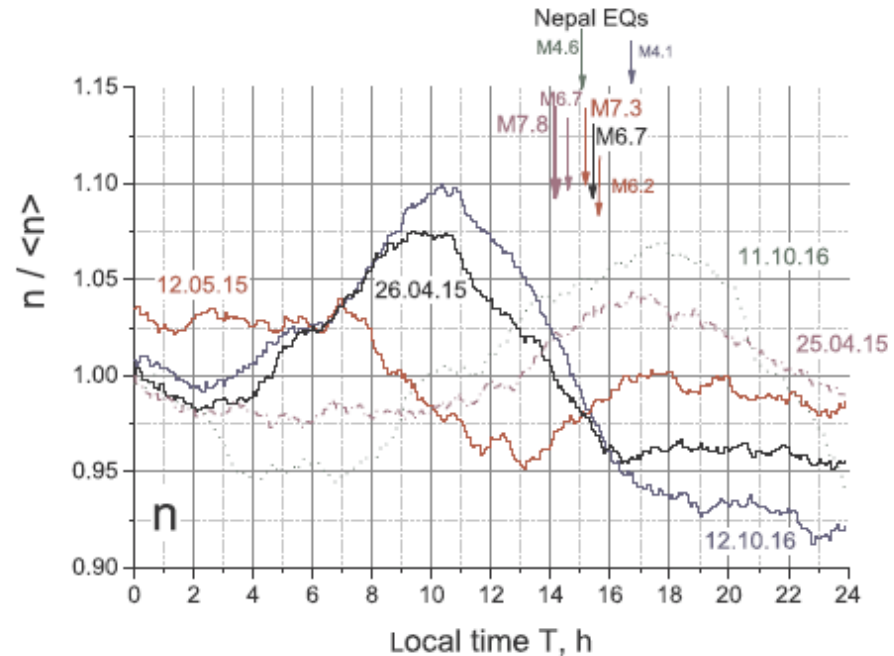



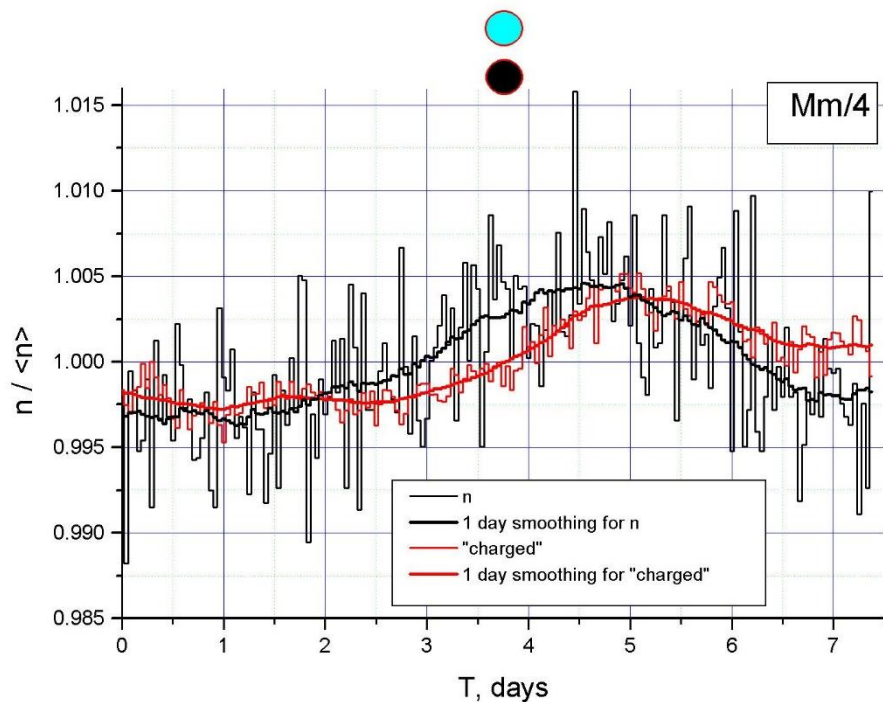
Fig. 5. Neutron diurnal waves for the earthquake days and the following ones. The colors correspond to the different days. The arrows pinpoint the occurrence of the strongest earthquakes in the Nepal region and the corresponding magnitudes. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

**Гипотеза:** увеличение пористости грунта при встряске ускоряет диффузию радона и меняет фазу суточной волны в нейтронах

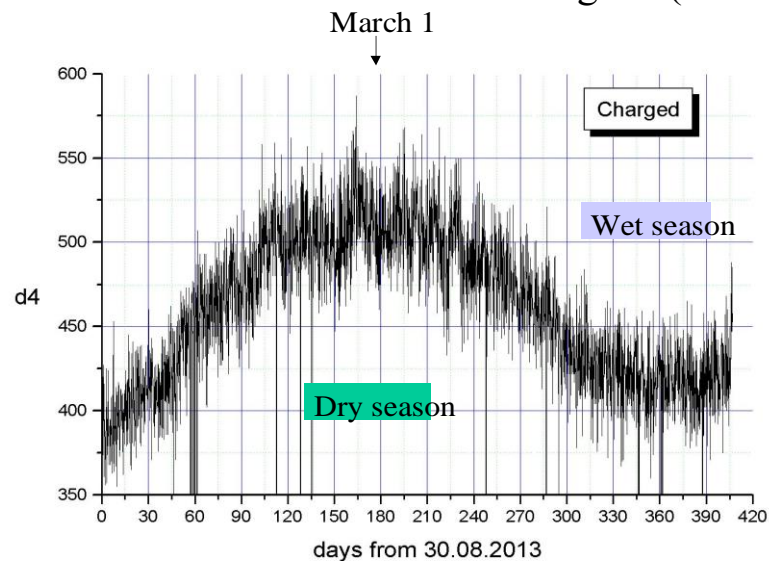


## Seasonal and Lunar Month Periods Observed in Natural Neutron Flux at High Altitude

YURI STENKIN,<sup>1,2</sup> VICTOR ALEKSEENKO,<sup>1</sup> ZEYU CAI,<sup>3</sup> ZHEN CAO,<sup>4</sup> CLAUDIO CATTANEO,<sup>5</sup> SHUWANG CUI,<sup>3</sup>  
ELIO GIROLETTI,<sup>5,6</sup> DMITRY GROMUSHKIN,<sup>2</sup> CONG GUO,<sup>4,7</sup> XUEWEN GUO,<sup>3</sup> HUIHAI HE,<sup>4</sup> YE LIU,<sup>8</sup> XINHUA MA,<sup>4</sup>   
OLEG SHCHEGOLEV,<sup>1</sup> PIERO VALLANIA,<sup>9,10</sup> CARLO VIGORITO,<sup>10,11</sup> and JING ZHAO<sup>4</sup>



YBJ. Seasonal variations of “charged” (no smoothing)



