



Применение мировой сети нейтронных мониторов для оперативного мониторинга подготовки мощных землетрясений в потоке космических лучей

В.В. Борог, Е.И. Яковлева

Национальный исследовательский ядерный университет

«МИФИ»

НОЦ НЕВОД, VVVorog@mephi.ru

***XIX - Всероссийская открытая конференция
“Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”***

ИКИ РАН (Москва, 15-19 ноября 2021 г.)

Современные методики

- Классические методы геофизических измерений не позволяют получить заблаговременные предикторы даже мощных землетрясений.
- В настоящее время разрабатывается ряд косвенных методик, связанных с регистрацией изменений в смежных средах (литосфера-атмосфера-ионосфера) на последней стадии подготовки землетрясений.
- В ряде работ наблюдались изменения свойств нижней ионосферы в F-слое за счет роста концентрации слоя электронов. Это связано с возрастанием температуры над областью формирования землетрясения. Размеры таких возмущений могли составлять несколько сотен км. Время упреждения в разных работах получается от часов до нескольких суток.

- Изменения температуры атмосферы над областью эпицентра приводят также к генерации внутренних гравитационных волн (ВГВ) в нижней стратосфере за 4–5 суток до проявления землетрясений с магнитудами $M \approx 6-7$. Температурные аномалии наблюдались в переходном слое тропосфера-стратосфера на площади в несколько тысяч кв. км. Вейвлет-анализ временных рядов указывал на генерацию волновых процессов.
- Все полученные температурные данные формировались фрагментарно и связаны с особенностью спутниковых наблюдений.
- Таким образом, излучаемая в стратосферу тепловая энергия, на стадии подготовки высокоэнергичных землетрясений, как правило, вызывает генерацию в атмосфере ВГВ. Волны, по каналам проводимости, могут распространяться на тысячи км от источника.

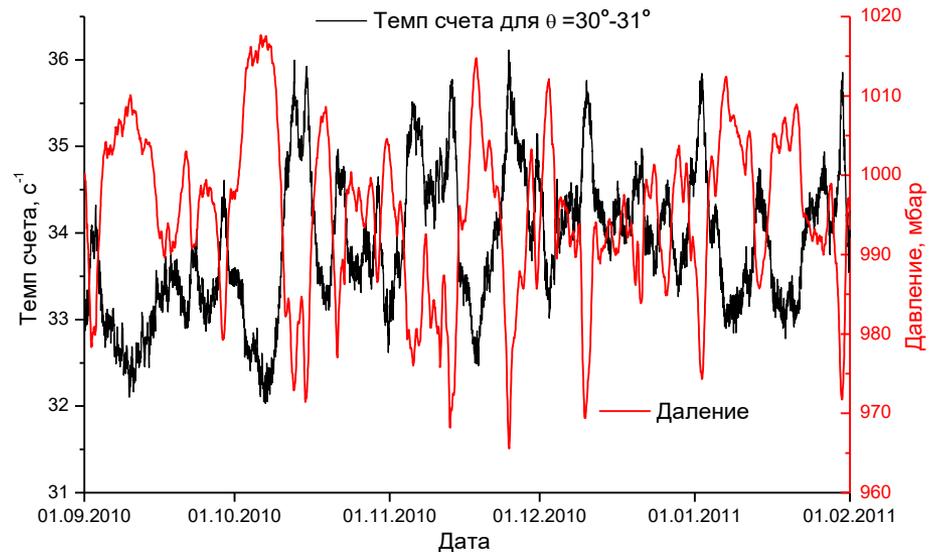
Метеоэффекты в потоке КЛ

Процессы такого типа должны приводить к метеоэффектам в космических лучах (КЛ) и вызывать вариации потока вторичных частиц, достигающих уровня земли.

$$\Delta N_{\mu} / N_{\mu} = \beta_P \Delta P$$

ΔP – изменение атмосферного давления.

β_P – барометрический коэффициент.



Сентябрь 2010 – январь 2011 гг.

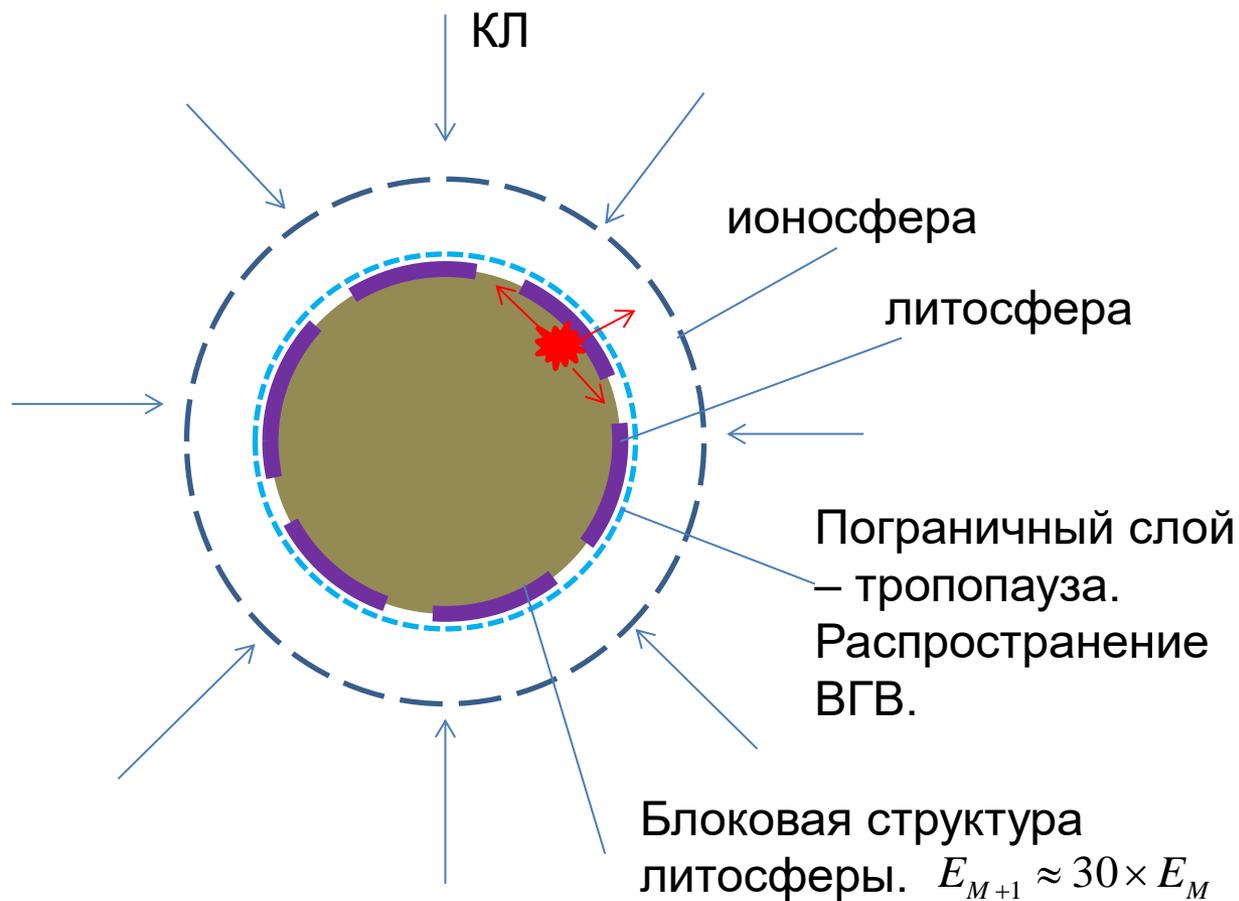
Величина эффекта небольшая:

$$\Delta N_{\mu} / N_{\mu} = (10 - 20 / 1000 \approx (1 - 2)\%$$

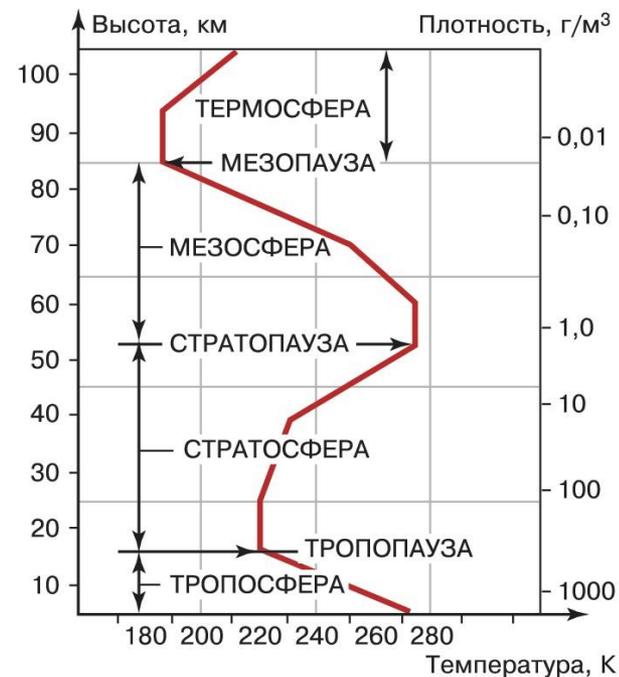
- Мировая сеть наземных нейтронных мониторов (NM) представляет собой распределенный детектор, работающий в непрерывном режиме и способный дистанционно реагировать на барометрические эффекты волновых процессов ВГВ, связанных с подготовкой землетрясений.
- Излучаемая в атмосферу энергия вызывает генерацию волн в атмосфере (ВГВ), которые по каналам проводимости (в пограничном слое тропосфера-стратосфера) могут распространяться на тысячи км от источника.
- Такая взаимосвязь должна возрастать с увеличением мощности процессов. Учитывая представления о блоковой структуре литосферы и фрактальном характере пространственного накопления энергии, можно ожидать, что генерация ВГВ на последних стадиях перед мощными землетрясениями ($M \approx 8$) произойдет в разных местах Земли.
- В связи с этим следует ожидать синхронный отклик многих NM, расположенных далеко друг от друга.

Схема генерации ВГВ

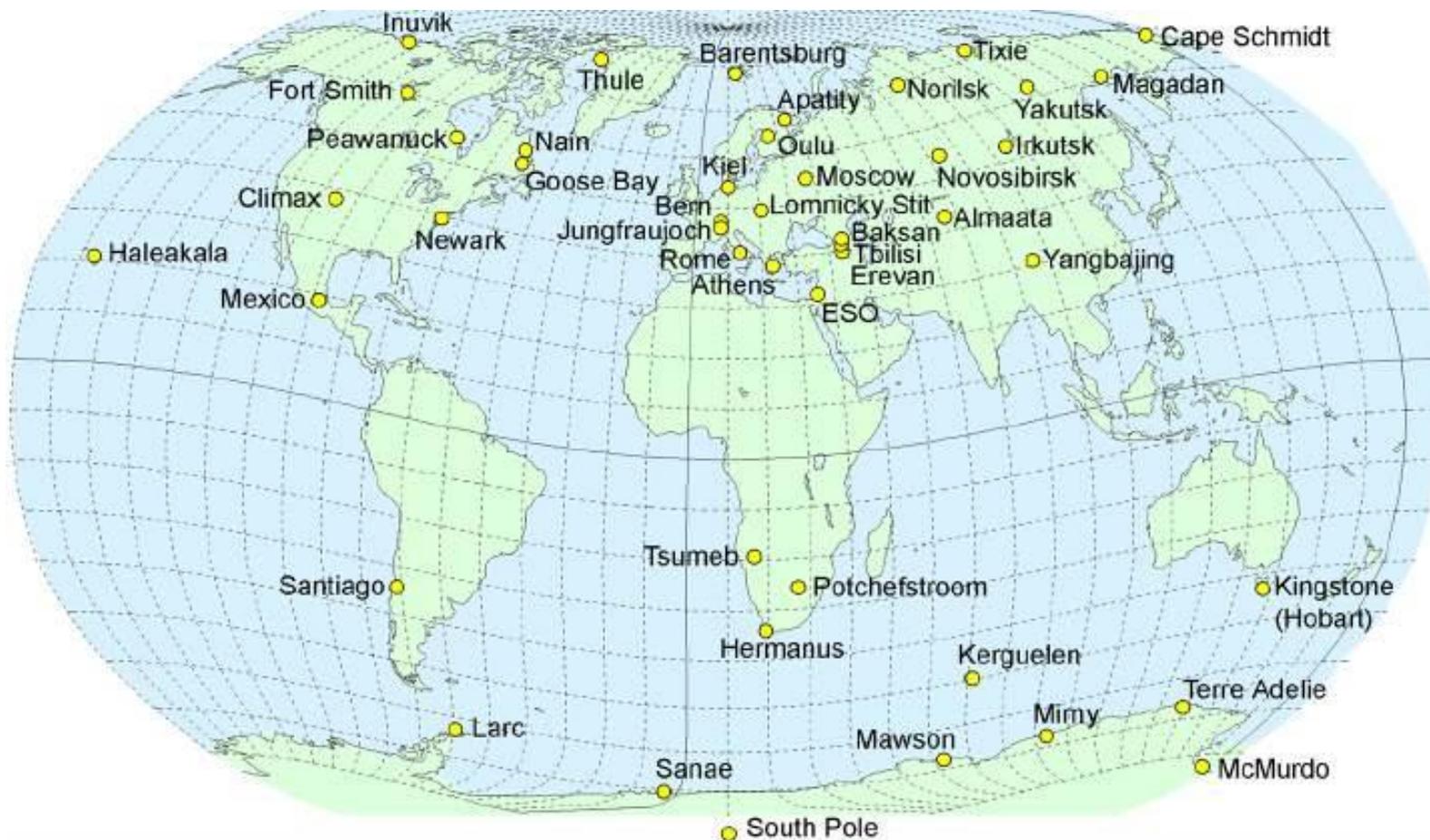
- КЛ – заряженные частицы (протоны).
- Кинетическая энергия > 1000 МэВ;
- Достигают поверхности Земли



При больших M возможна генерация ВГВ между разными (отдаленными) блоками.



Мировая сеть нейтронных мониторов



Мировая Сеть НМ: <http://www.nmdb.eu/nest/search.php>

ЗАДАЧИ РАБОТЫ:

- Применить методику ФШС для дистанционной идентификации кратковременных возмущений потока космических лучей перед мощными землетрясениями.
- Использовать для анализа данные мировой сети наземных нейтронных мониторов, расположенных в разных точках земного шара.
- Сопоставить синхронные вариации КЛ во временных рядах разнесенных NM, предшествующие землетрясению.
- Заранее «увидеть» в потоке космических лучей сигналы-предикторы землетрясений.

Методика анализа скрытых возмущений

Процесс формирования землетрясения представляет собой стохастическую систему открытого типа, к которой применима новая методика анализа. Величина ожидаемых эффектов невелика и для их идентификации на фоне случайных вариаций использован метод фликкер-шумовой спектроскопии (ФШС).

Фактор нестационарности временного ряда

Разностные моменты Q :

$$Q_k = \frac{1}{\alpha T^2} \int_0^{\alpha T} \int_{t_k}^{t_k+T} [N(t) - N(t+\tau)]^2 dt d\tau$$

$$Q_{k-1} = \int_0^{\alpha T} \int_{t_k}^{t_k+T-\Delta T} [N(t) - N(t+\tau)]^2 \frac{dt}{T} \frac{d\tau}{\alpha T}$$

$$C_k(t_k) = \frac{Q_k - Q_{k-1}}{1/2(Q_k + Q_{k-1})} / \frac{\Delta T}{T} \simeq \frac{\Delta Q_k}{Q_k} / \frac{\Delta T}{T}$$

$\alpha < 0.5$; $t_k = k\Delta T$, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

T - интервал усреднения.

ΔT - приращение интервала.

τ - параметр временной задержки или лаг.

