

Эффекты синхронизации собственного шума Земли

А.А. Любушин

e-mail: lyubushin@yandex.ru

<http://AlexeyLyubushin.narod.ru/Index.htm>

Доклад на Ученом Совете ИФЗ РАН 10 октября 2018 г.

Собственный шум Земли – это не только широко известные **собственные колебания**, которые представляют собой дискретный набор монохроматических гармоник, обычно возбуждающихся после сильных землетрясений.

В данном сообщении под собственным шумом понимается **широкополосный сигнал**, имеющий **ярко выраженный случайный характер** и заполняющий частотную полосу от сотых долей герца до периодов несколько лет.

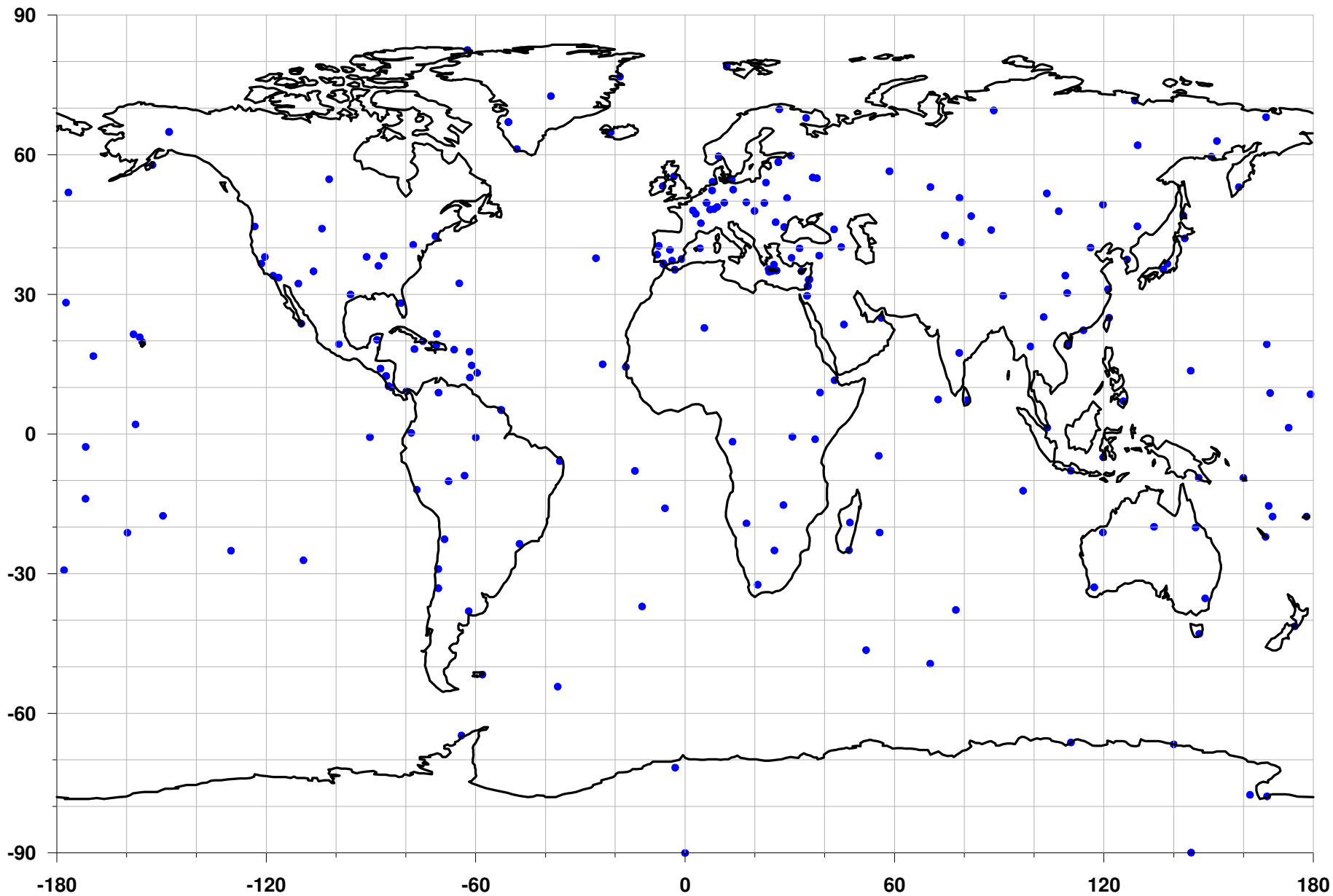
Источником собственного шума является «внутренняя жизнь» планеты, рассматриваемой как **сложная многокомпонентная система** с множеством нелинейных и во многом неизвестных связей.

Особенно это относится к верхней оболочке Земли – **литосфере**, взаимодействующей с жидкими оболочками – **атмосферой и океаном** и нагруженной индустриальной деятельностью человека.

Оказалось, что анализ данных современных систем геофизического мониторинга, доступных с 1997 года, выявил ряд эффектов, которые можно интерпретировать как появление коллективной, **синхронной составляющей в хаотических временных рядах** собственного шума Земли.

