



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.

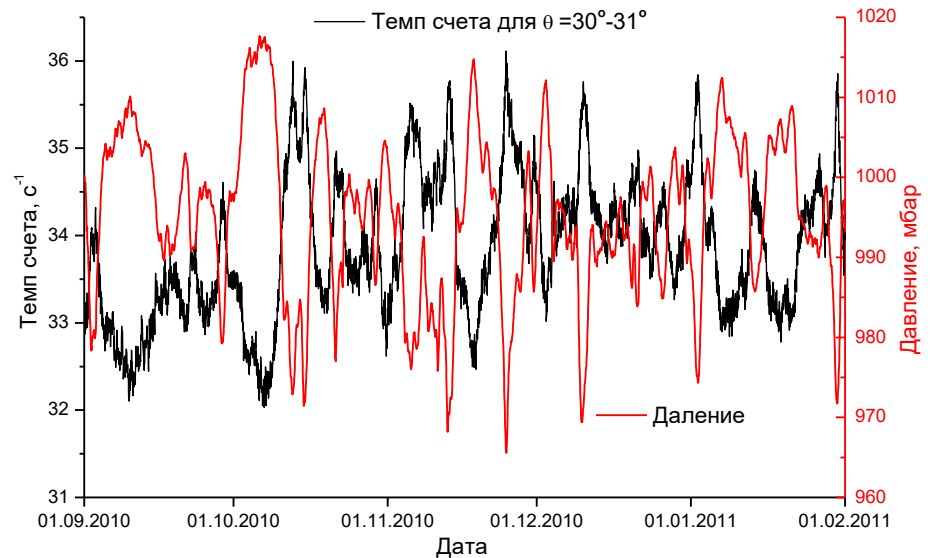
Метеоэффекты в потоке КЛ

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.

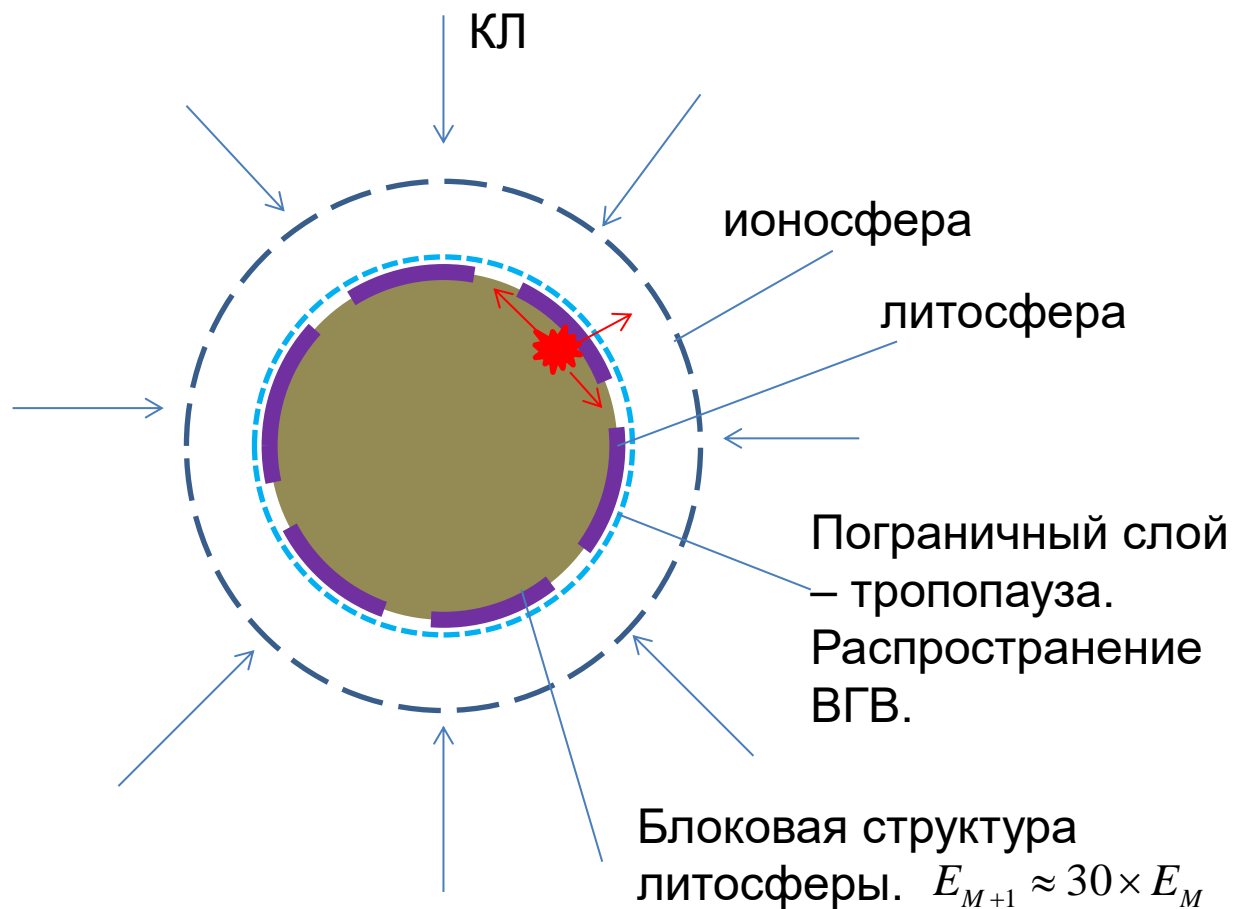
Величина эффекта небольшая:

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

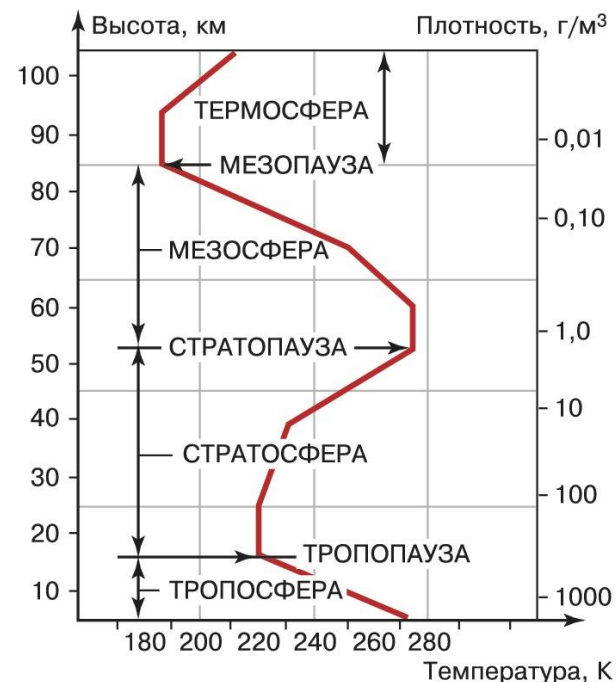
- Мировая сеть наземных нейтронных мониторов (NM) представляет собой распределенный детектор, работающий в непрерывном режиме и способный дистанционно реагировать на барометрические эффекты волновых процессов ВГВ, связанных с подготовкой землетрясений.
- Излучаемая в атмосферу энергия вызывает генерацию 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