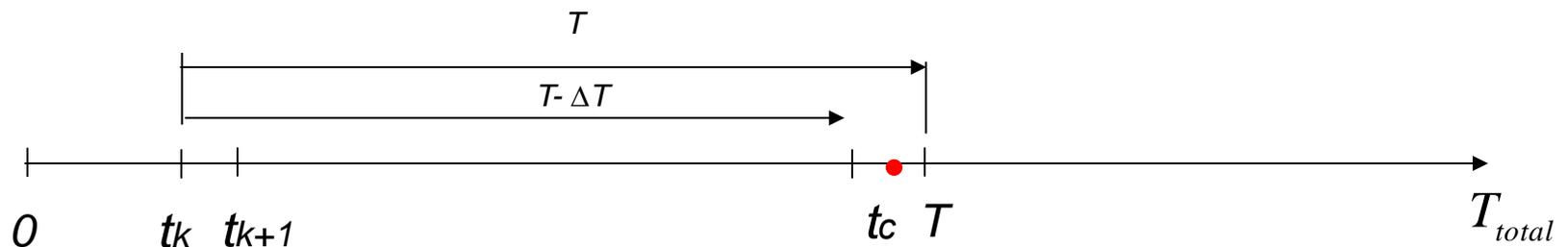
$N(t)$ – измеряемая величина временного ряда (интенсивность).

Q – разностный момент (переходная структурная функция), который характеризует изменение динамики в пределах скользящего временного окна T .

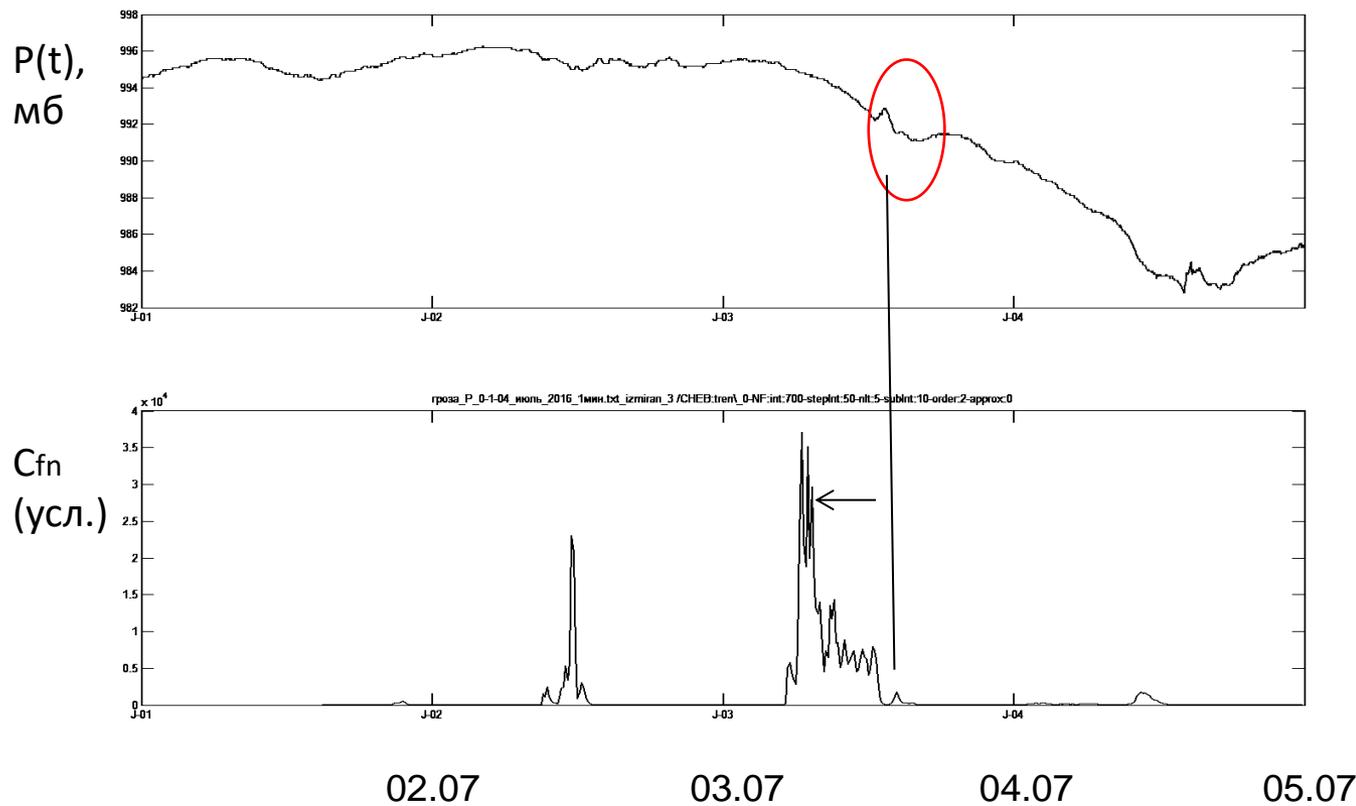
$C_k(t_k)$ - **удельный фактор нестационарности временного ряда.**

С.Ф. Тимашев, «Фликкер-шумовая спектроскопия. Информация в хаотических сигналах». 2007 г.

Borog V.V., et al. J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 798. P. 012050.



Анализ грозы 02-03 июля 2016 года

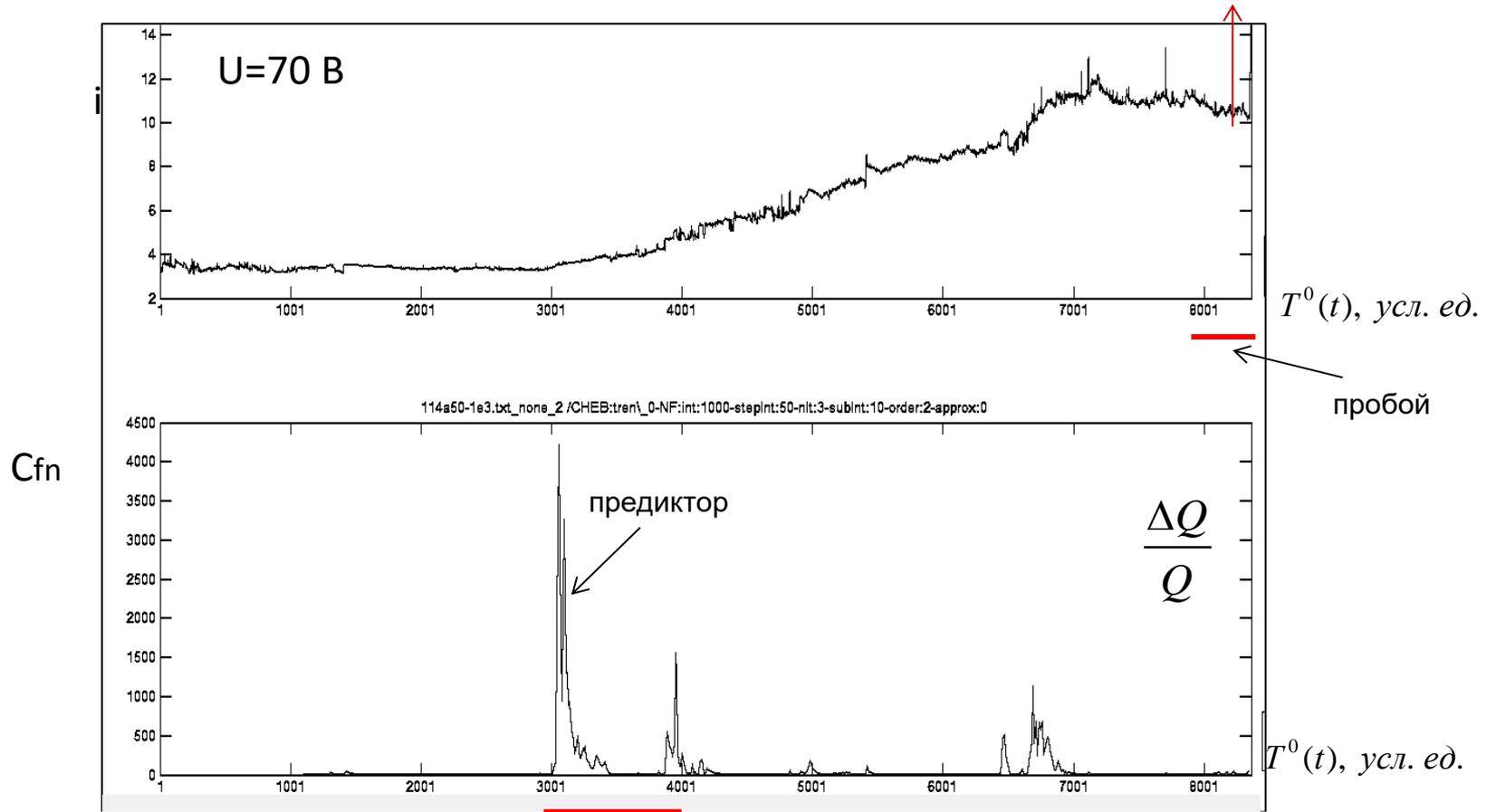


Давление:
Троицк, Моск.Обл.
с 01 по 04 июля
2016 г.