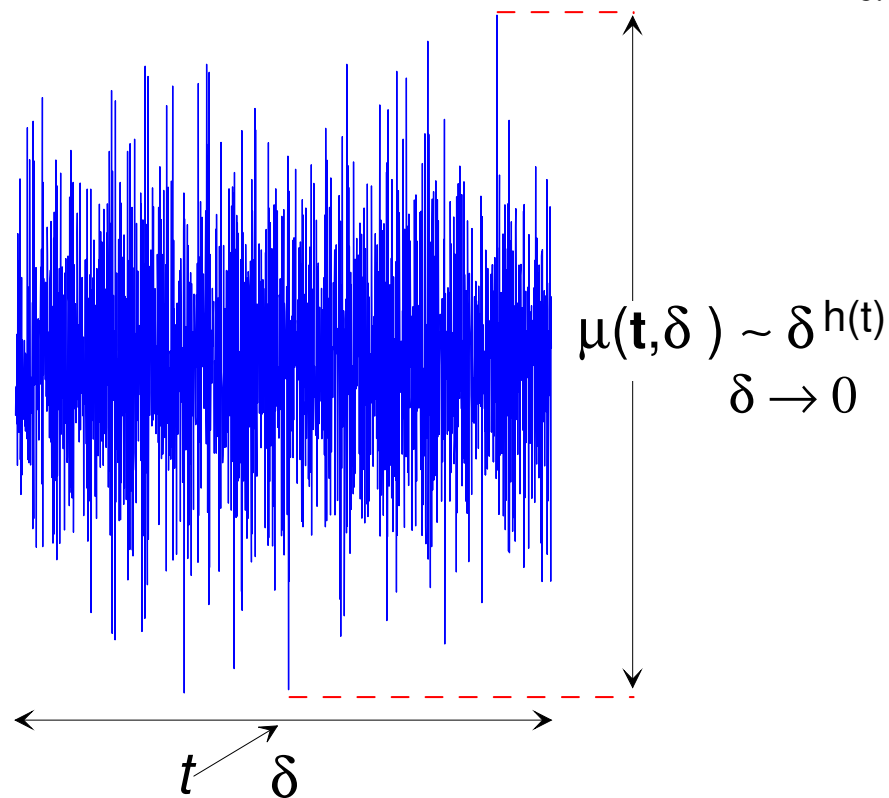
Часть из выявленных эффектов синхронизации может быть интерпретирована как **предвестники и тренды возникновения сильнейших сейсмических событий**.

Положения 229 широкополосных сейсмических станций глобальной сети

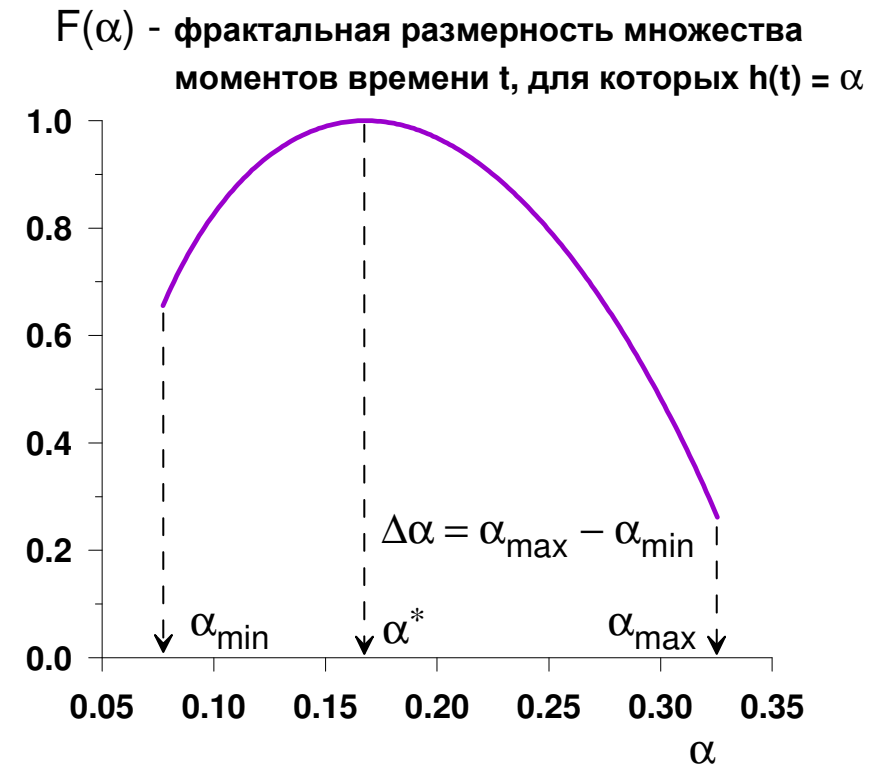


Мульти-фрактальный спектр сингулярности

Мера изменчивости случайного сигнала на интервале времени $[t - \delta/2, t + \delta/2]$



Мультифрактальный спектр сингулярности $F(\alpha)$ и его параметры: $\Delta\alpha$ - ширина носителя и α^* - обобщенный показатель Херста.



Минимальная нормализованная энтропия :

$$En = -\sum_{k=1}^N p_k \cdot \log(p_k) / \log(N) \rightarrow \min$$

$$0 \leq En \leq 1, \quad p_k = c_k^2 / \sum_{j=1}^N c_j^2,$$

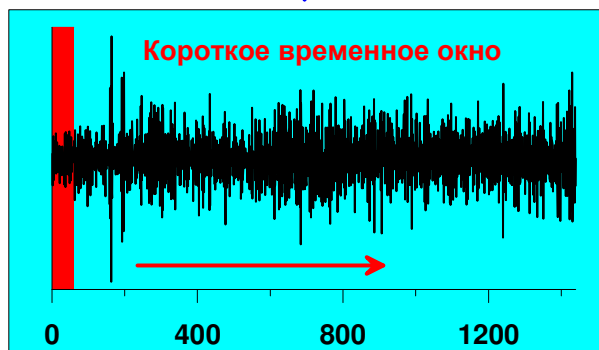
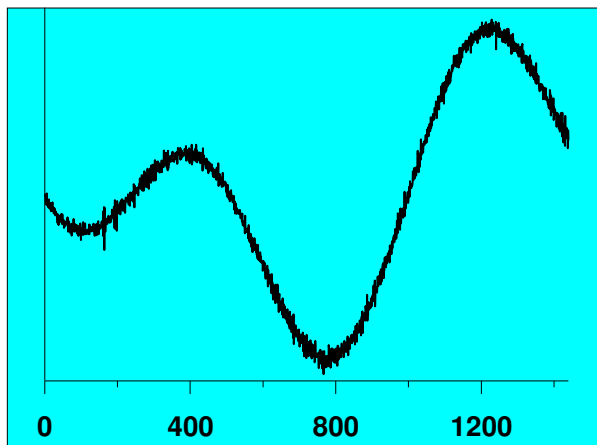
c_j - ортогональные вейвлет-коэффициенты.