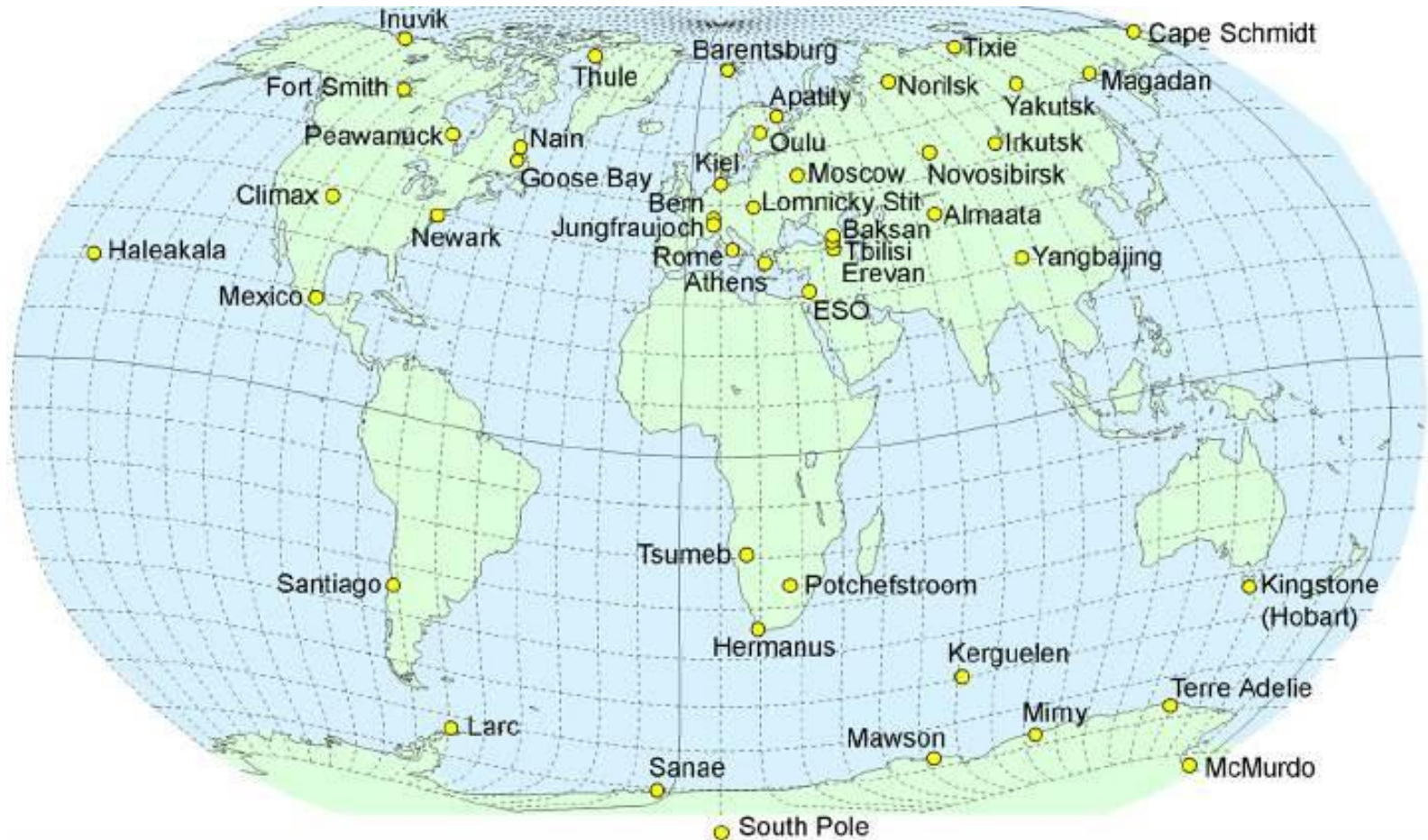
- КЛ – заряженные частицы (протоны).
- Кинетическая энергия > 1000 МэВ;
- Достигают поверхности Земли



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.

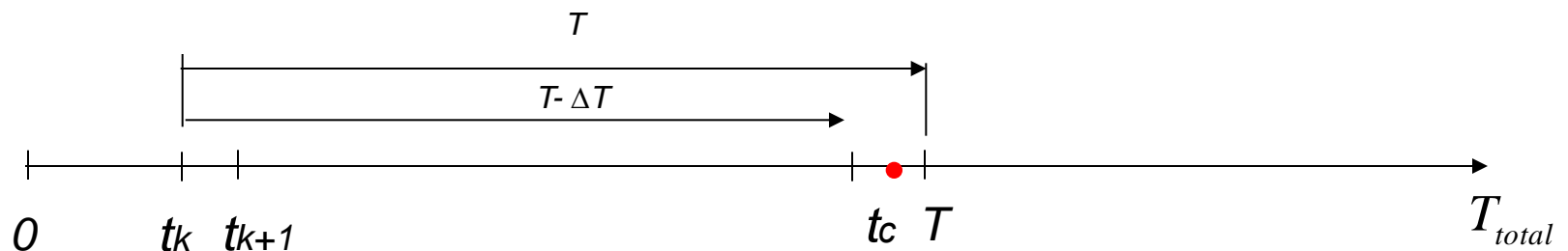
$N(t)$ – измеряемая величина временного ряда (интенсивность).