<http://www.nmdb.eu>

Фактор
нестационарности
временного ряда
атмосферного
давления на
уровне земли

Пробой в кремниевом кристалле



Анализ мощных землетрясений

- Обработывались данные мировой сети наземных нейтронных мониторов (NM), которые работают в непрерывном режиме и способны дистанционно регистрировать проявление волновых процессов, связанных с подготовкой землетрясений.
- Вариации должны отражаться во многих NM мировой сети. Такой эффект возрастает с увеличением мощности землетрясения.
- Всплеск фактора нестационарности $S(t)$ отдельного временного ряда $N(t)$ потока КЛ должен указывать на момент распространения ВГВ над расположением этого NM.
- Апробация такой методики проведена для нескольких катастрофических землетрясений с магнитудой $M \geq 7$, произошедших в последние годы.
- Для нивелирования возможных фоновых гелиофизических эффектов выбирались события в периоды спокойного Солнца.
- Результаты указывают на возникновение «синхронных» вариаций КЛ, зарегистрированных мировой сетью NM, работающих на разных континентах. Время упреждения землетрясений составляет несколько суток.

Методика анализа (событие 24 мая 2013 года)

| | Дата землетрясения | М, магнитуда | Н, глубина км | Место землетрясения | Число НМ | Опережение, сутки | Помеха, (возмущение МПЗ) |
|---|---------------------|--------------|---------------|---------------------|----------|-------------------|--------------------------|
| 1 | 24.05.2013 05:24 | 8.3 | 598 | Охотское море | 15 | 8 | нет |

НМ – 15 штук (Европа, Азия, Америка);

МПЗ – практически не возмущено в период формирования предиктора (геофизической помехи – нет);

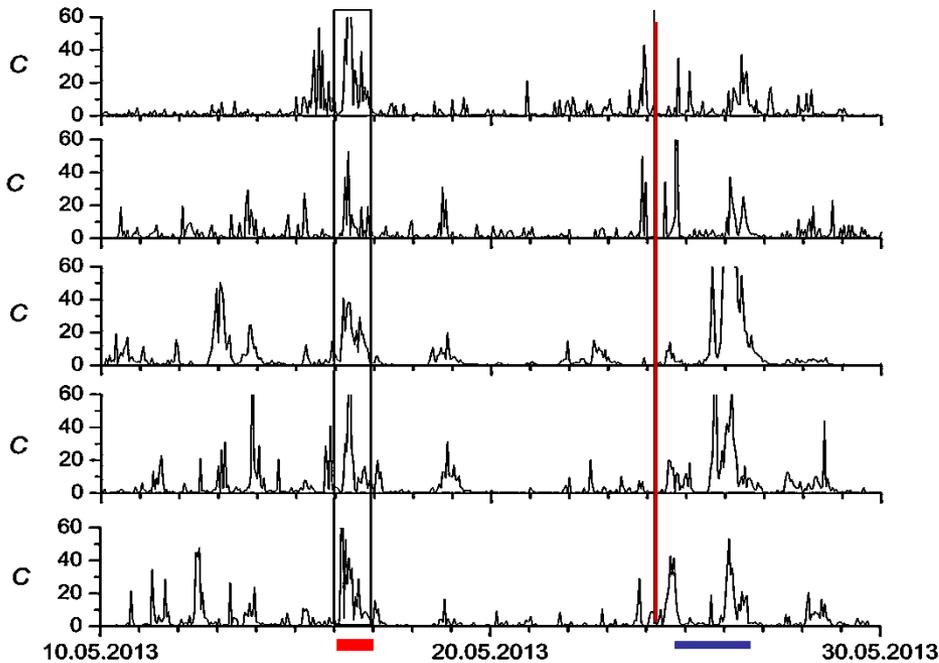
Синхронный совместный предиктор (от всех НМ) составил около 8 суток.

<https://www.nmdb.eu/nest/search.php>

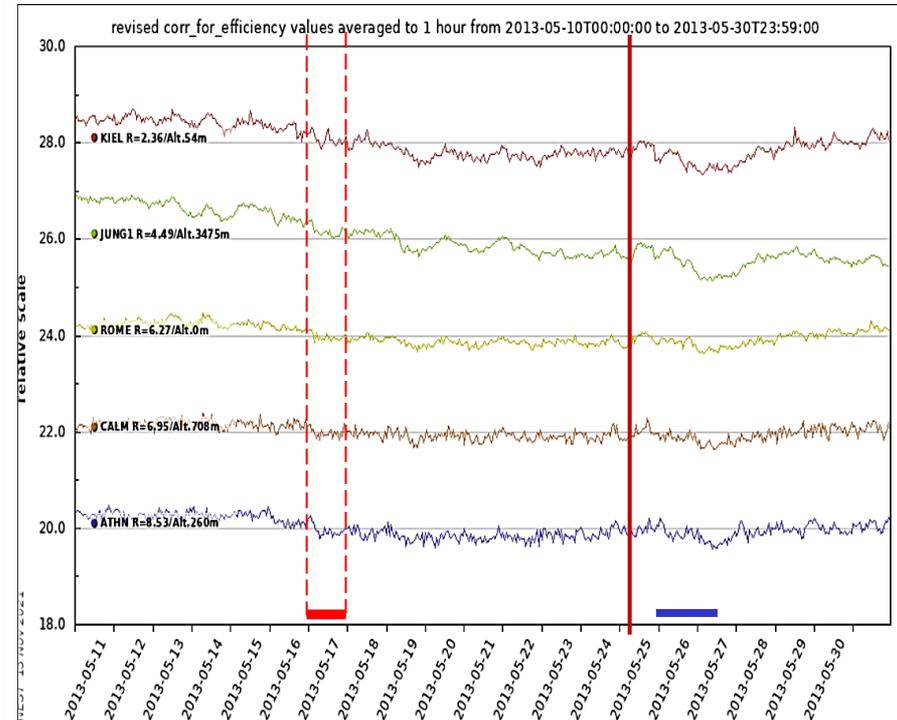
<https://www.emsc-csem.org/Earthquake/?filter=yes>

Анализ данных европейских NM (май 2013)

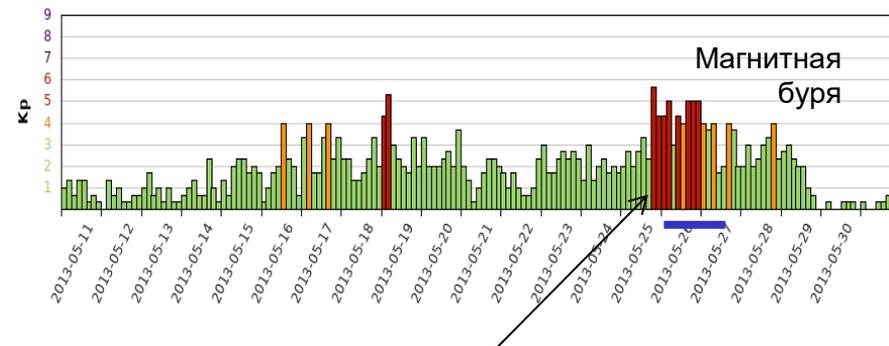
Ряды фактора нестационарности $C(t)$ для NM