Минимум берется по вейвлетам Добеши с числом обнуляемых моментов от 1 до 10.

Индекс гладкости (smoothness index – S) – число обнуляемых моментов у оптимального ортогонального вейвлета.

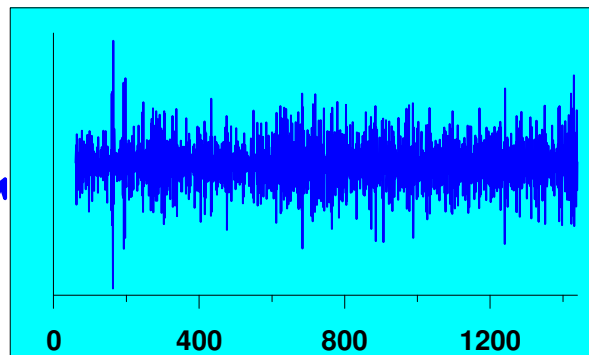
Индекс линейной предсказуемости

Исходные суточные
волновые формы $\Delta t = 1$ минута



Приращения суточных
волновых форм, $\Delta t = 1$ минута

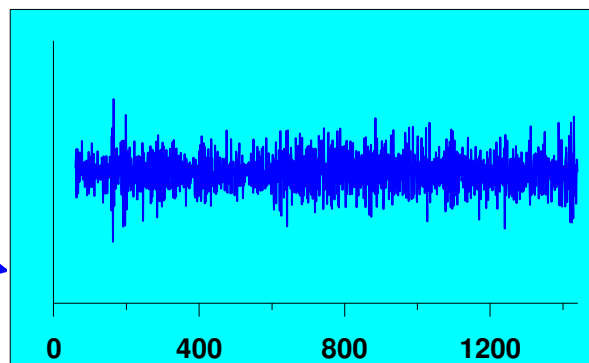
$$cPred = \text{VarErr(Trivial)} / \text{VarErr(AR(2))} - 1$$



VarErr(Trivial)

Ошибка тривиального прогноза
на 1 шаг вперед на основе среднего
по предыдущему короткому окну

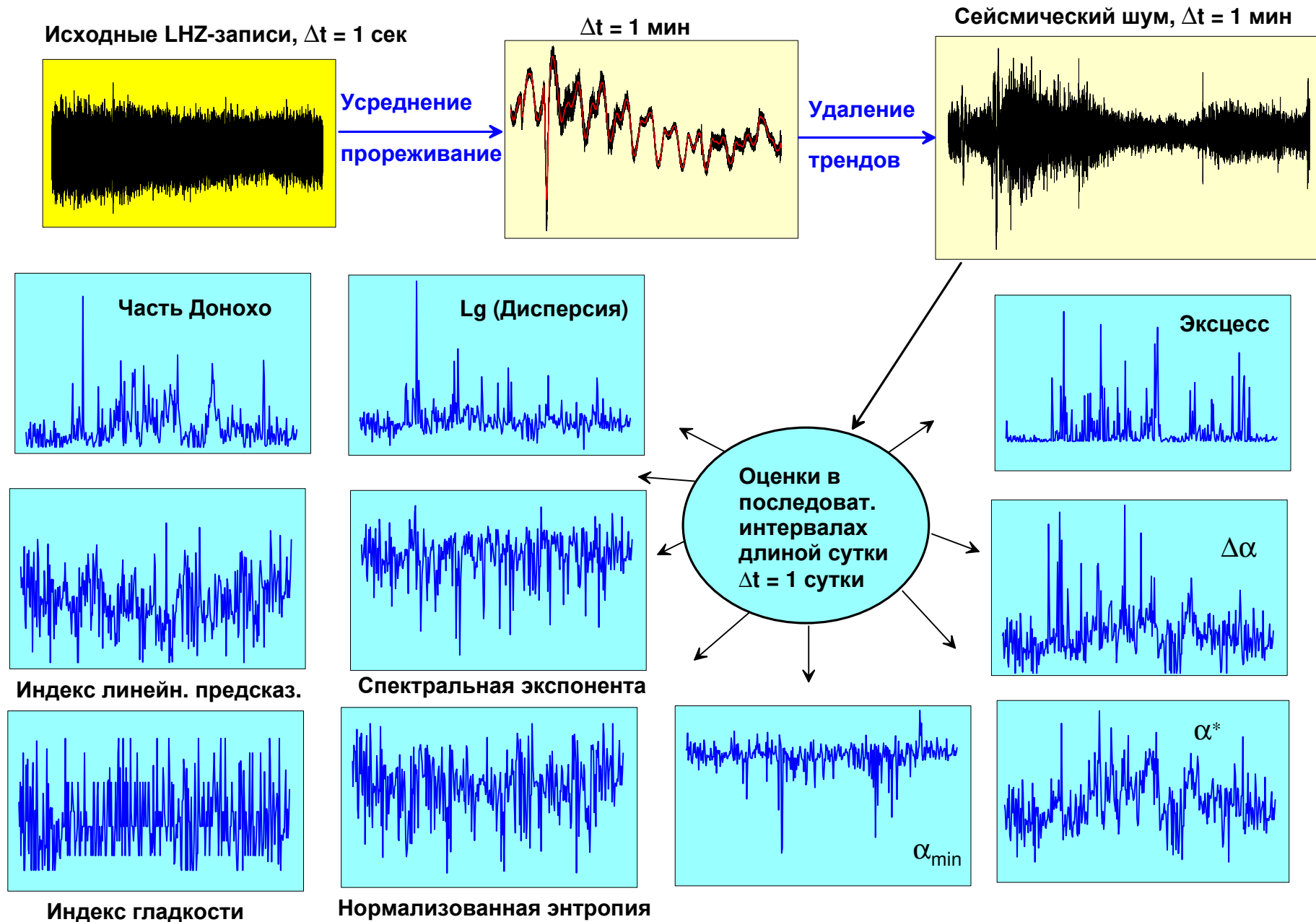
$cPred = 1.228$



VarErr(AR(2))