# Вариации нейтронного потока в Тибете

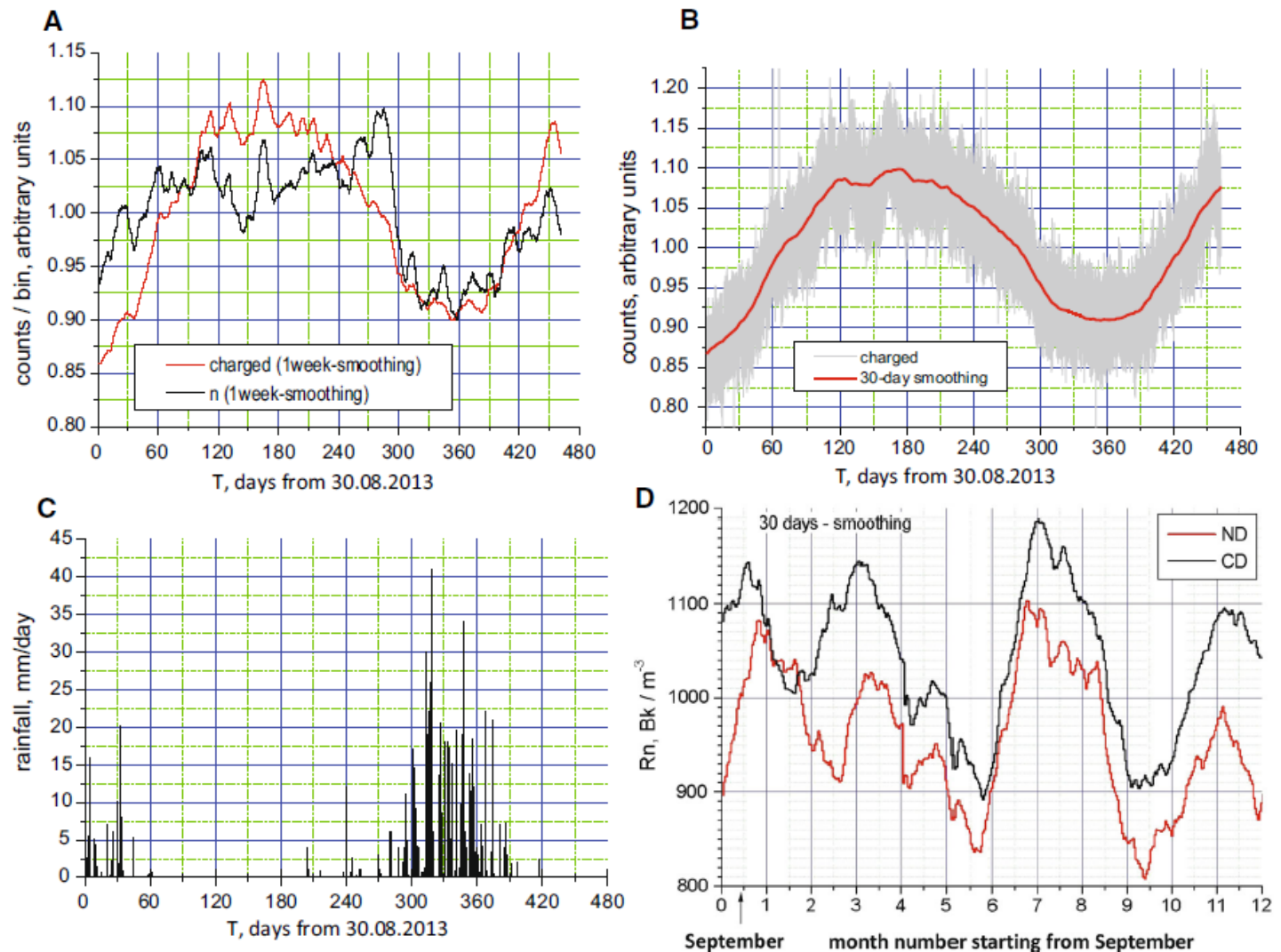
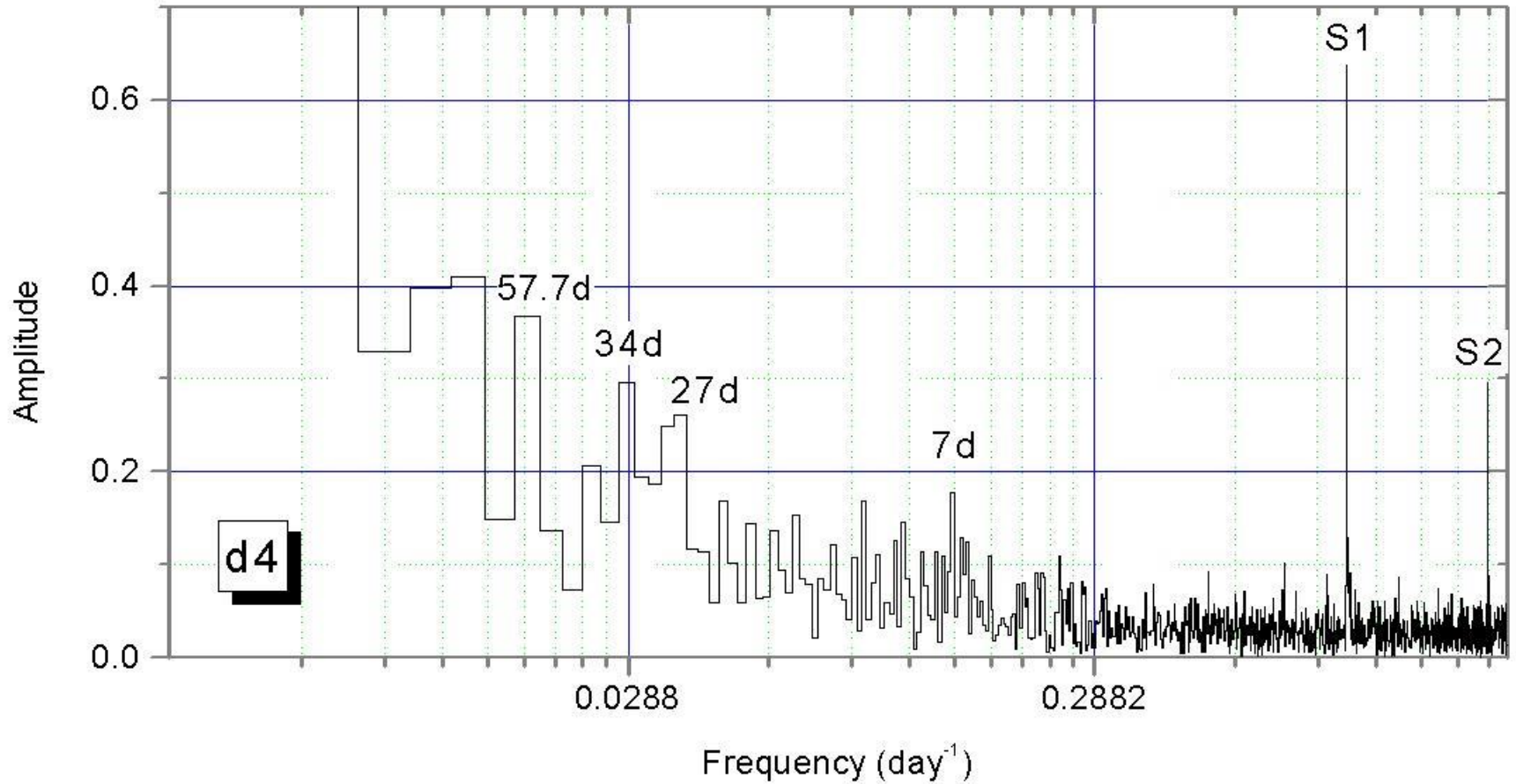