Данные нейтронных мониторов

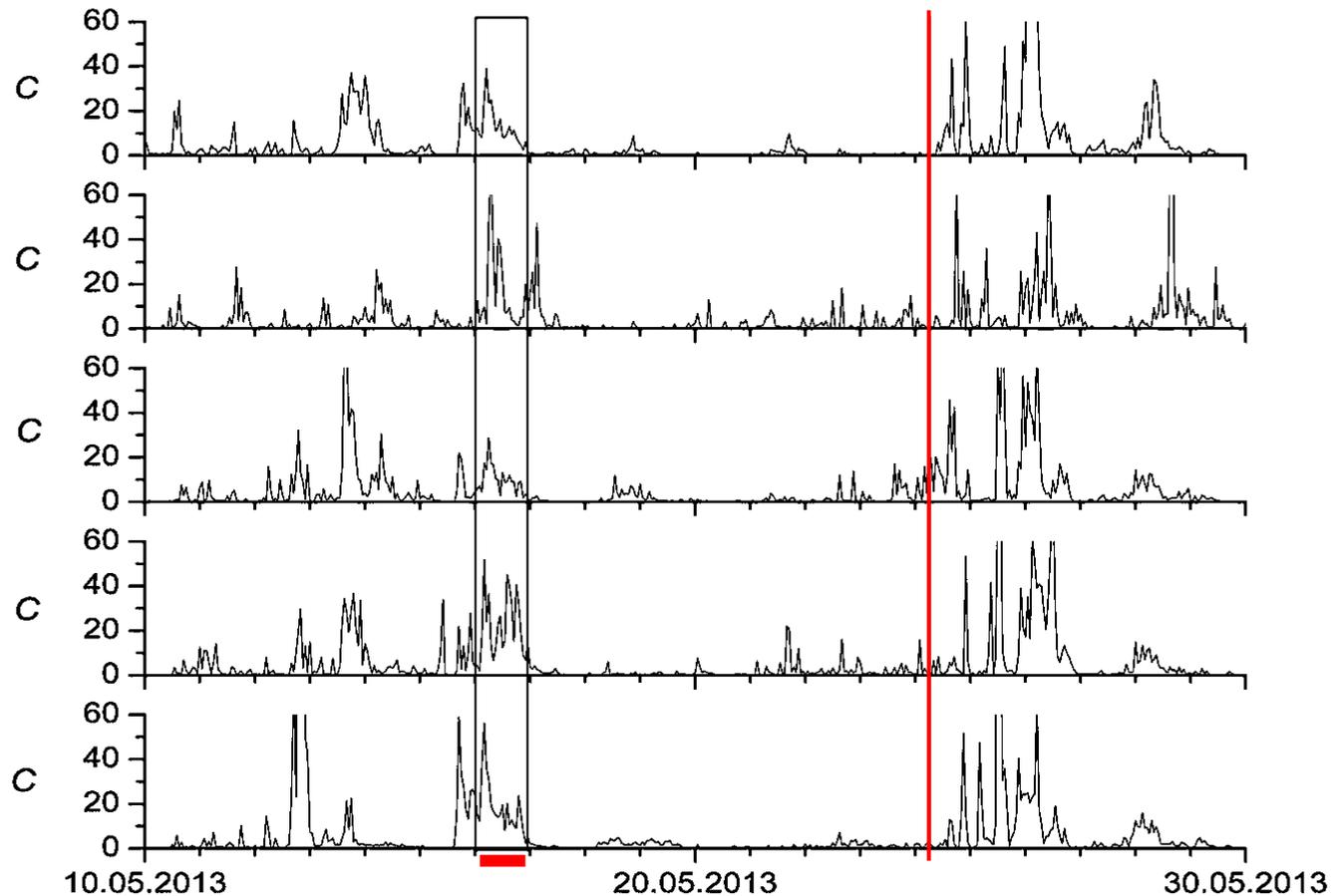


Сверху вниз: рассчитанные значения 5-ти рядов фактора нестационарности $C(t)$ для европейских NM: *ATHN*, *CALM*, *JUNG1*, *KIEL*, *ROME* в период 10–30 мая 2013 г. Значения C – усл. ед. Выделенная область 16 мая – **синхронный предиктор**. Вертикальная линия 24 мая – метка землетрясения.



Проявление солнечной активности (КВМ) 25 мая.

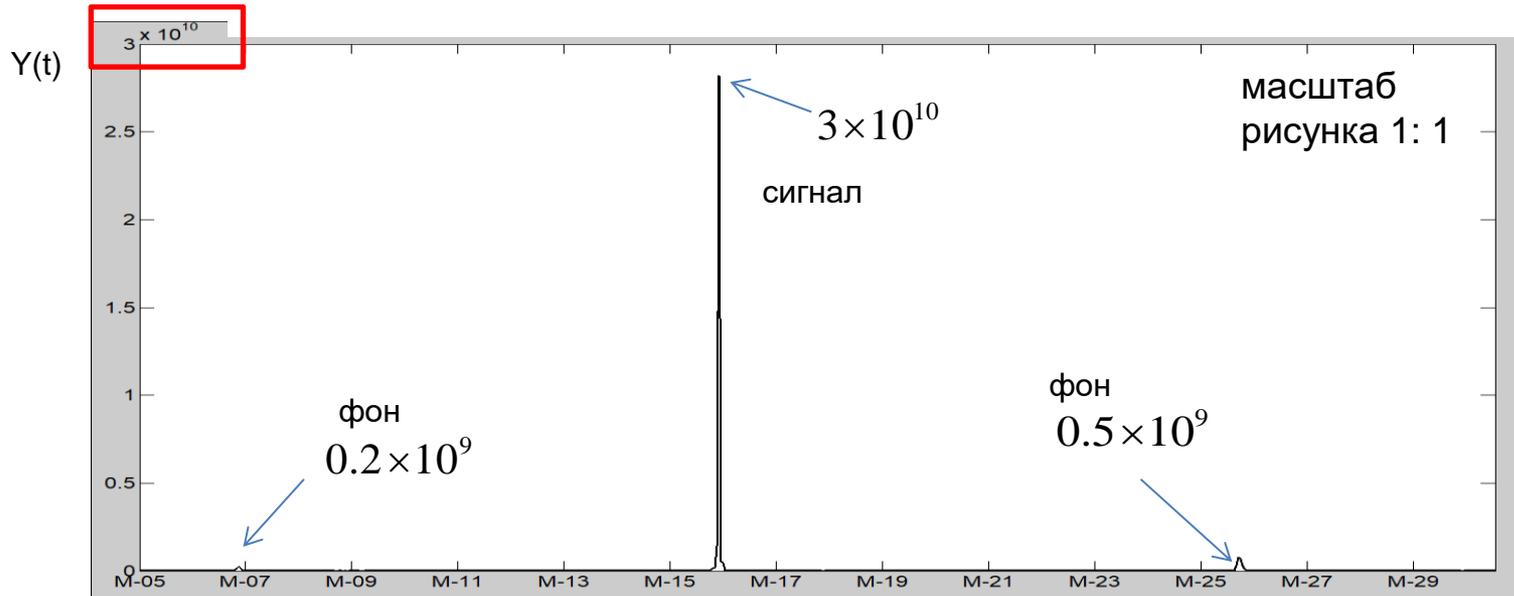
Анализ данных азиатских НМ (май 2013)



Панели сверху вниз: рассчитанные значения 5-ти рядов фактора нестационарности $C(t)$ для азиатских НМ: ААТВ, DJON, IRKT, ТХВУ, YKPK в период 10–30 мая 2013 г. Значения C – усл. ед. Выделенная область 16 мая – синхронный предиктор. Вертикальная линия 24 мая – метка землетрясения.