Ошибка AR(2) прогноза на 1 шаг вперед
с использованием корреляций с 2-мя
предыдущими значениями в коротком окне

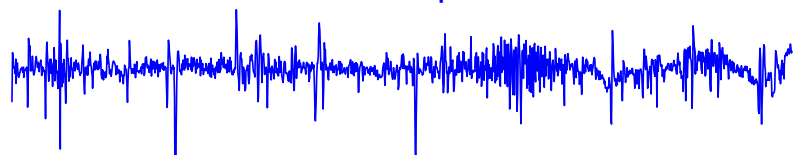
Преобразование исходных данных сейсмического шума к последовательности ежесуточных значений его свойств



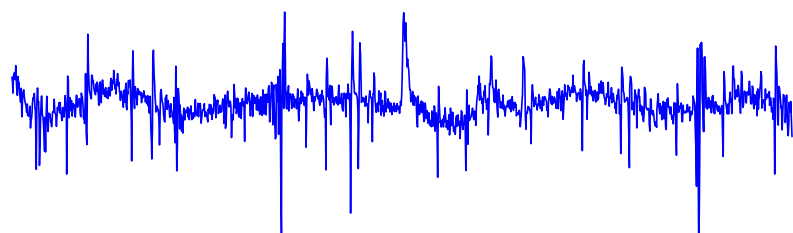
Графики сейсмического шума длиной 1 сутки с шагом по времени 1 минута после удаления приливных трендов

Высокие значения $\Delta\alpha$
 Низкие знач. норм. энтропии En
 Низкие знач. индекса гладкости SI
 Низкие знач. линейн. предсказ. C_{Pred}

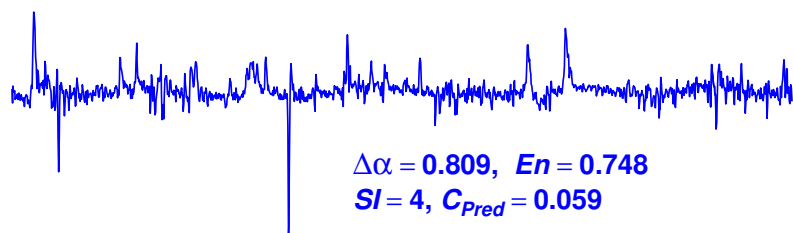
Низкая опасность,
 высокое разнообразие типов
 стохастического поведения,
 много низкочастотных всплесков
 из-за взаимного движения
 неконсолидированных малых
 блоков земной коры,
 энергия не накапливается.



$\Delta\alpha = 0.821, En = 0.685$
 $SI = 3, C_{Pred} = -0.096$



$\Delta\alpha = 0.757, En = 0.704$
 $SI = 2, C_{Pred} = 0.007$

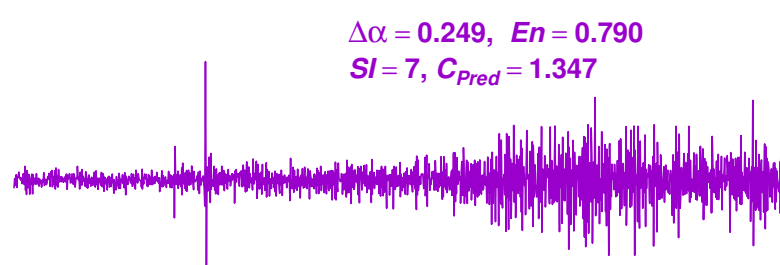


$\Delta\alpha = 0.809, En = 0.748$
 $SI = 4, C_{Pred} = 0.059$

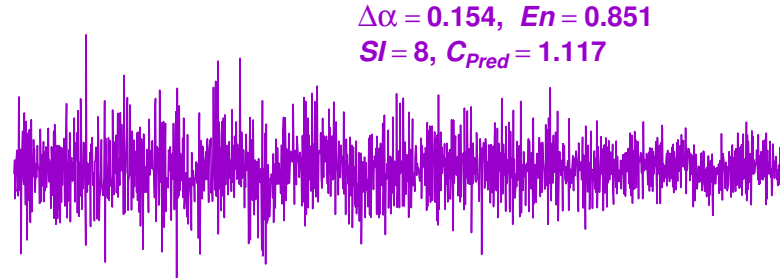
0 200 400 600 800 1000 1200 1400
 Время, минуты

Низкие значения $\Delta\alpha$
 Высокие знач. норм. энтропии En
 Высокие знач. индекса гладкости SI
 Высокие знач. линейн. предсказ. C_{Pred}

Высокая опасность,
 Поведение сигнала существенно
 более однородное, малые блоки
 консолидированы, может начаться
 накопление большого количества
 энергии.