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

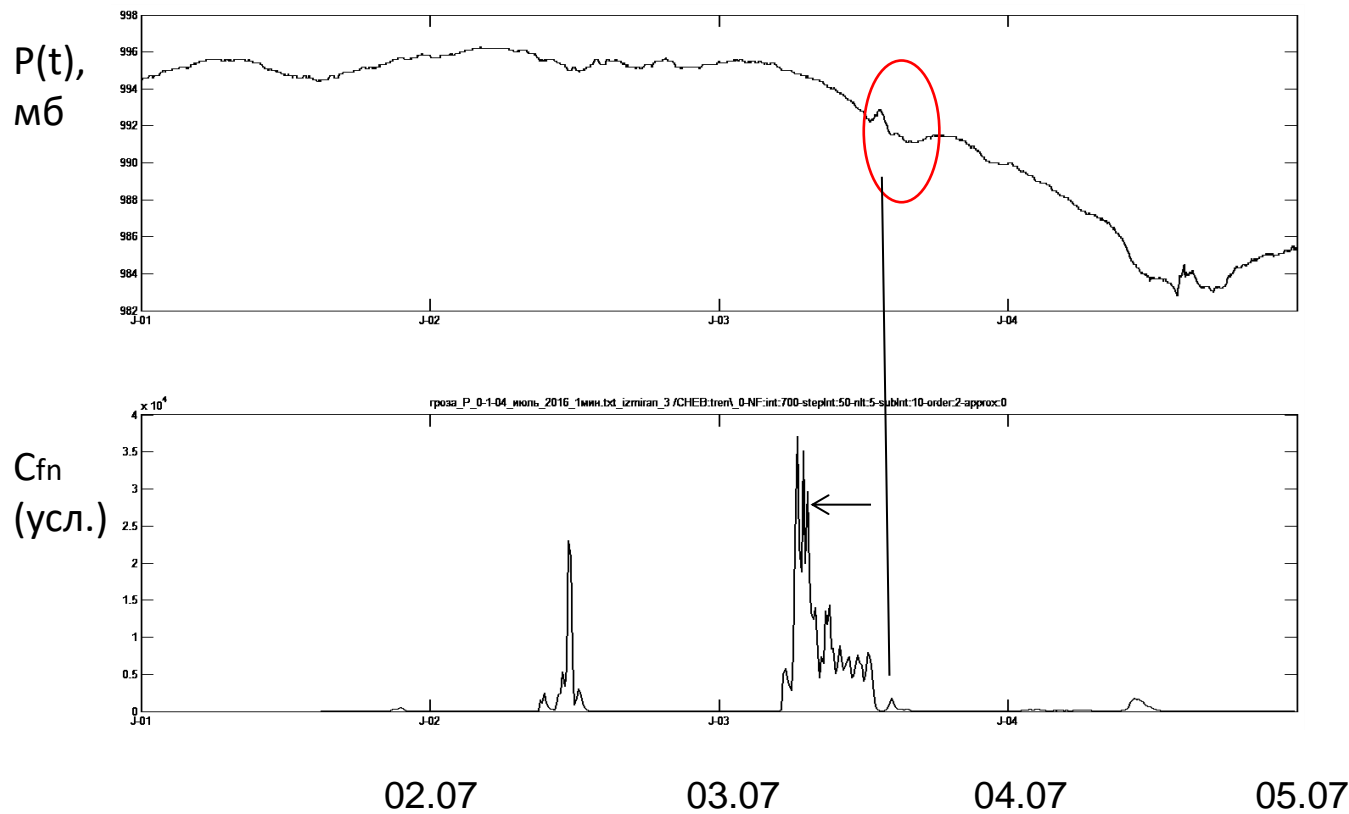
$C_k(t_k)$ - **удельный фактор нестационарности временного ряда.**

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

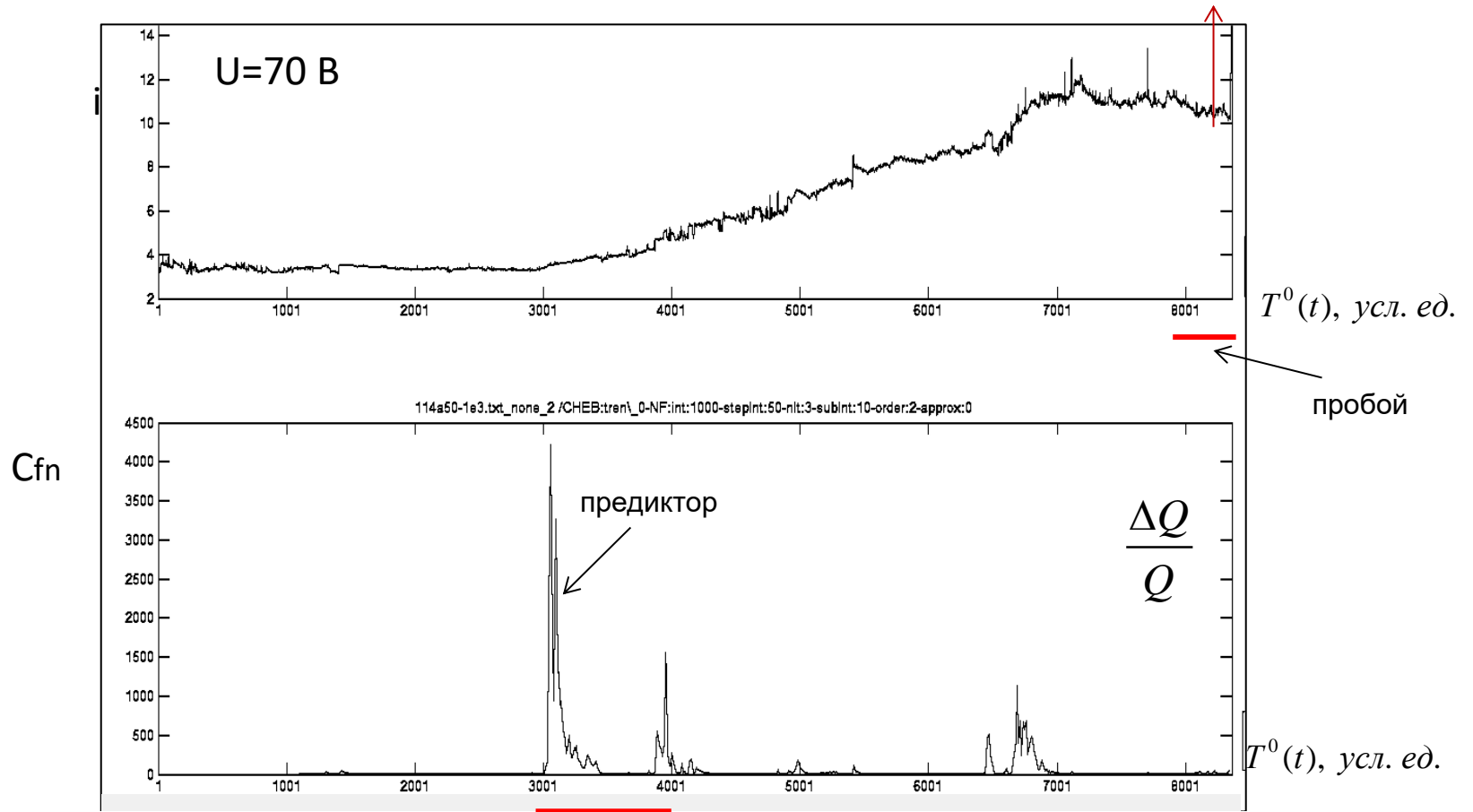


Давление:
Троицк, Моск.Обл.
с 01 по 04 июля
2016 г.

<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 $C(t)$ 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);

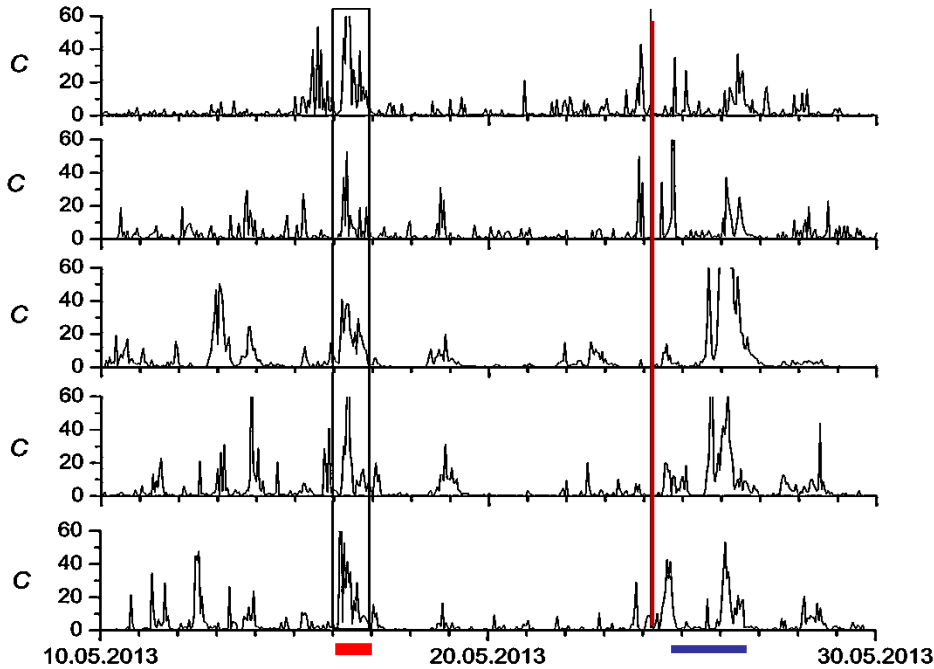
Синхронный совместный предиктор (от всех НМ) составил около 8 суток.