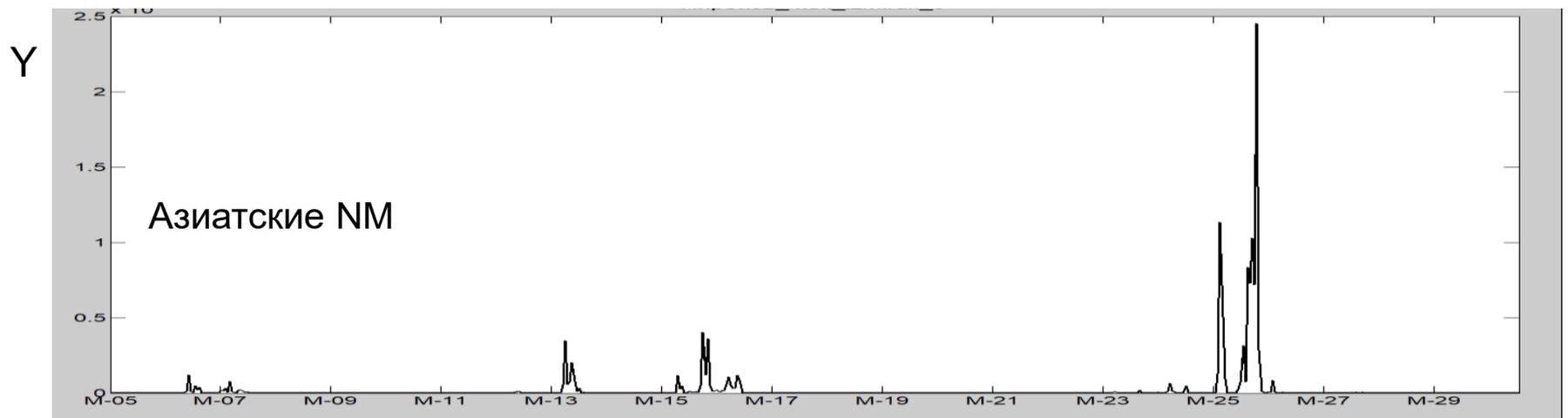
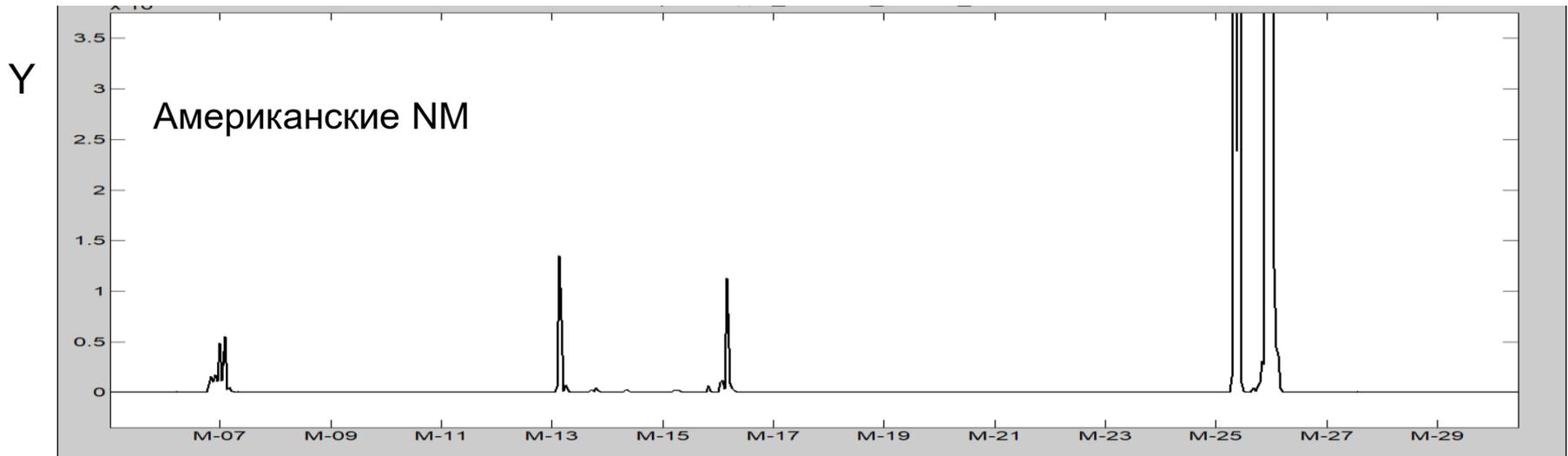
Синхронность срабатывания европейских НМ (май 2013)

Произведение $Y=C1(t)*C2(t)*C3(t)*C4(t)*C5(t)$



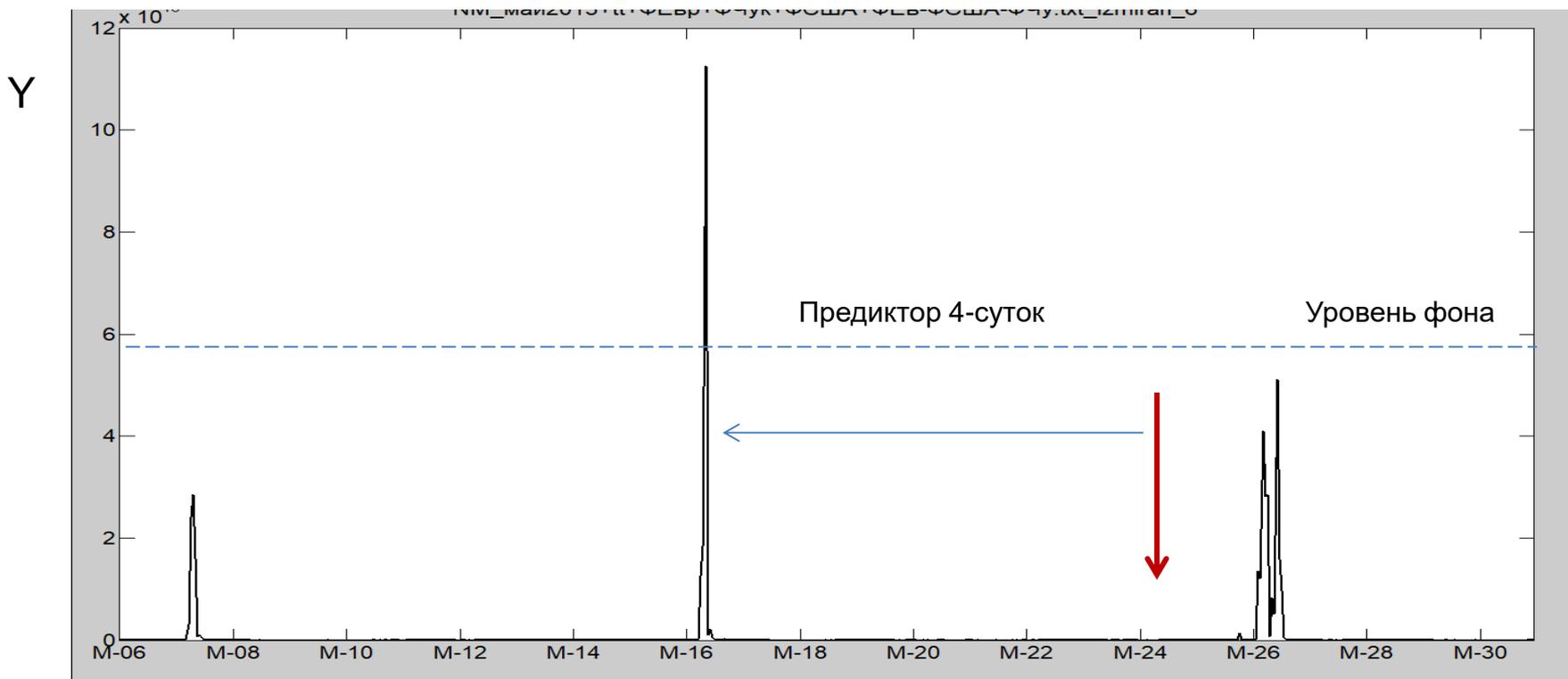
$$\frac{\text{сигнал}}{\text{фон}} \gg 10$$

Синхронность срабатывания двух групп NM (май 2013)



Результат почленного перемножения рядов $C(t)$ для рядов двух групп нейтронных мониторов. Произведение $Y=C1(t)*C2(t)*C3(t)*C4(t)*C5(t)$.