Figure 3

Seasonal effects for different parameters. **a** “Neutrons” and “charged” channels with 1-week smoothing; **b** “charged” channel with and without 1-month smoothing; **c** rainfall in mm/day (taken from <http://rp5.ru>); **d** air radon concentration measured by radon meters (Lukas cells) in two spots of the ARGO-YBJ hall (ND—north and CD—central detectors) from Sep. 2013 till Aug. 2014 and averaged over 2 years

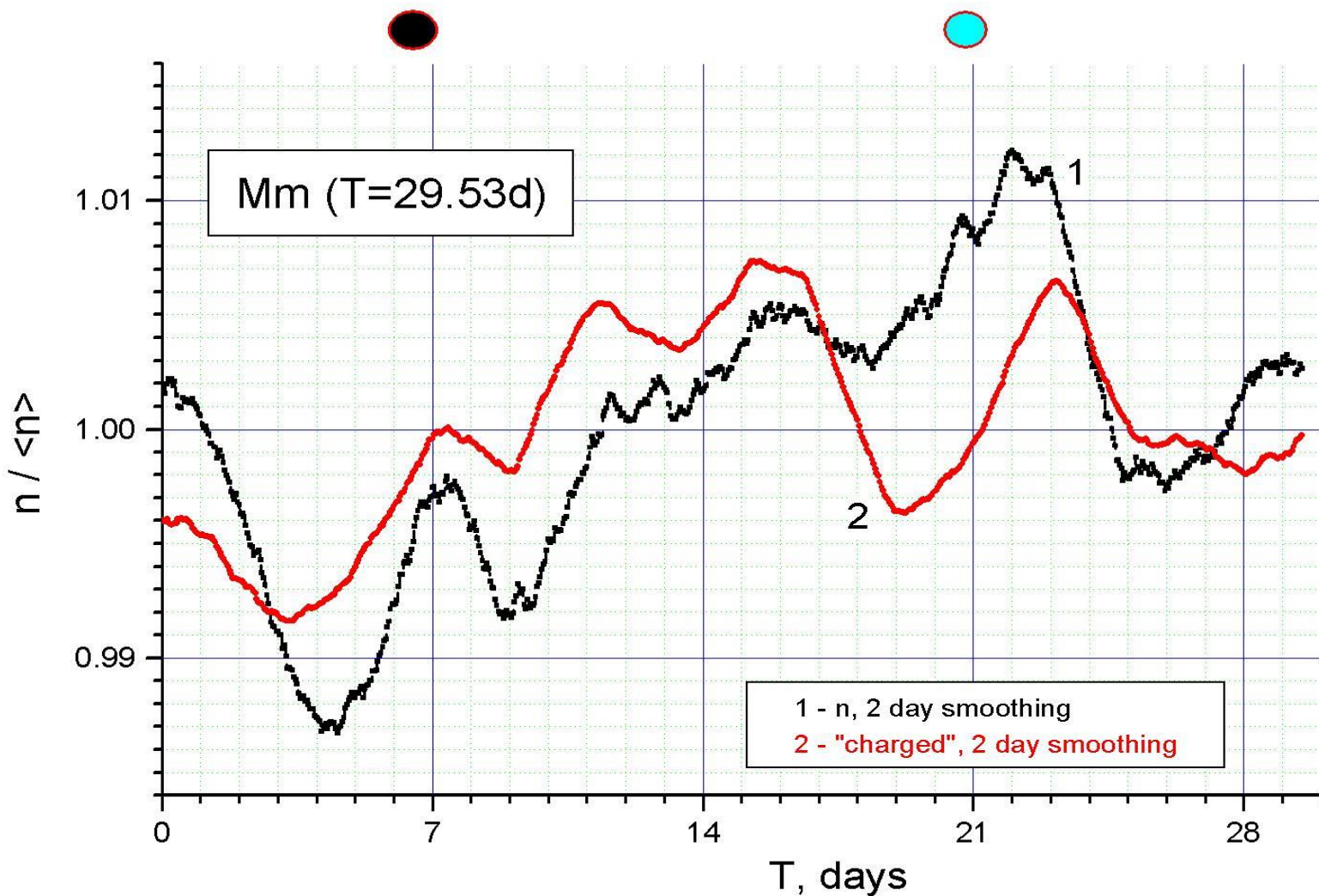
# Фурье - анализ

YBJ, 15 months

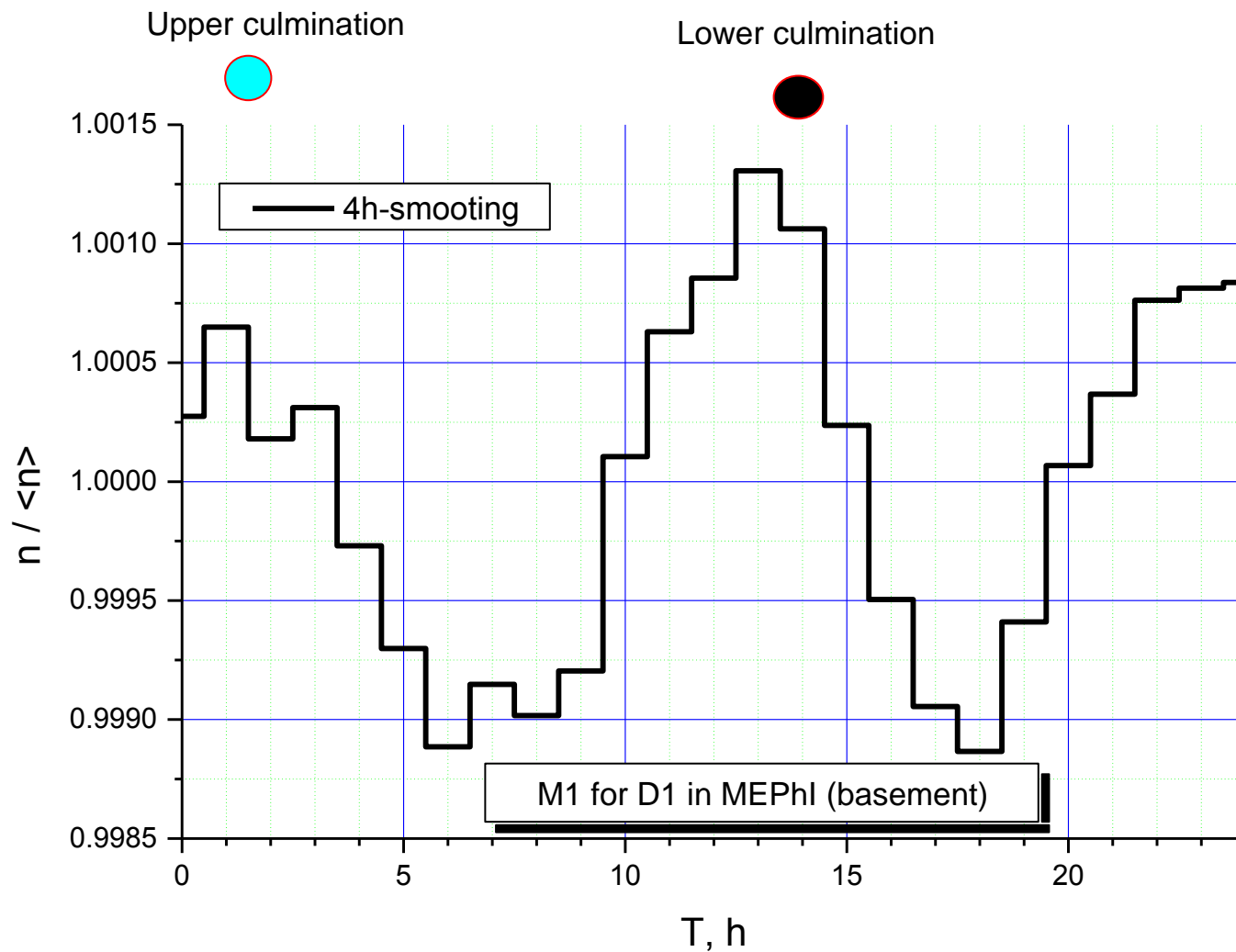




# Лунный месяц в Тибете в геонейтронах



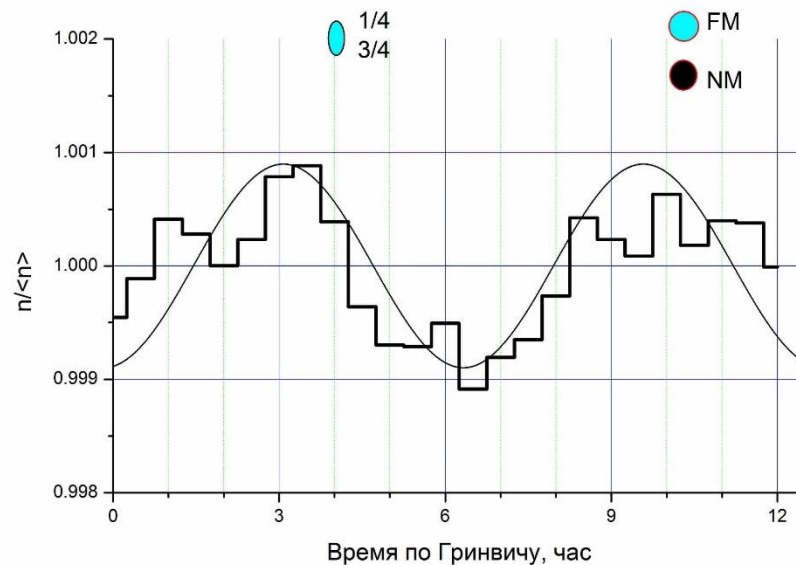
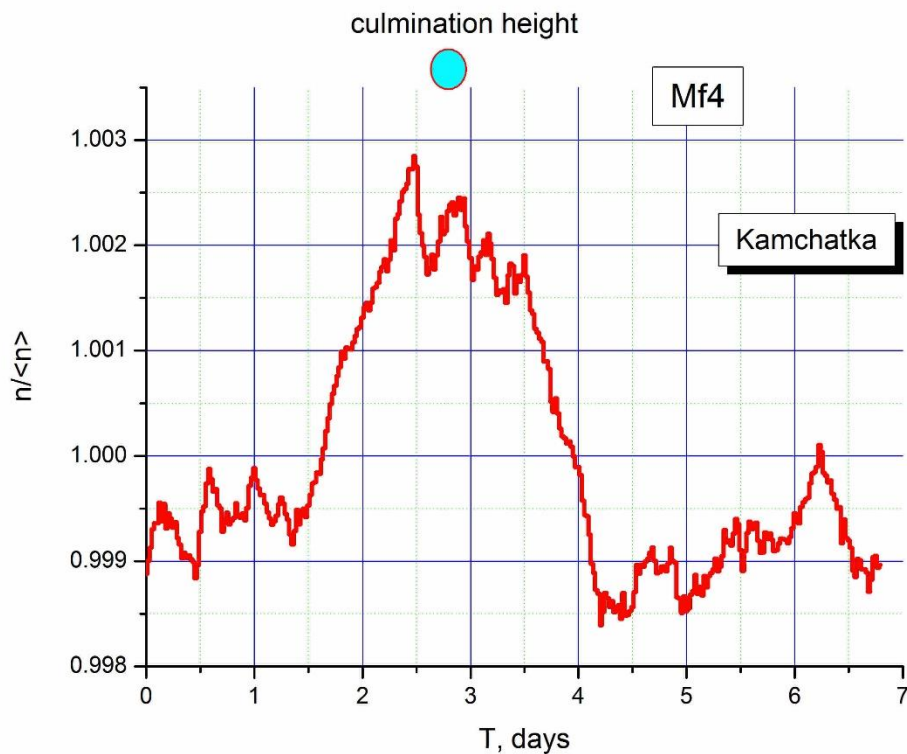
# M2 полусуточная приливная волна (установка «Нейтрон» в МИФИ)



A=0.1% !

# Установка н-Камчатка

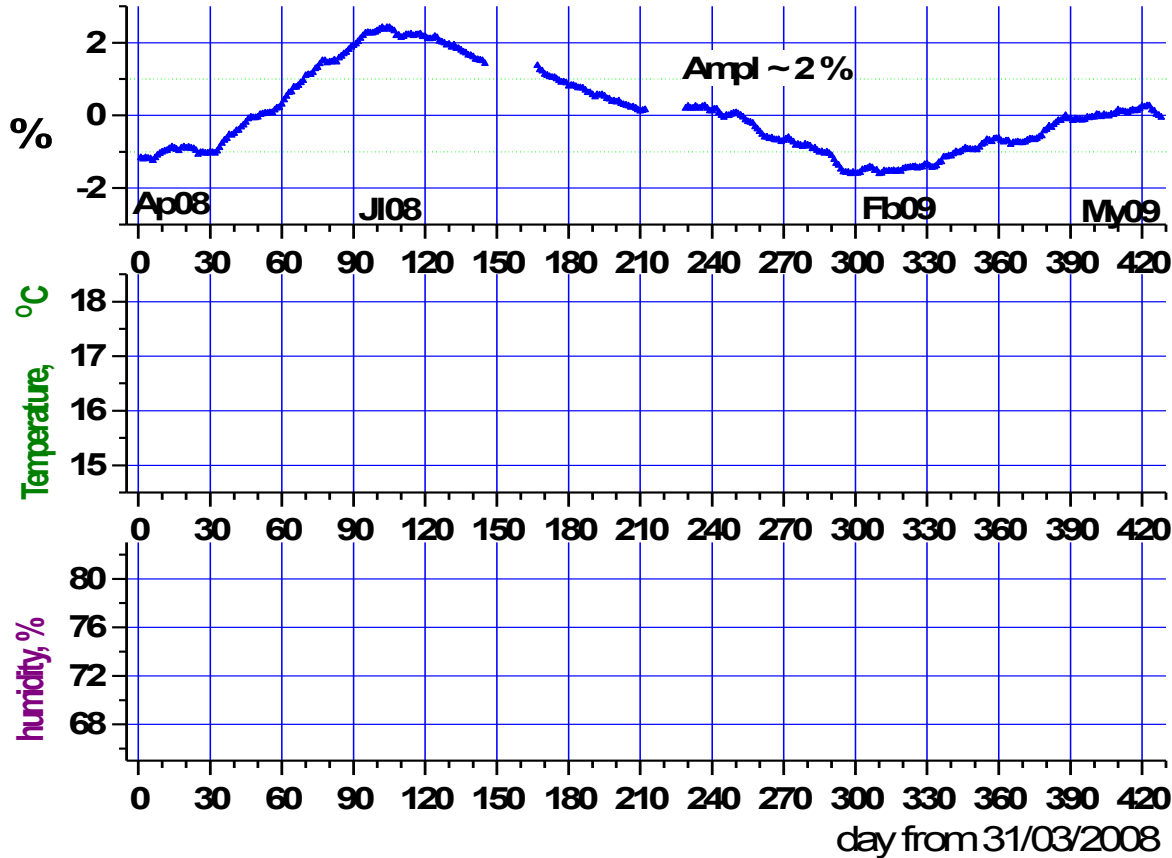
## Четвертые гармоники лунного месяца и лунных суток