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

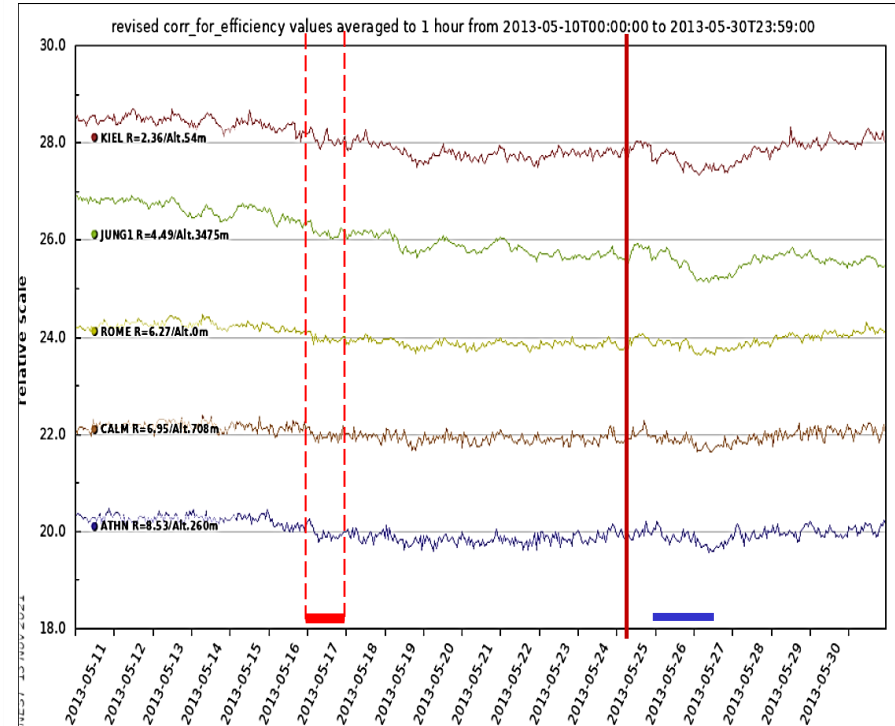
<https://www.emsc-csem.org/Earthquake/?filter=yes>

Анализ данных европейских NM (май 2013)

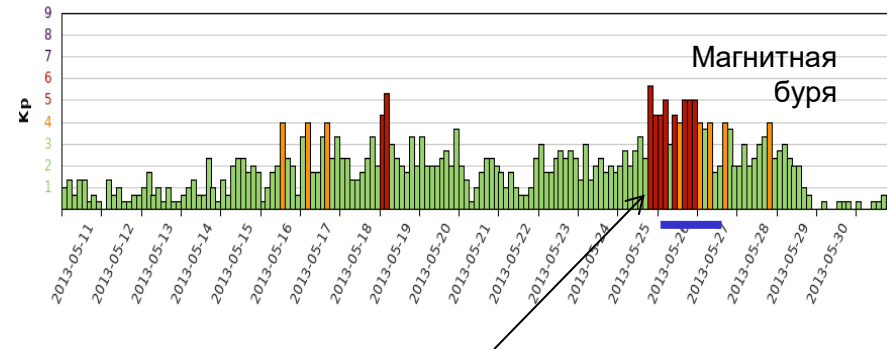
Ряды фактора нестационарности $C(t)$ для NM