$\Delta\alpha = 0.249, En = 0.790$
 $SI = 7, C_{Pred} = 1.347$



$\Delta\alpha = 0.154, En = 0.851$
 $SI = 8, C_{Pred} = 1.117$



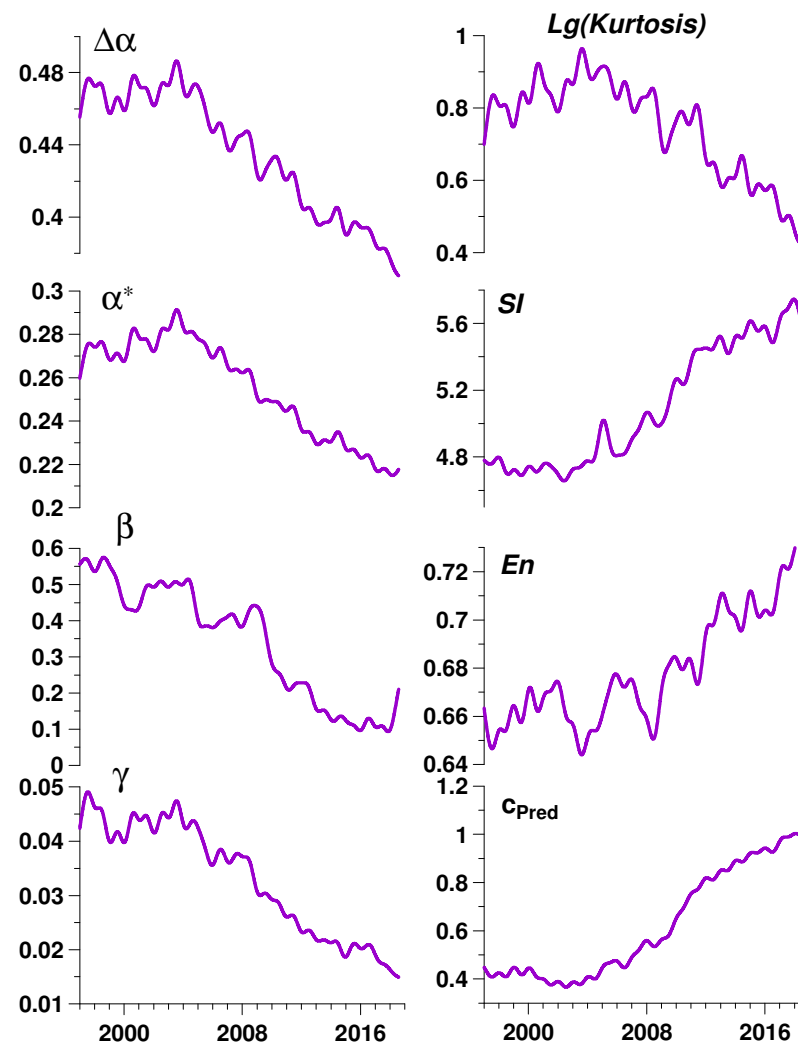
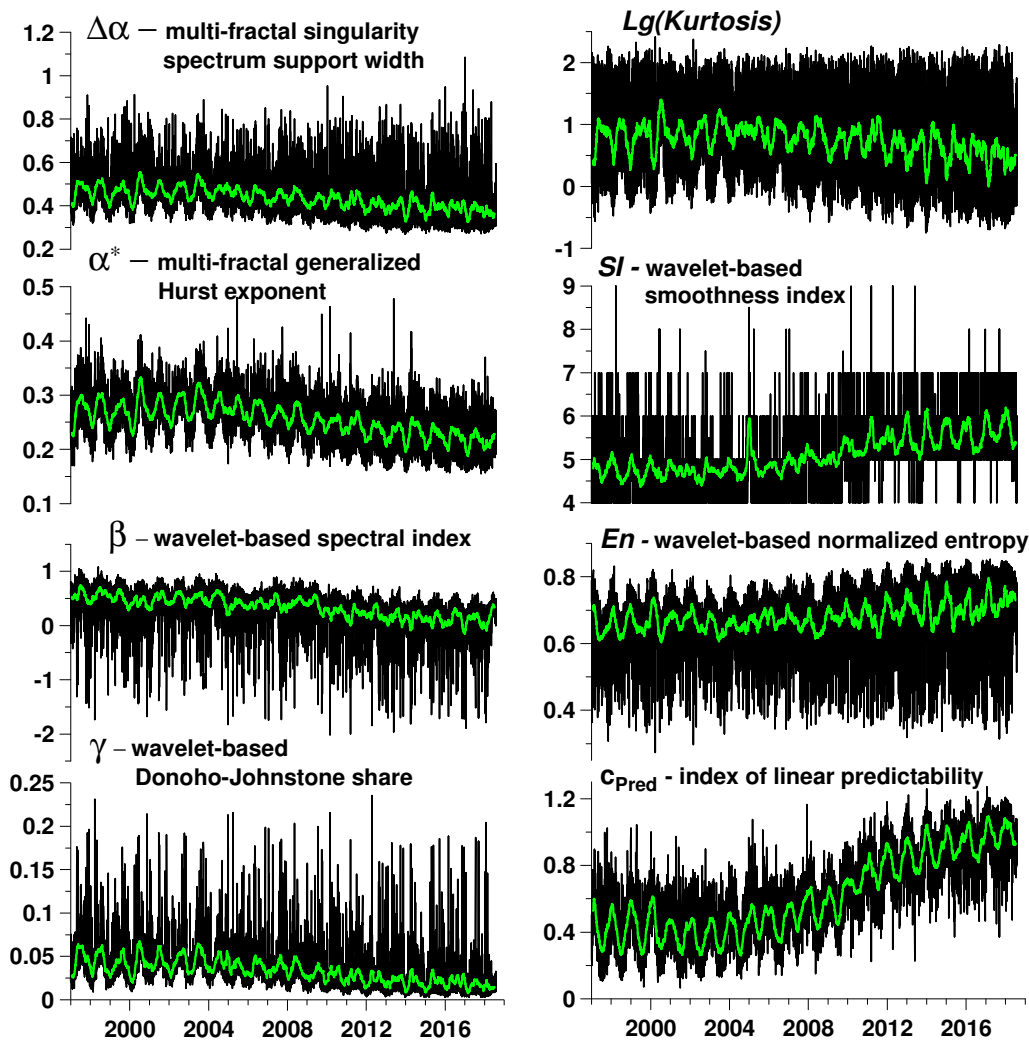
$\Delta\alpha = 0.207, En = 0.855$
 $SI = 9, C_{Pred} = 1.222$