*Yu.V. Stenkin et al. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2022, Vol. 86, No. 5, pp. 639–641*

# Сезонный эффект в тепловых нейтронах глубоко под землей (БНО)

391(of 428) full days : 31/03/08 - 01/06/09. (~1000 m.w.e.). Day points (100d smoothed).



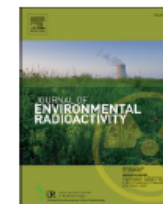
Этот эффект способен объяснить результат эксперимента DAMA/LIBRA, если последний чувствителен к нейтронному фону



Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

## Journal of Environmental Radioactivity

journal homepage: <http://www.elsevier.com/locate/jenvrad>



### Sporadic increases of radioactive aerosols as a possible reason for heavy nuclides enhancements recorded with the en-detectors

Yu.V. Stenkin<sup>a,b,\*</sup>, V.V. Alekseenko<sup>a</sup>, D.D. Dzhabpuev<sup>a</sup>, D.A. Kuleshov<sup>a</sup>, A.U. Kudjaev<sup>a</sup>, K. R. Levochkin<sup>a</sup>, O.I. Mikhailova<sup>a</sup>, O.B. Shchegolev<sup>a</sup>, V.I. Stepanov<sup>a</sup>



Баксанская  
Нейтринная  
Обсерватория  
ИЯИ РАН

Установка «н-БНО»

Стенькин Ю.В. – ВКЛ-2022  
Fig. 1. Photo of the n-BNO experiment layout.

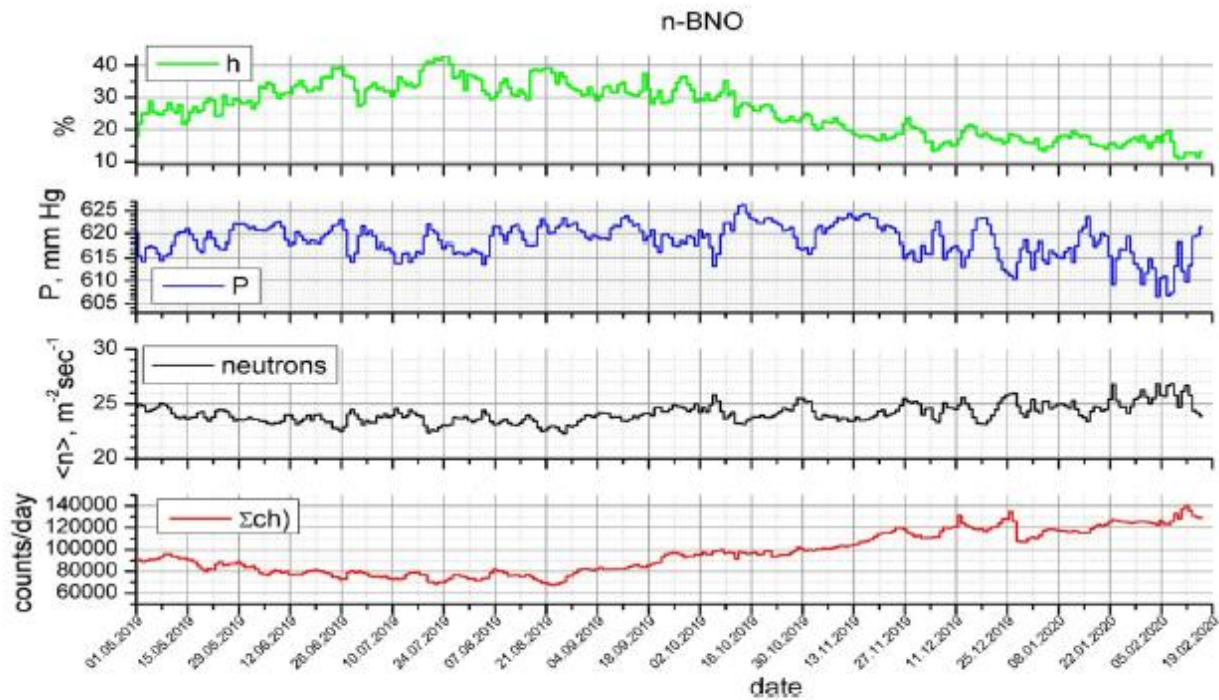


Fig. 3. Time series of environmental thermal neutron flux and “charged” component in 2019–2020 along with barometric pressure and relative air humidity.