Данные нейтронных мониторов

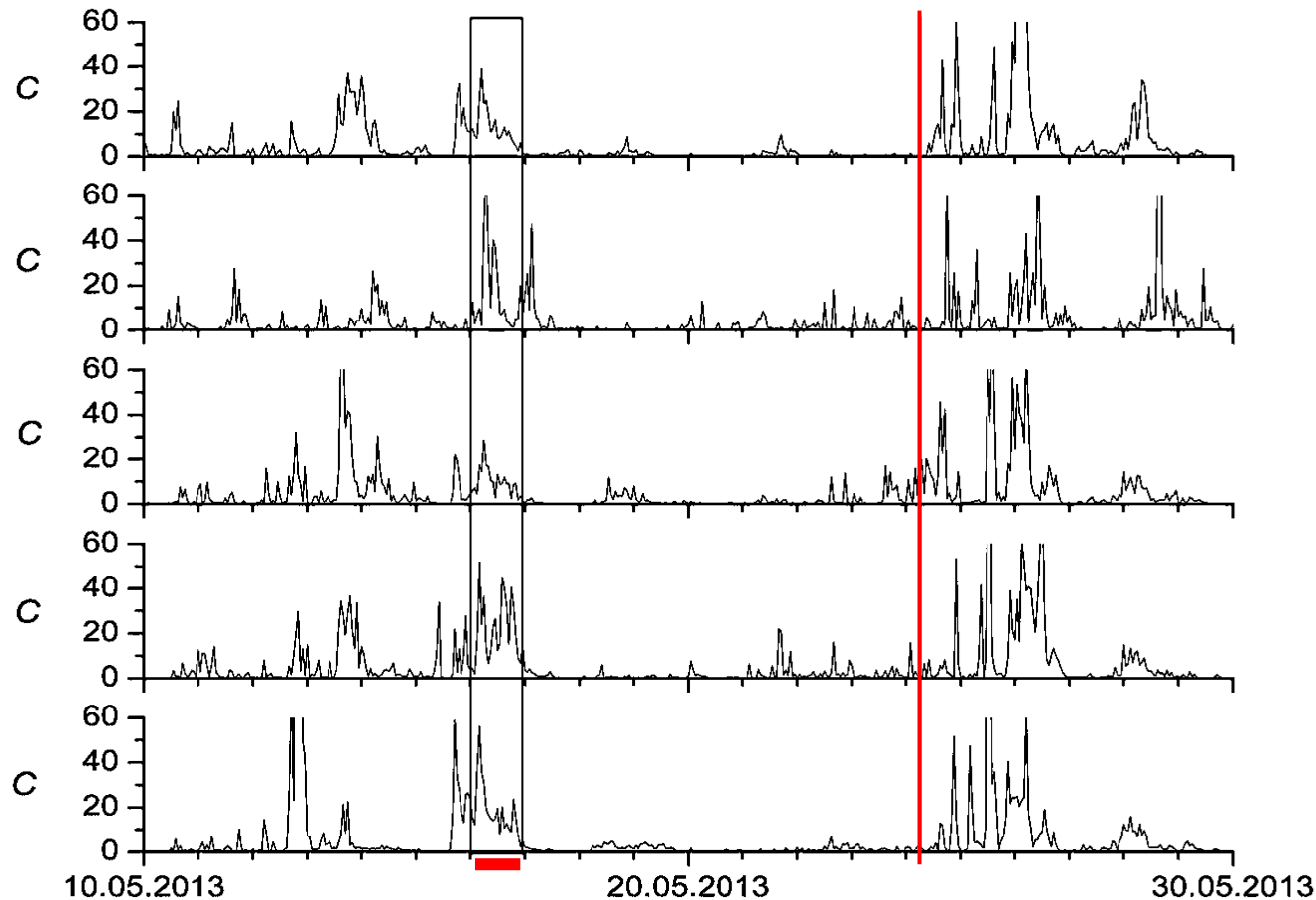


Сверху вниз: рассчитанные значения 5-ти рядов фактора нестационарности $C(t)$ для европейских NM: *ATHN*, *CALM*, *JUNG1*, *KIEL*, *ROME* в период 10–30 мая 2013 г. Значения C – усл. ед. Выделенная область 16 мая – **синхронный предиктор**. Вертикальная линия 24 мая – метка землетрясения.



Проявление солнечной активности (КВМ) 25 мая.

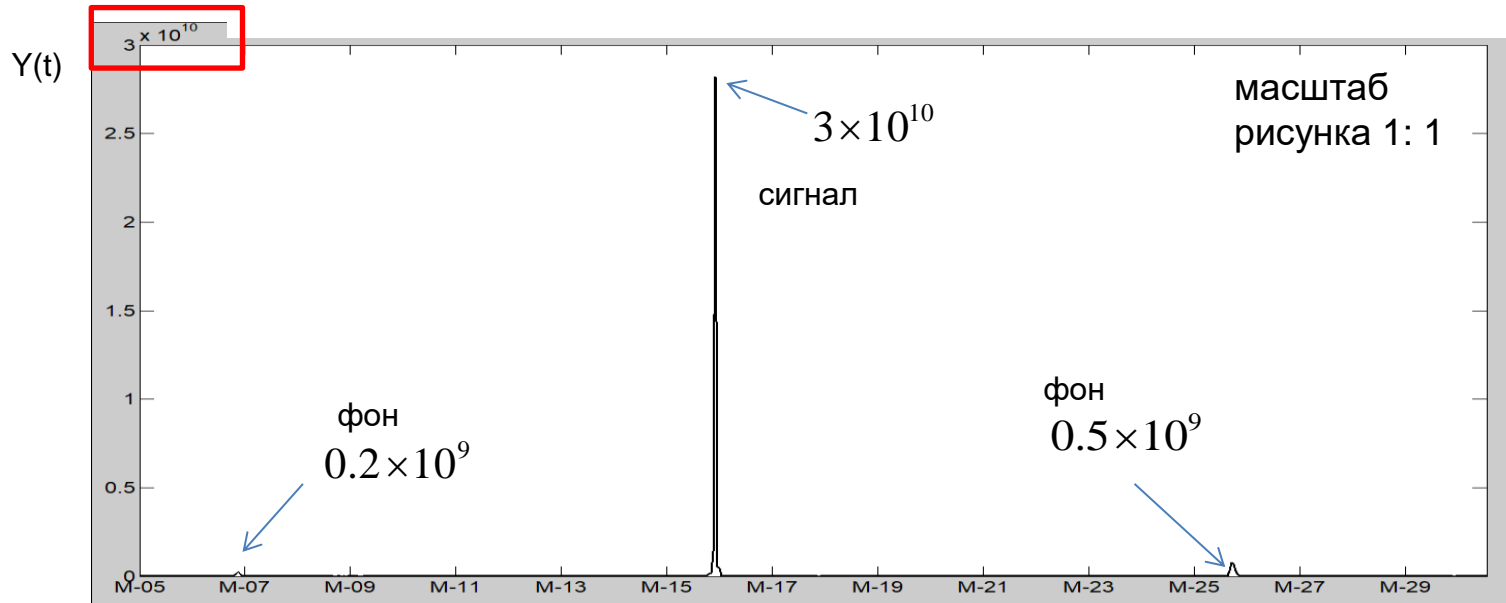
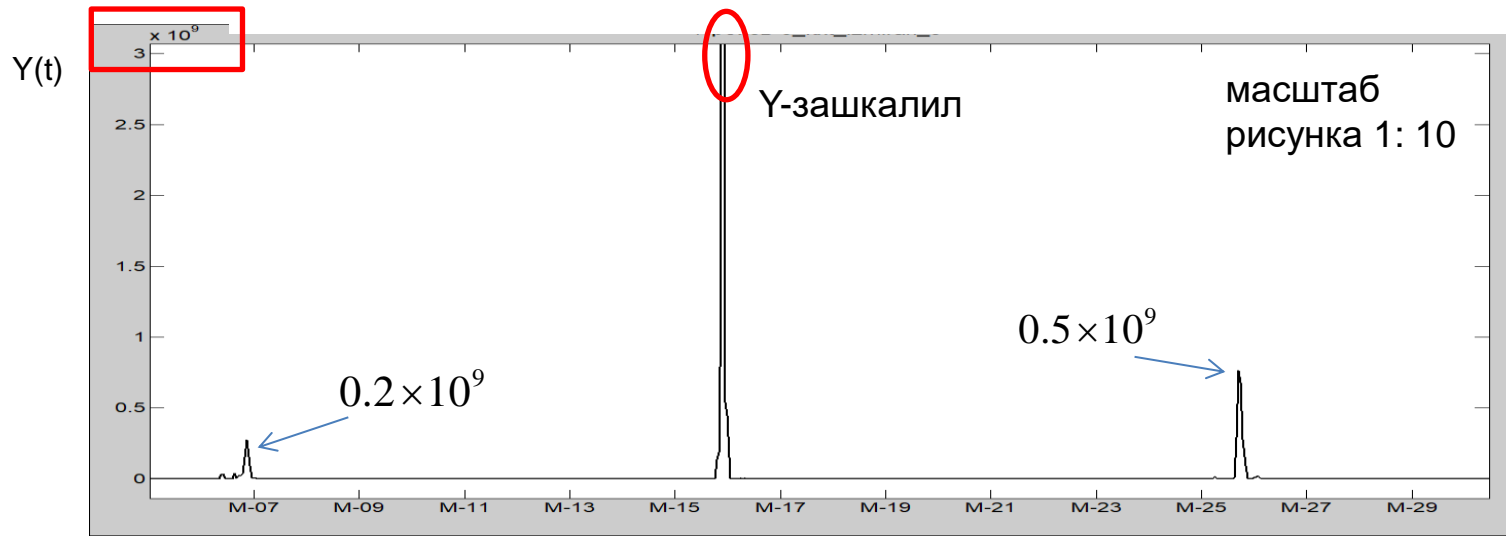
Анализ данных азиатских НМ (май 2013)



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.