0 200 400 600 800 1000 1200 1400
 Время, минуты

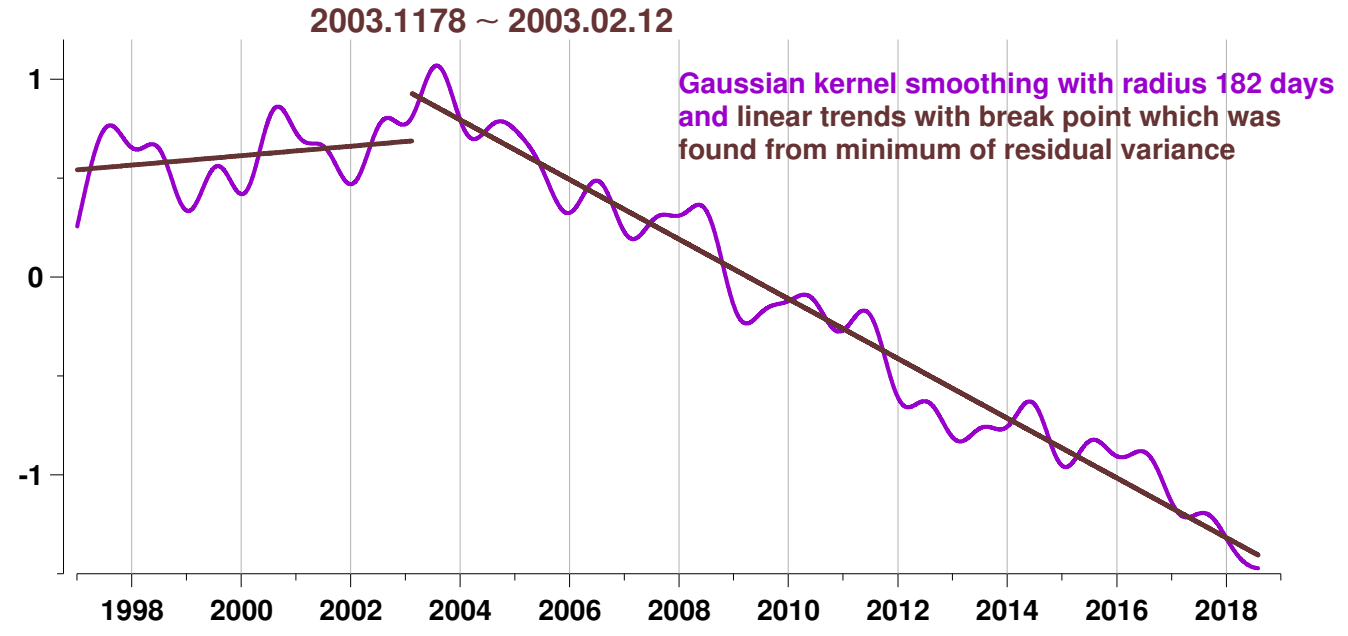
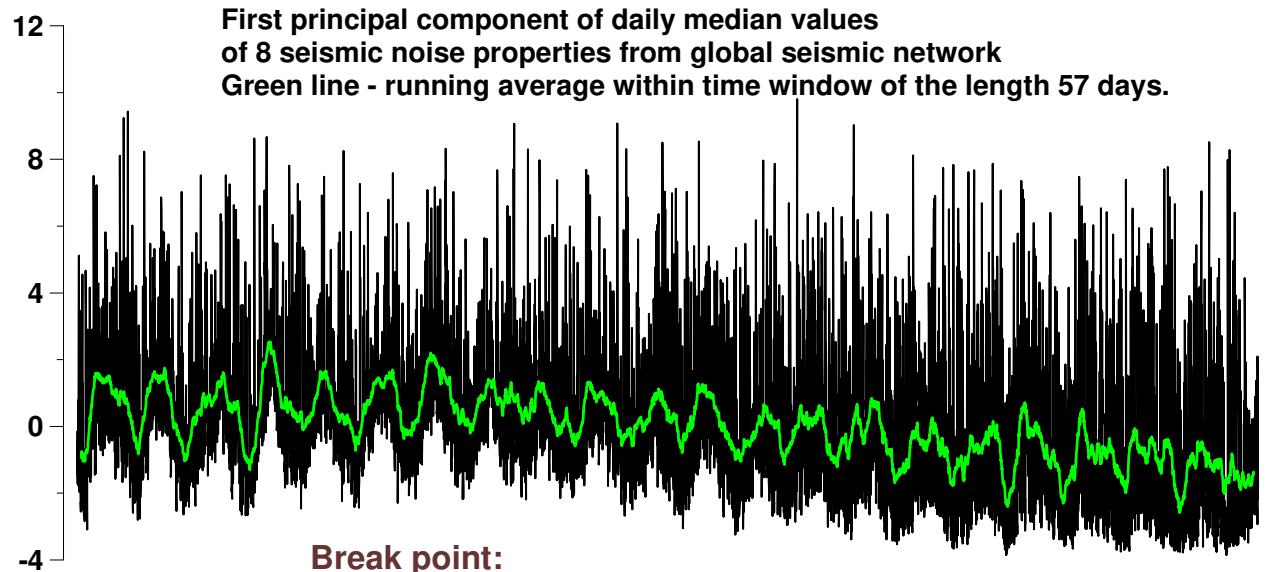
Медианные значения ежесуточных свойств глобального сейсмического шума и их тренды