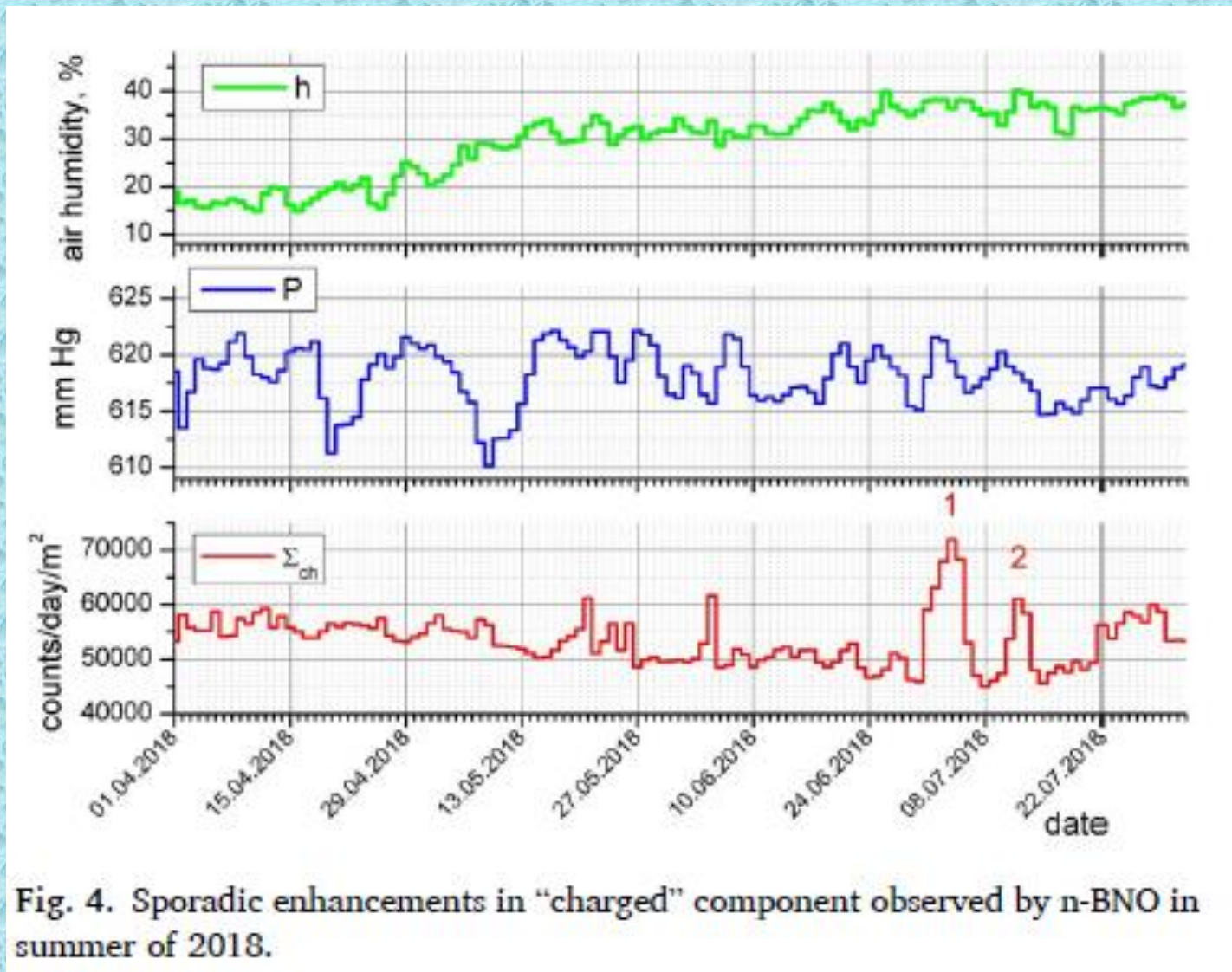


Fig. 4. Sporadic enhancements in “charged” component observed by n-BNO in summer of 2018.





## Объяснение эффекта

Вода в горных реках насыщена растворенным радоном



При повышении уровня воды и бурном течении, над водой создается аэрозольное облако



Поскольку радон радиоактивен, образующиеся аэрозоли также радиоактивны и заряжены



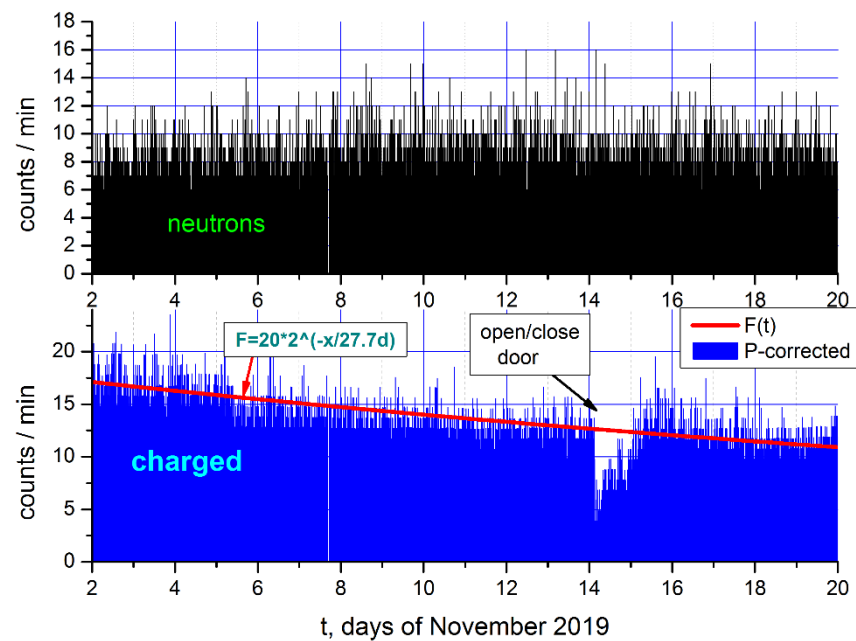
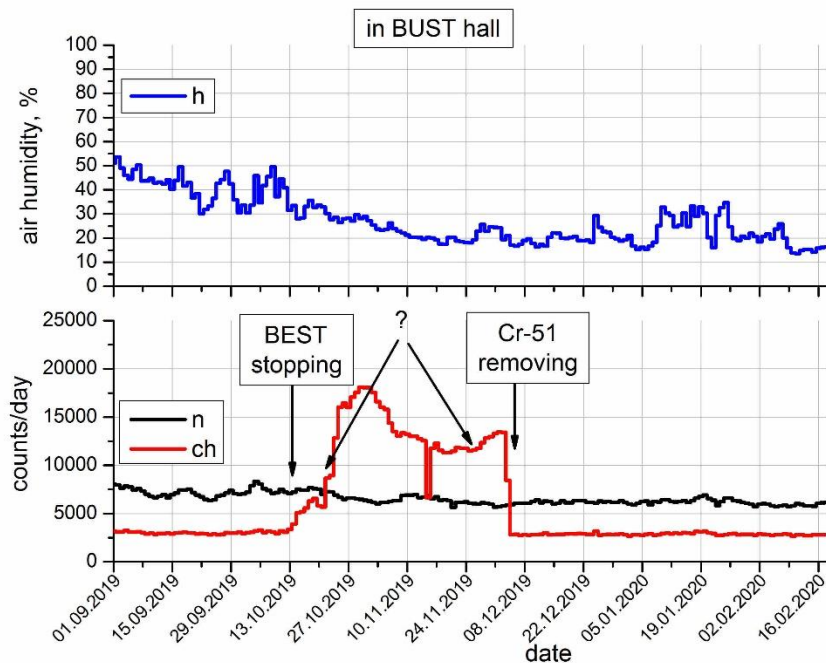
Заряженные аэрозоли живут много дольше, чем не заряженные и достигают детекторы внутри здания



Осаждаясь на поверхность детектора, продукты распада радона, живущие около 20 мин ( $\text{Bi-214}$  и  $\text{Pb-214}$ ) дают сигналы в детекторе