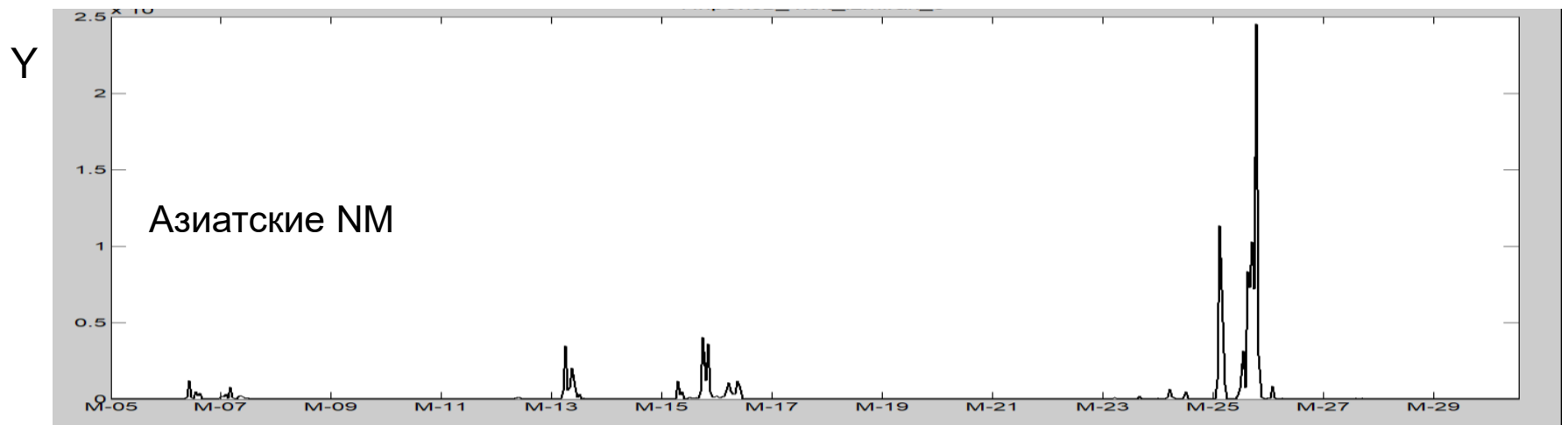
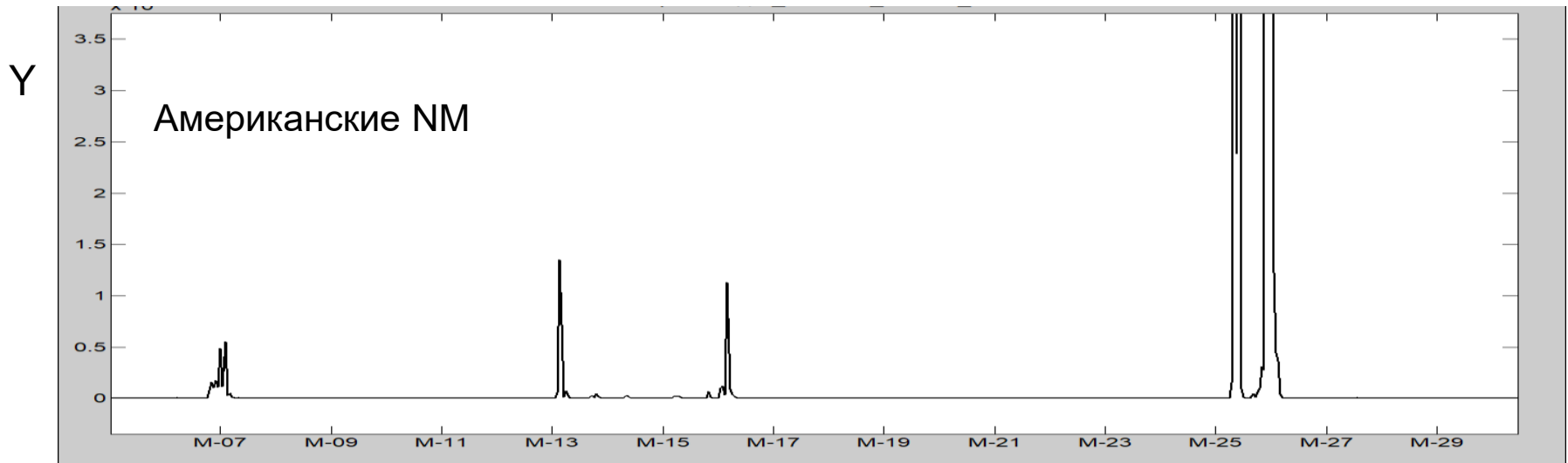
Синхронность срабатывания европейских НМ (май 2013)

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



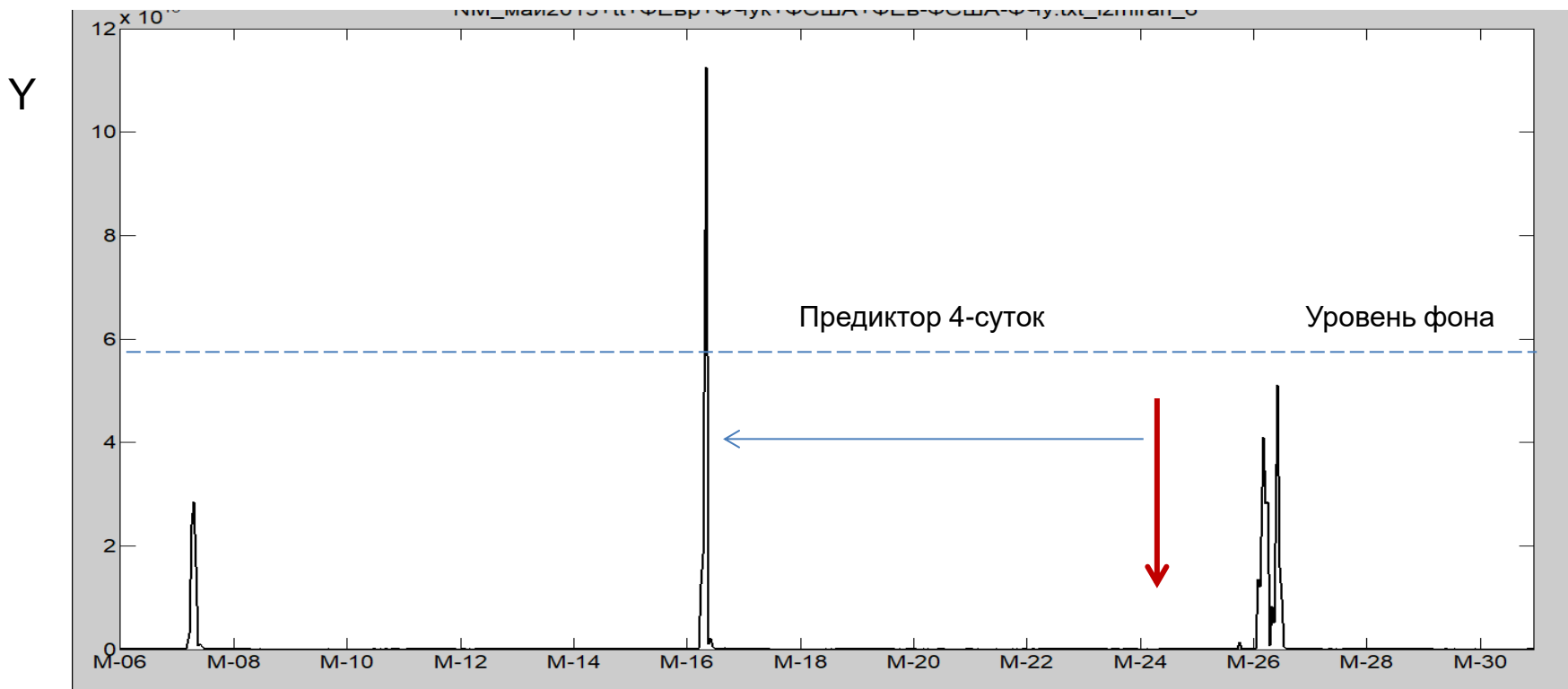
$$\frac{\text{сигнал}}{\text{фон}} \gg 10$$