Daily median values of 8 global seismic noise properties from all stations over the world. Green lines - running average within window of the length 57 days

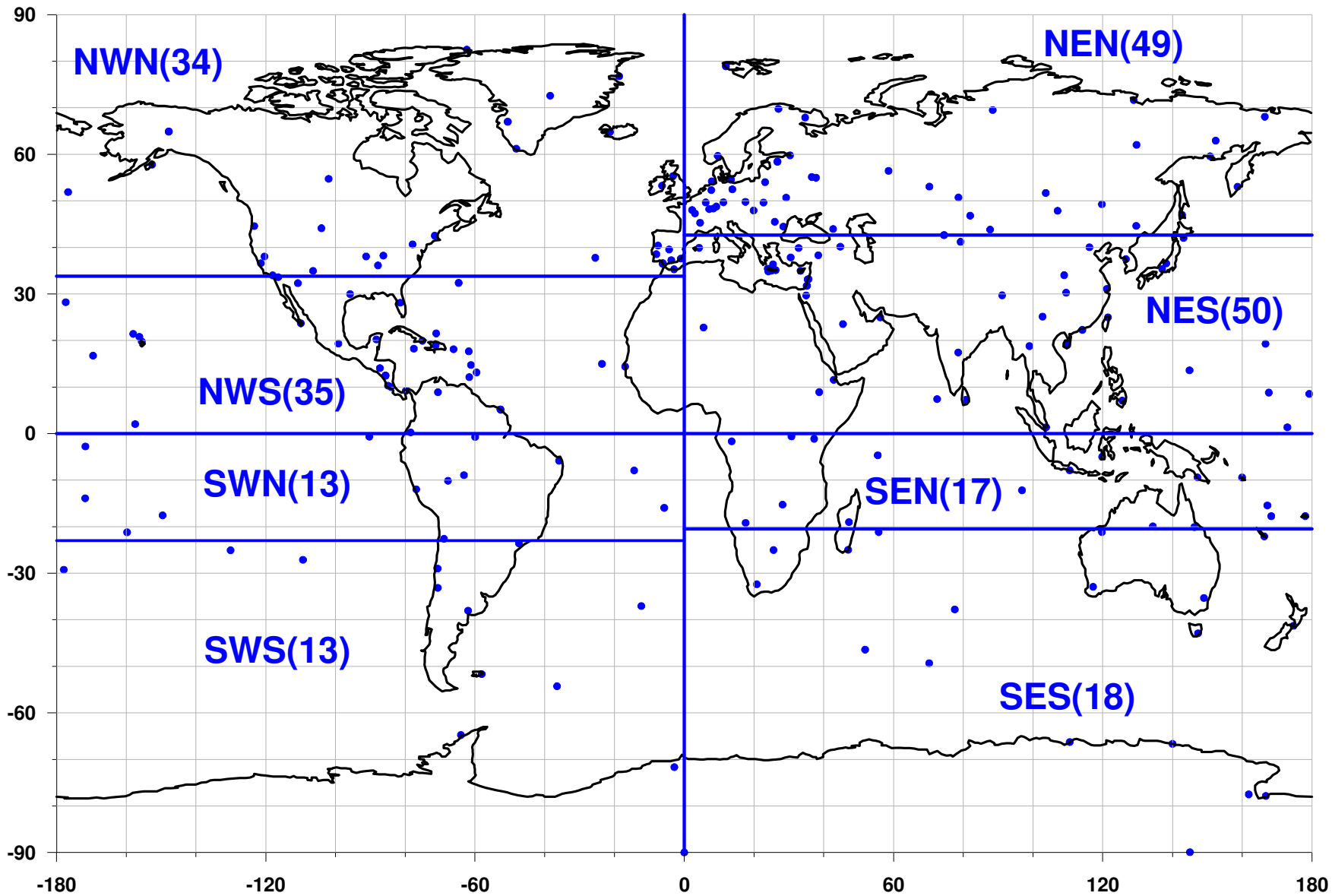
Trends of 8 global seismic noise properties
Median values of seismic noise properties after smoothing by Gaussian kernel with radius 182 days