Синхронный отклик мировой сети NM при подготовке землетрясения 24 мая 2013 года M=8.3



Произведение $Y=Y1*Y2*Y3$ для всей сети NM, где:

произведение $Y1=C1(t)*C2(t)*C3(t)*C4(t)*C5(t)$ Европ. NM

произведение $Y2=C1(t)*C2(t)*C3(t)*C4(t)*C5(t)$ Америк. NM

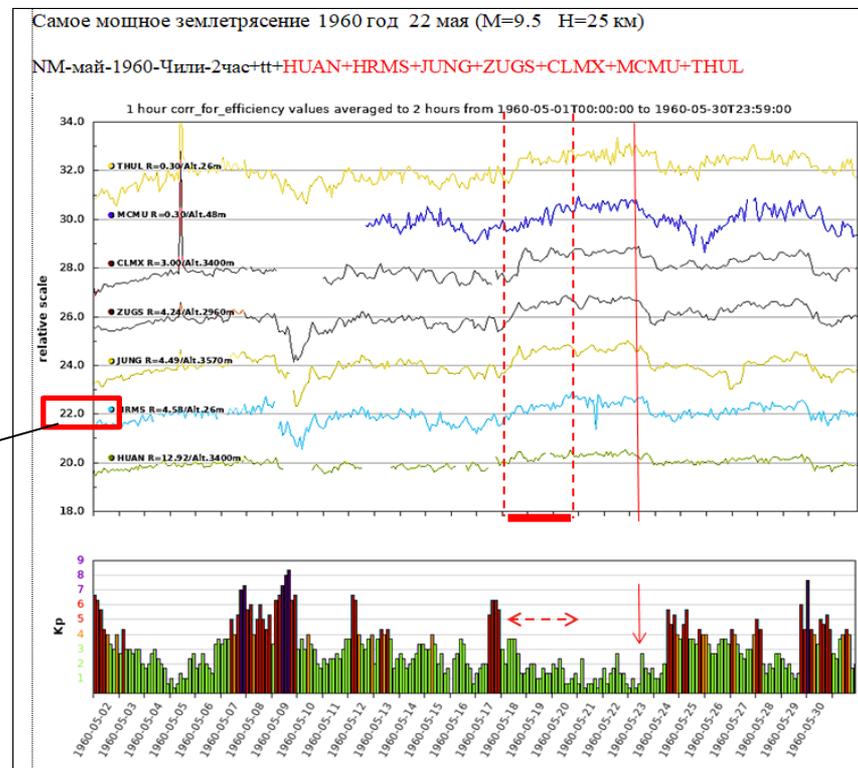
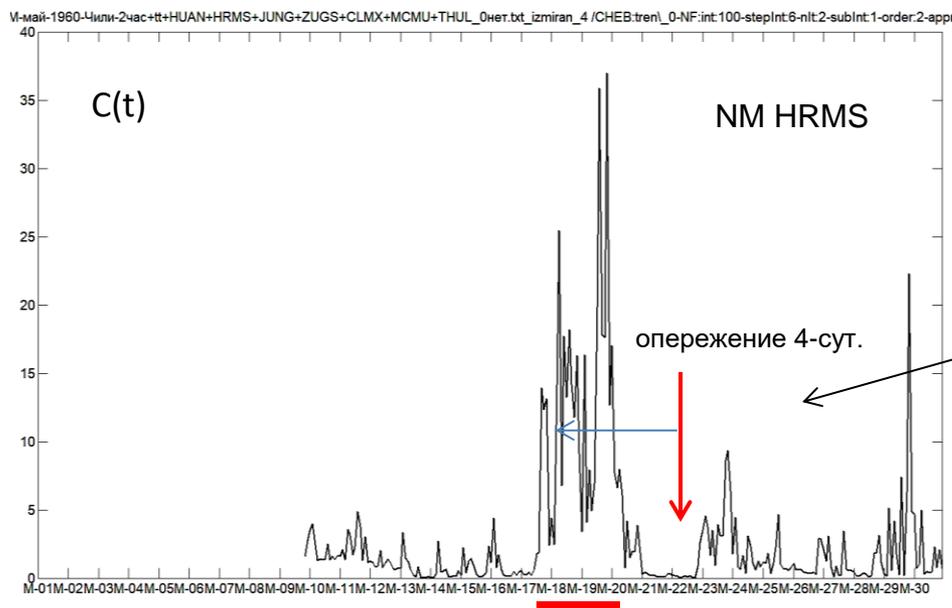
произведение $Y3=C1(t)*C2(t)*C3(t)*C4(t)*C5(t)$ Азиат. NM

События с магнитудой $M \approx 8$

| | Дата землетрясения | M, магнитуда | H, глубина км | Место землетрясения | Число NM | Опережение, сутки | Помеха, (возмущение МПЗ) |
|----|--------------------|--------------|---------------|---------------------|----------|-------------------|--------------------------|
| 1 | 22.05.1960 | 9.5 | 25 | Чили | 7* | 4 | +/- |
| 2 | 23.06.2001 | 8.4 | 33 | Перу | 10 | 9 | +/- |
| 3 | 28.03.2005 | 8.6 | 30 | Индонезия | 18* | 6 | +/- |
| 4 | 13.01.2007 | 8.2 | 30 | Курилы | 20* | 5 | нет |
| 5 | 27.02.2010 | 8.8 | 35 | Чили | 9 | 6 | нет |
| 6 | 11.04.2012 | 8.6 | 20 | Суматра | 20* | 9 | нет |
| 7 | 24.05.2013 | 8.3 | 598 | Охотск. море | 15 | 8 | нет |
| 8 | 16.09.2015 | 8.3 | 22 | Чили | 20* | 6 | +/- |
| 9 | 17.07.2017 | 7.7 | | Камчатка | 8 | 4 | +/- |
| 10 | 16.02.2018 | 7.2 | 22 | Мексика | 14 | 4 | нет |

Примечание: знак +/- означает, что предиктор может быть обусловлен возмущением магнитного поля Земли (МПЗ). Помеха «нет» – идентификация предиктора без фонового возмущения МПЗ. Знак * – часть NM не учтена из-за пропуска данных на временном участке предиктора.

Анализ данных NM (HRMS) для M=9.5 (1960 год)



| | Дата землетрясения | M, магнитуда | H, глубина км | Место землетрясения | Число NM | Опережение, сутки | Помеха, (возмущение МПЗ) |
|---|--------------------|--------------|---------------|---------------------|----------|-------------------|--------------------------|
| 1 | 22.05.1960 | 9.5 | 25 | Чили | 7* | 4 | +/- |

Анализ данных по «локальному» землетрясению (Байкал 11.01.2021)

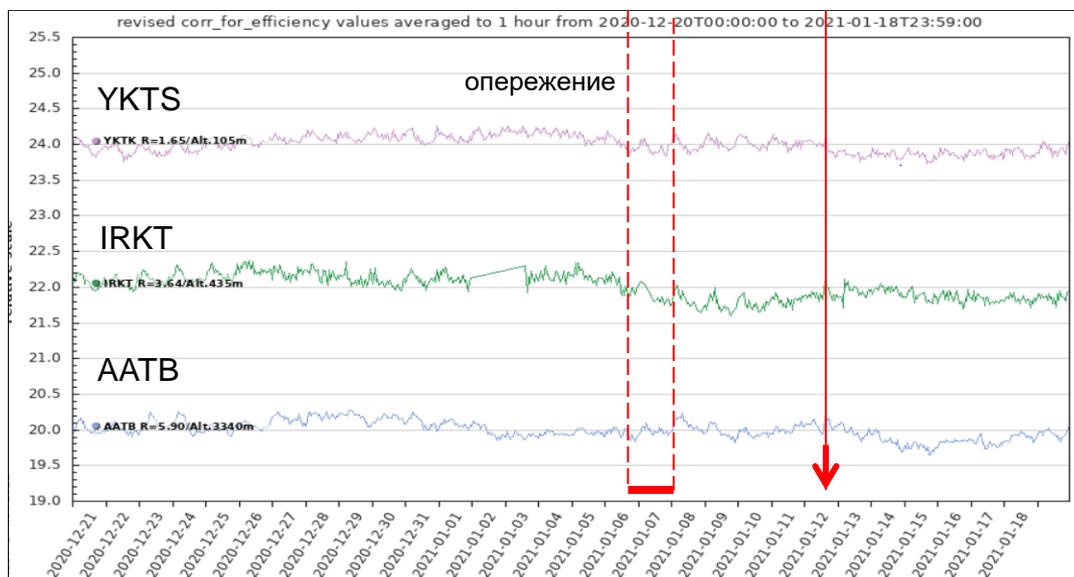
| | Дата землетрясения | М, магнитуда | Н, глубина км | Место землетрясения | Число НМ | Опережение, сутки | Помеха, (возмущение МПЗ) |
|---|---------------------------|-----------------|---------------|----------------------------|----------|-------------------|--------------------------|
| 1 | 11.01.2021 (21:32 UTC) | 6.7 (K=15.3) | 10 | оз. Хубсугул (Монголия) | 3 | 5 | нет |