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

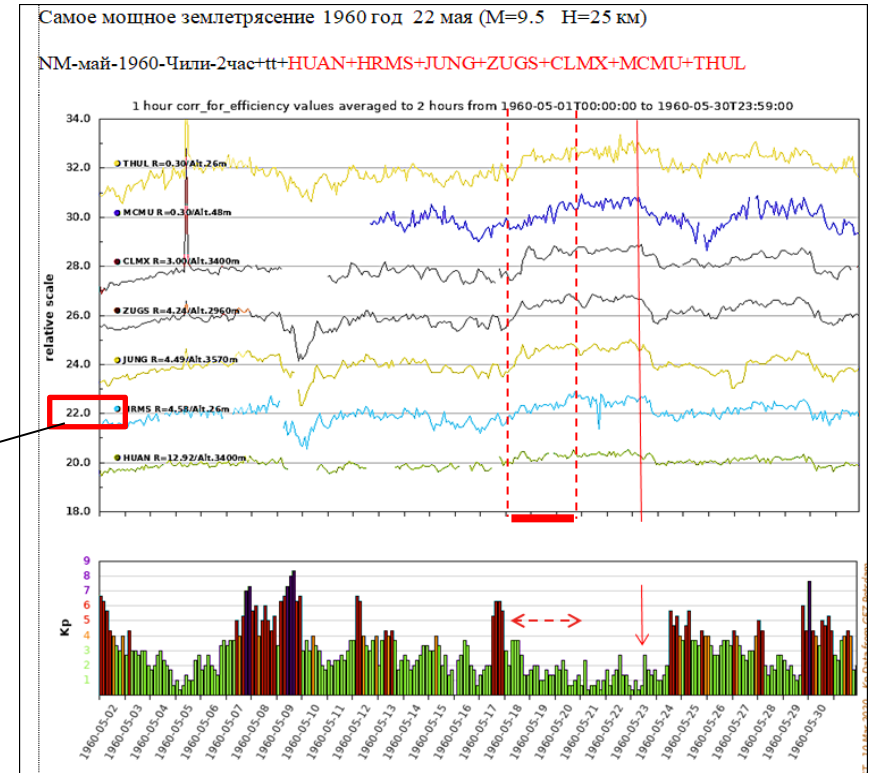
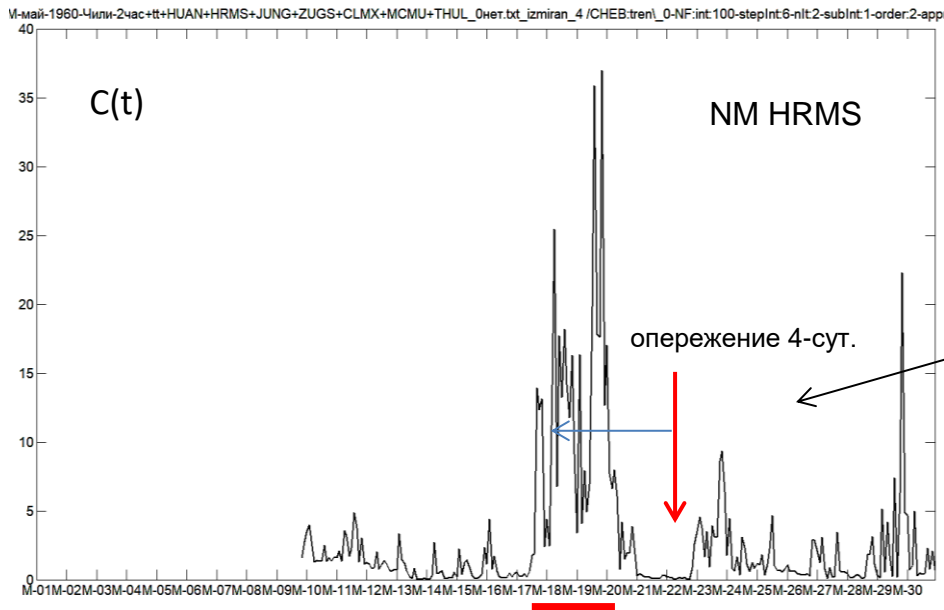
произведение $Y3=C1(t)*C2(t)*C3(t)*C4(t)*C5(t)$ Азиат. NM

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)

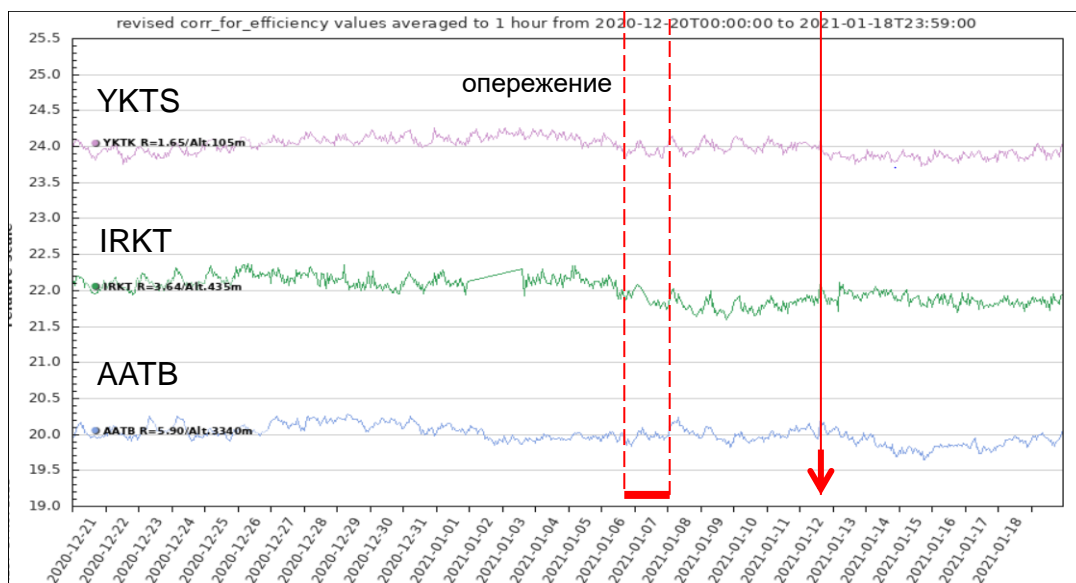
	Дата землетрясения	М, магнитуда	Н, глубина км	Место землетрясения	Число НМ	Опережение, сутки	Помеха, (возмущение МПЗ)
1	11.01.2021 (21:32 UTC)	6.7 (K=15.3)	10	оз. Хубсугул (Монголия)	3	5	нет