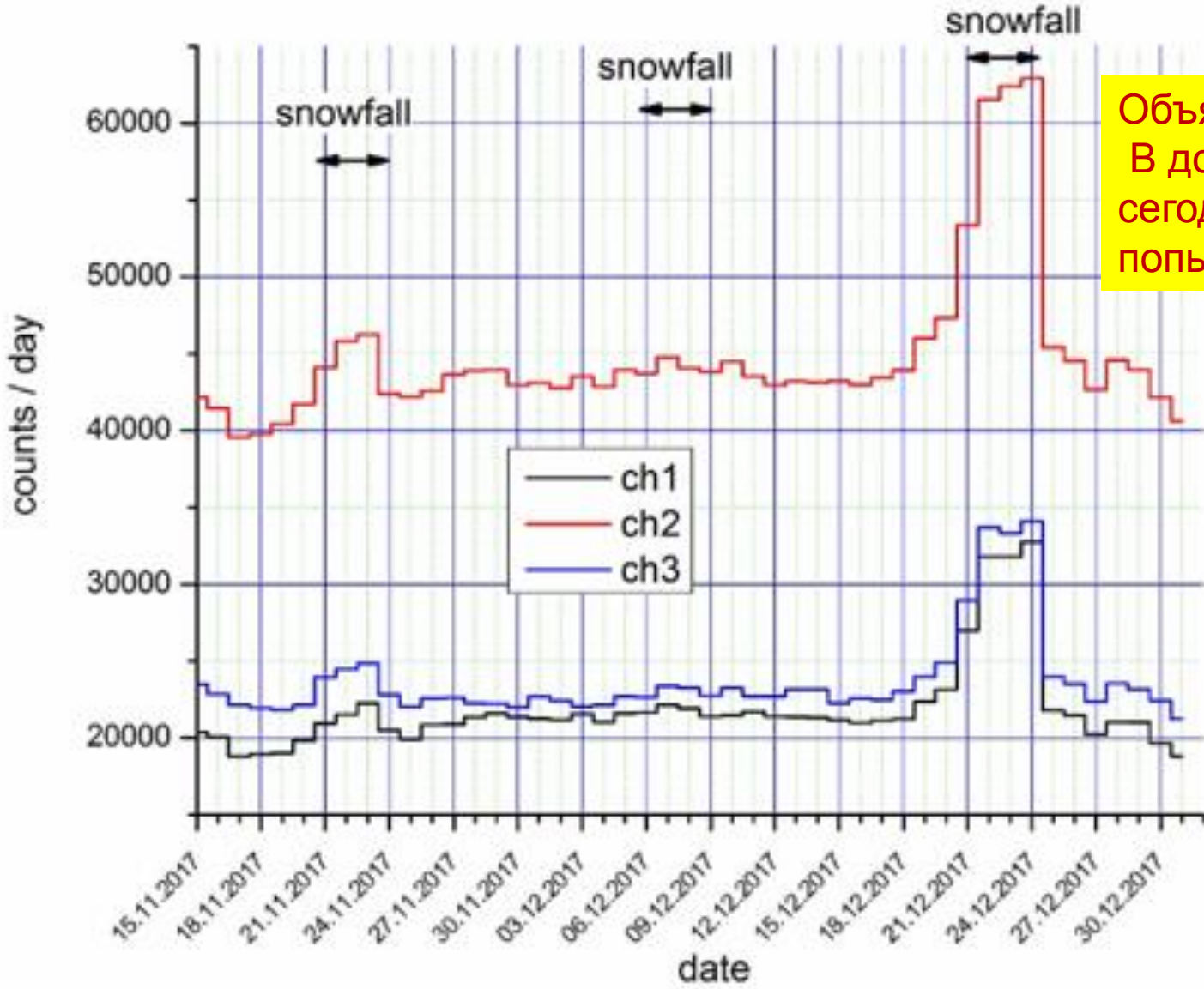
# «Рукотворные аномалии» наблюдавшиеся во время проведения эксперимента BEST на БНО

В 2019 г. нам представился уникальный случай наблюдений во время проведения на БНО эксперимента BEST с источником нейтрино и гамма-излучения Cr-51. Эн-детектор располагался в той же штольне на расстоянии 3.5 км от места проведения BEST.



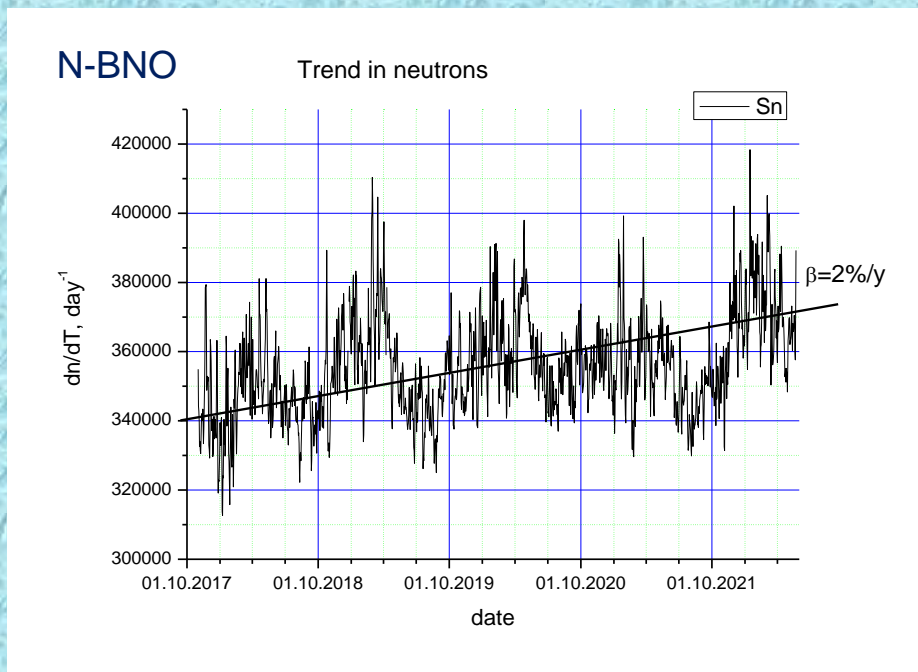
Т. о. эн-детектор можно использовать для мониторинга не только геонейтронов, но и радиоактивных аэрозолей.

# Возрастания концентрации тяжелых радиоактивных нуклидов в воздухе во время снегопадов и метелей



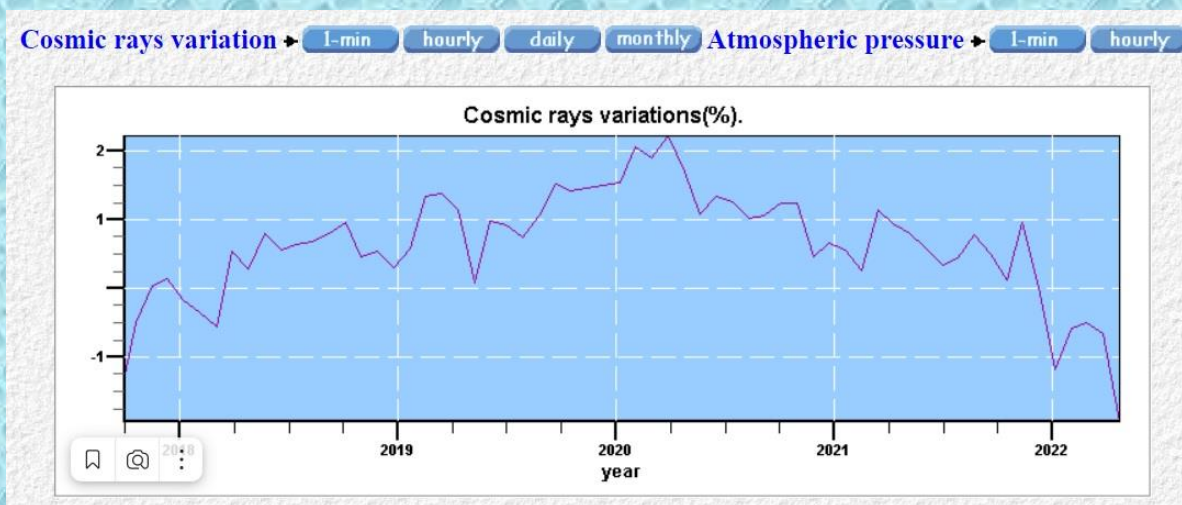
Объяснения пока нет.  
В докладе Лагуткиной сегодня будет сделана попытка объяснения