NM: IRKT-YKTS-AATB

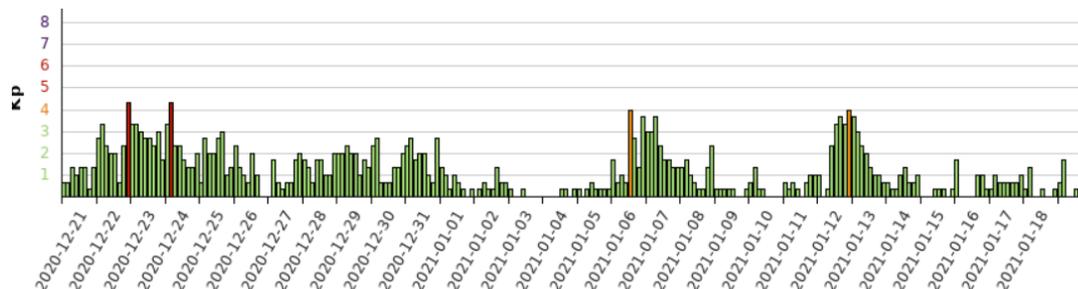
Иркутск-Якутск: 1860 км

Иркутск-Алмата: 2260 км

образуют треугольник.

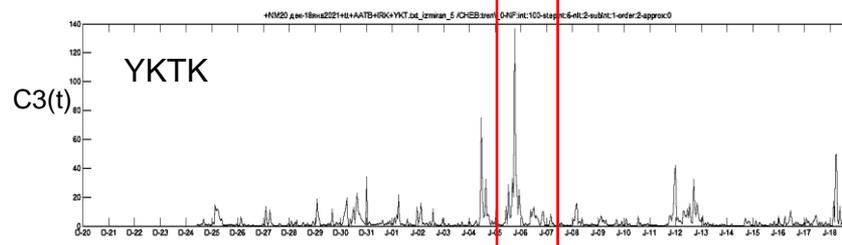
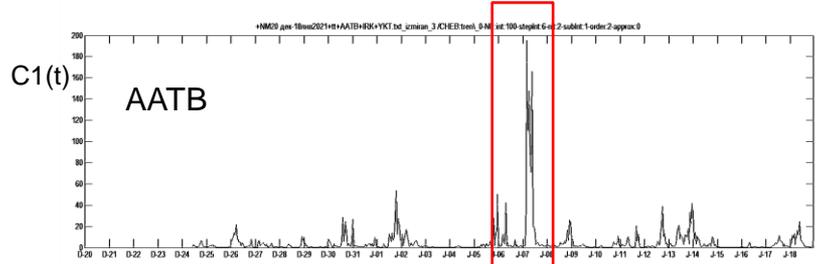
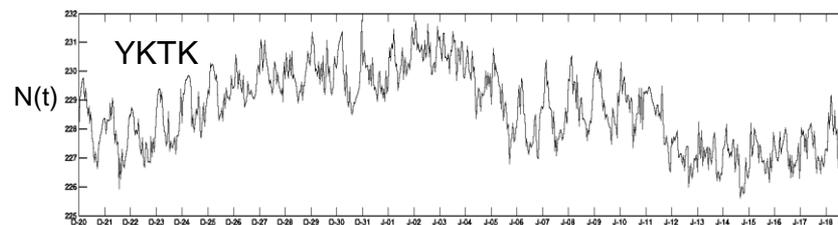
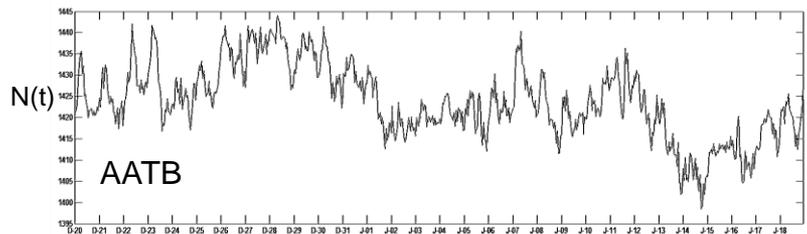


Временные ряды с 21.12.2020 по 18.01.2021

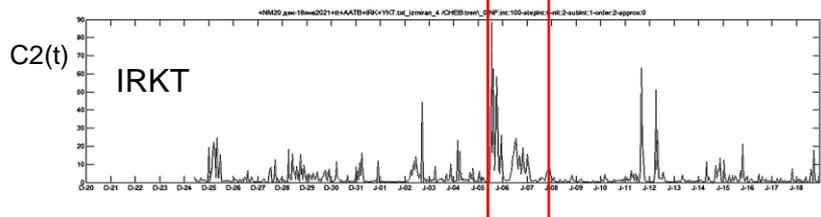
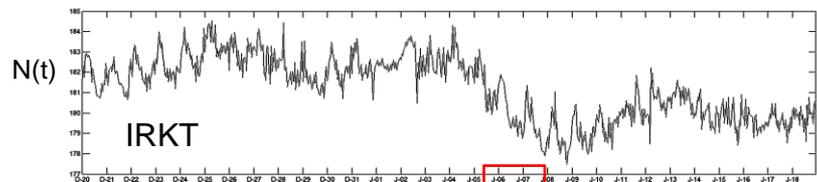


Геомагнитное возмущение близко к фону.

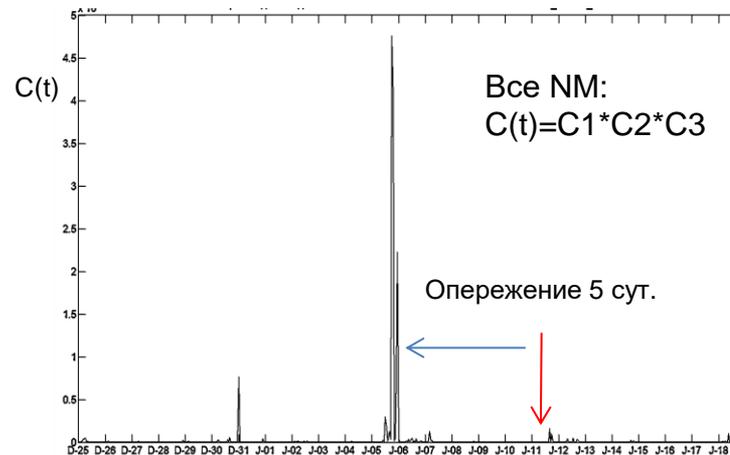
Данные по фактору нестационарности для NM (11.01.2021)



Временные ряды с 21.12.2020 по 18.01.2021



Временные ряды с 21.12.2020 по 18.01.2021



Временной ряд с 25.12.2020 по 18.01.2021

Заключение

1. Методика фликкер-шумовой спектроскопии пригодна для извлечения информации, скрытой в статистических флуктуациях временных рядов.
2. Обобщенный «фактор нестационарности» временного ряда является идентификатором скрытых сигналов, связанных с формированием мощных землетрясений. Эти сигналы проявляются как кратковременные предикторы в вариациях космических лучей за 4 – 8 суток до землетрясений с $M > (6 - 8)$.
3. Впервые использованы данные мировой сети наземных нейтронных мониторов, как пространственного детектора, чувствительного к мощным литосферным геофизическим процессам.
4. Предложенная методика может быть эффективной для обнаружения скрытых возмущений во многих физических процессах разной природы.

Спасибо
За
внимание