NM: IRKT-YKTS-AATB

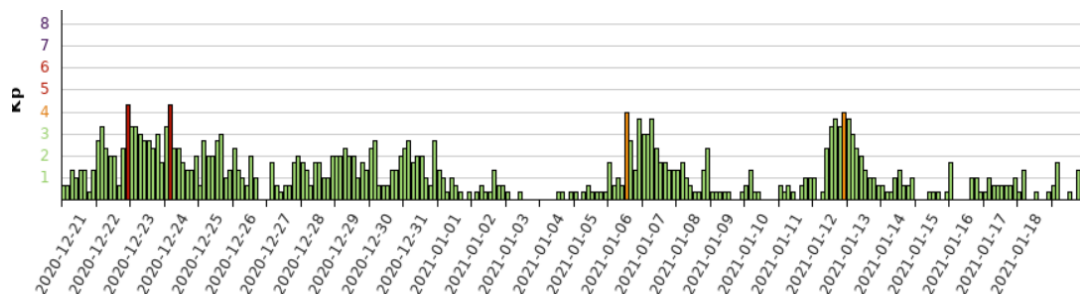
Иркутск-Якутск: 1860 км

Иркутск-Алмата: 2260 км

образуют треугольник.

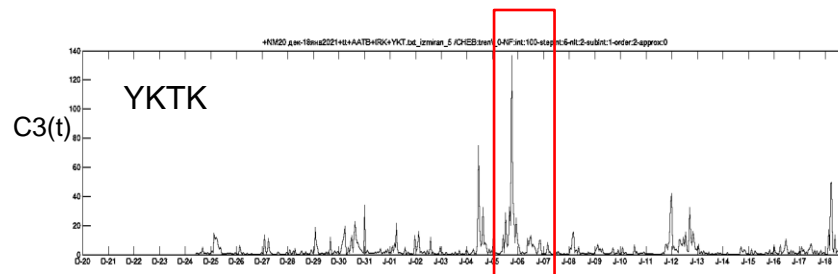
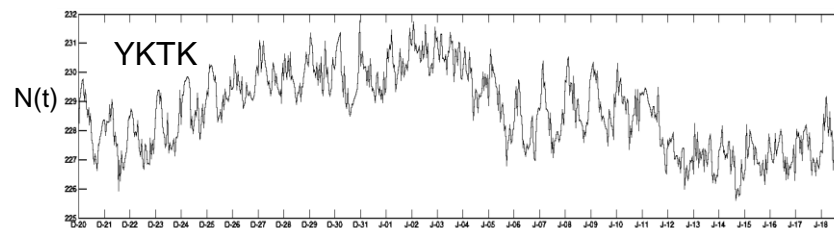
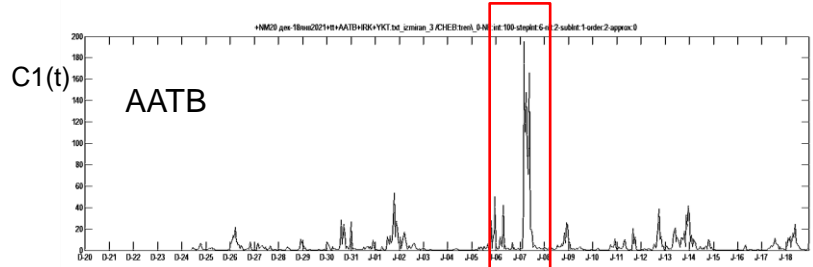
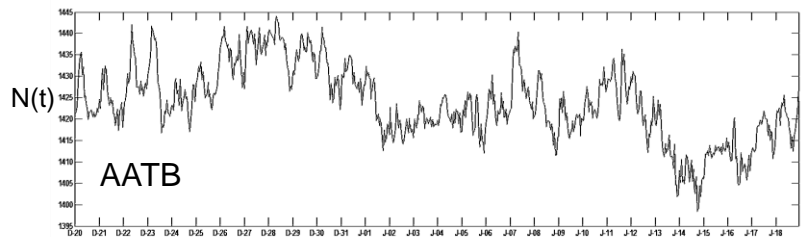


Временные ряды с 21.12.2020 по 18.01.2021

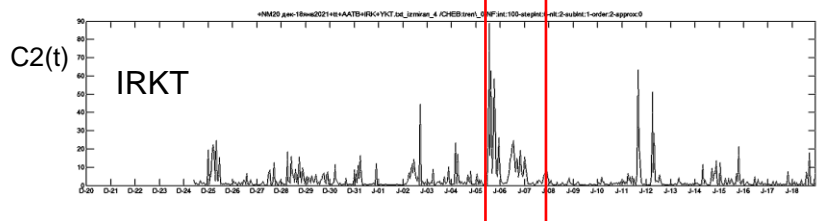
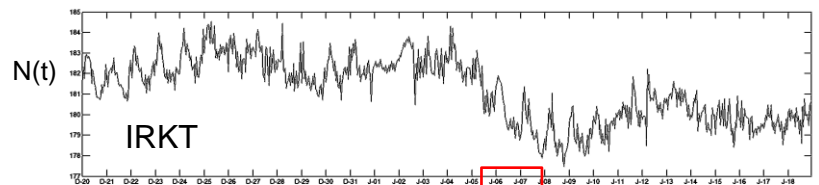


Геомагнитное возмущение близко к фону.

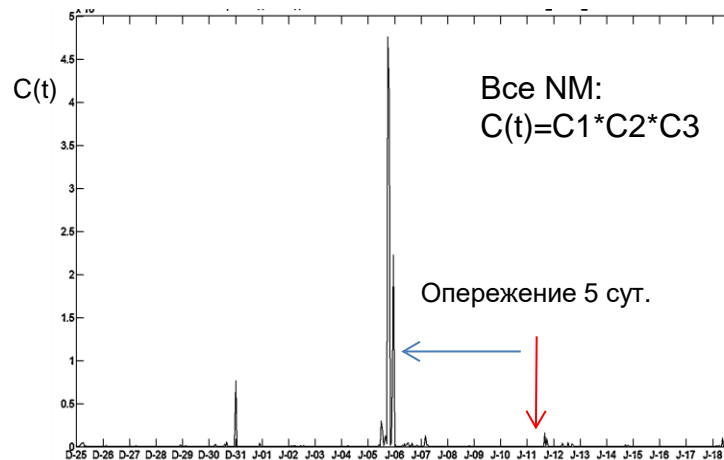
Данные по фактору нестационарности для NM (11.01.2021)



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