# тренд в нейтронах



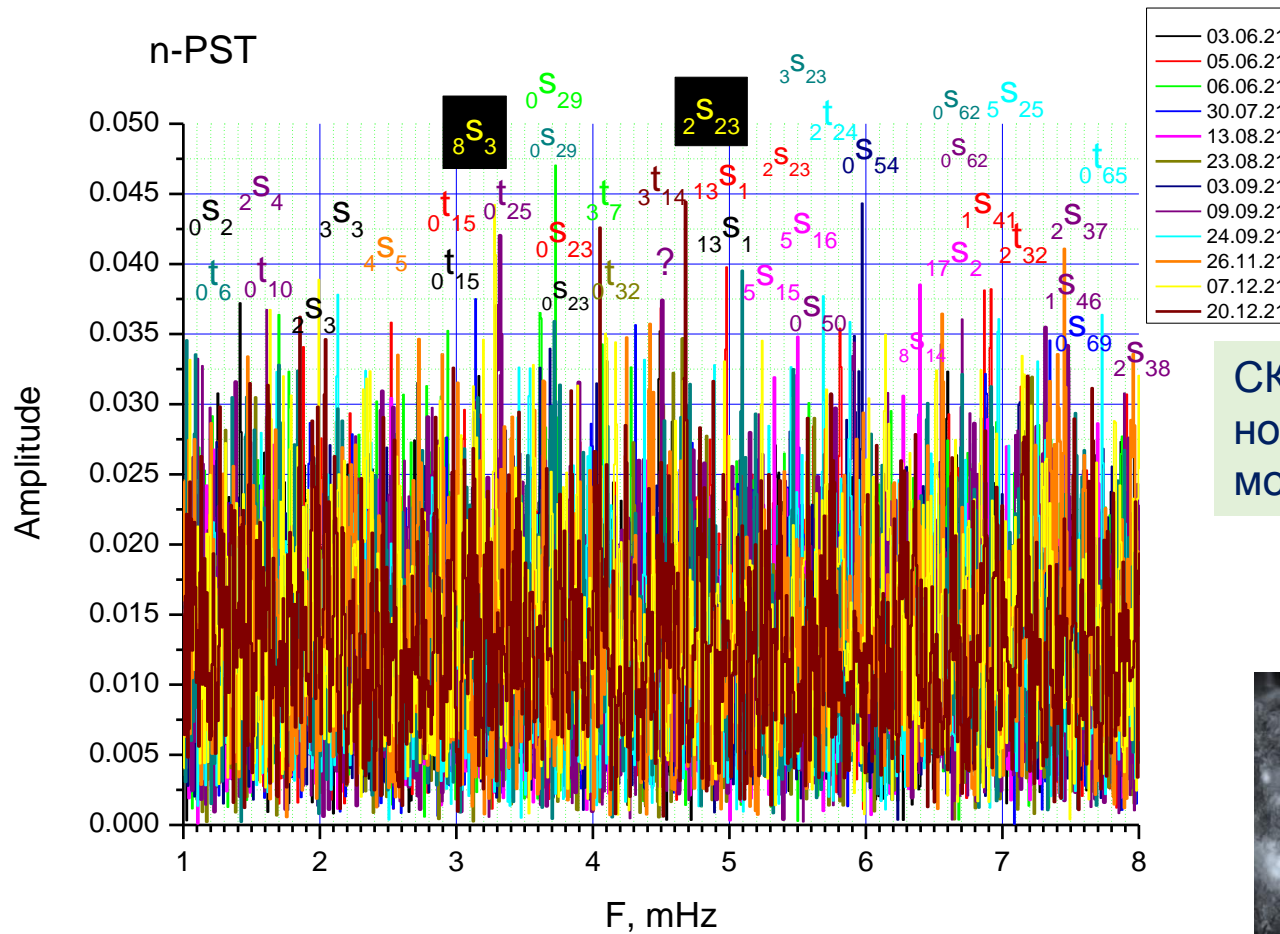
(объяснения пока нет)

Космическими лучами это не объяснить



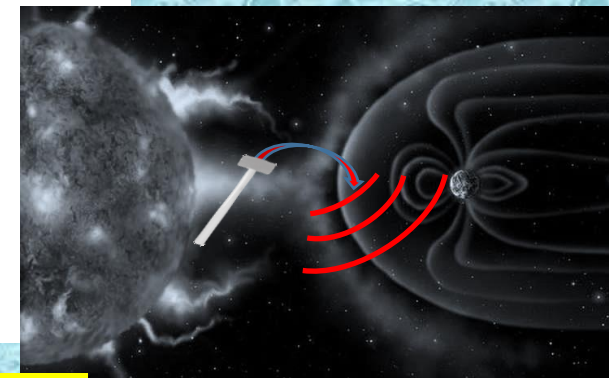
Скорее всего эффект связан с изменением климата

# Собственные колебания Земли в тепловых нейтронах



СКЗ есть всегда,  
НО количество «звонящих»  
МОД есть случайная величина

Форбуш-эффект - один из  
ВОЗМОЖНЫХ ИСТОЧНИКОВ  
возбуждения СКЗ



Это совершенно не исследованная область исследований,  
которую начал, но успел закончить Виктор Алексеенко...

## Заключение

- ❖ Природные тепловые нейтроны или геонейтроны - находятся в равновесии со средой и, таким образом, зависят от ее состояния
- ❖ Это значит, что измеряя природные тепловые нейтроны, можно судить о состоянии «среды их обитания» - атмосферы или земной коры, а также о природных явлениях, нарушающих равновесие
- ❖ Нейтронная физика помогает «заглянуть» на несколько метров внутрь грунта и понять некоторые геофизические процессы.
- ❖ Преимущество измерения нейтронного потока над измерением концентрации радона в воздухе состоит в том, что нейтроны не чувствительны к движению воздуха: вентиляции, сквознякам и пр.
- ❖ С помощью эн-детекторов удобно мониторировать не только тепловые нейтроны, но и концентрацию в воздухе продуктов распада радона.
- ❖ Использование нейтронов в геофизике открывает новые возможности
- ❖ Для полноценного применения данного метода в сейсмологии нужна сеть идентичных установок, например на Камчатке, с расстояниями ~ 100 км между ними.

**Спасибо!**