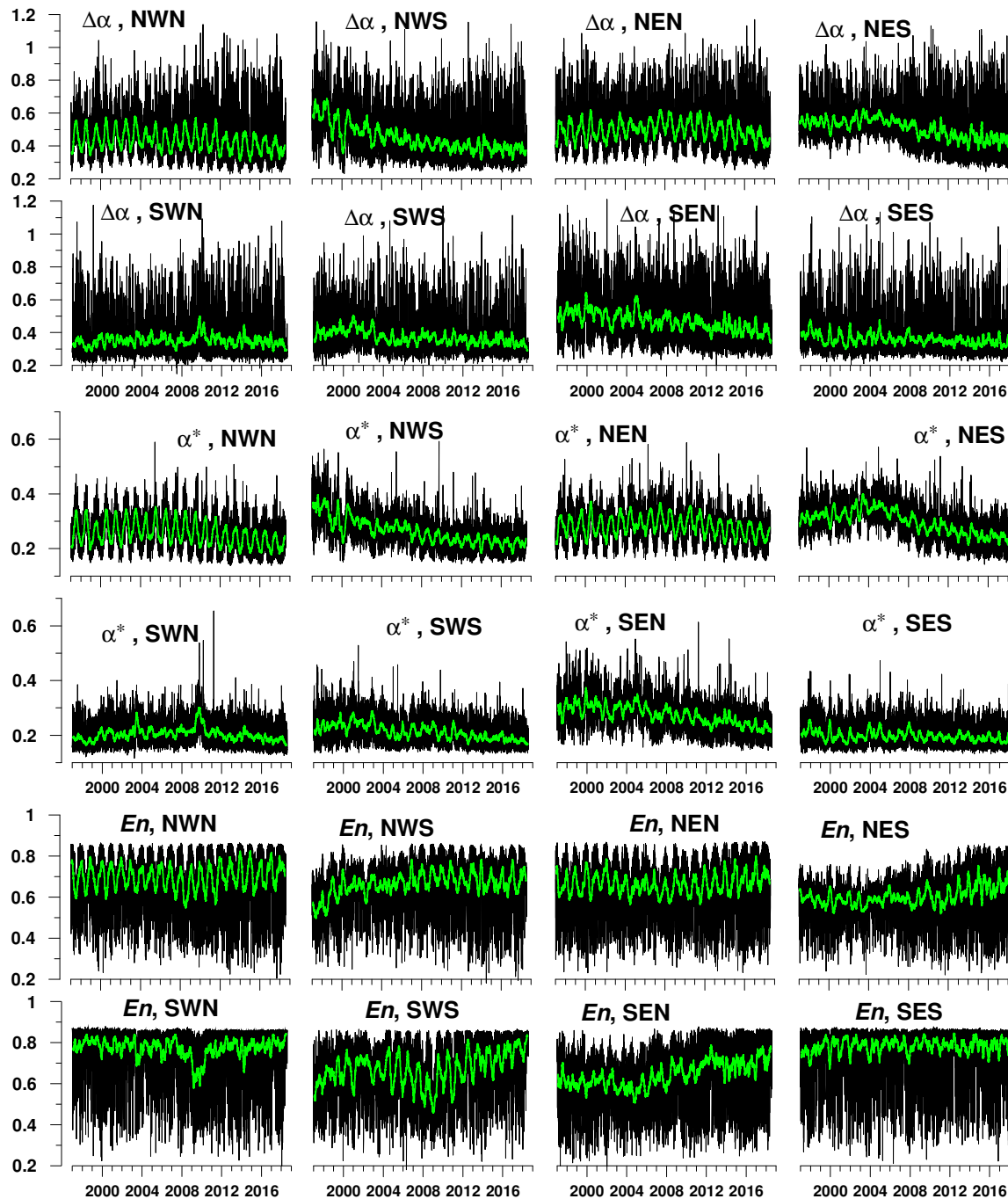


Поиск точки излома трендов средних свойств глобального сейсмического шума. Точка излома – февраль 2003 г.



Разбиение глобальной сейсмической сети на 8 групп станций с указанием числа станций в каждой группе



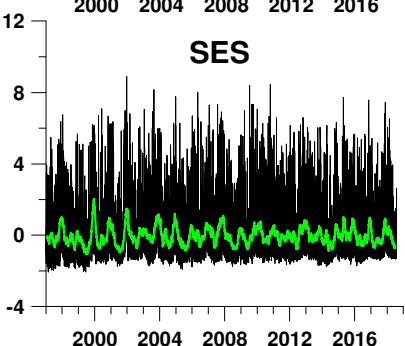
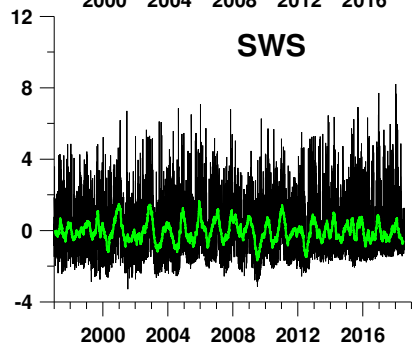
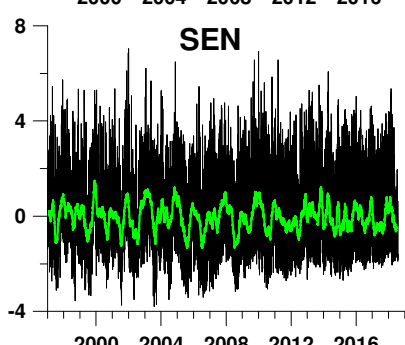
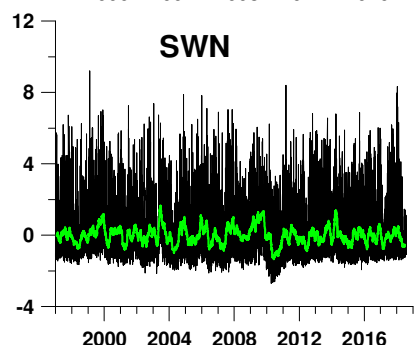
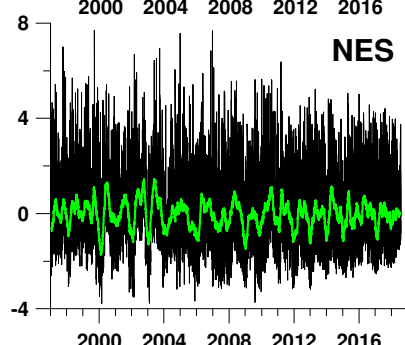
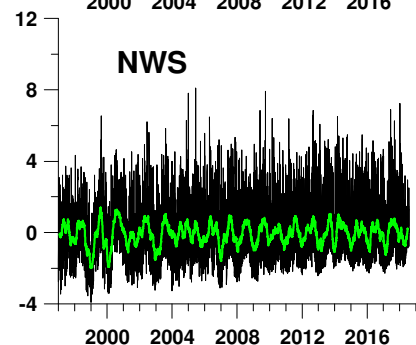
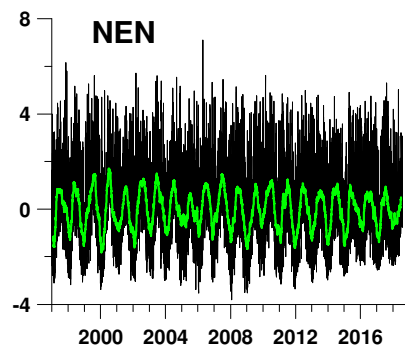
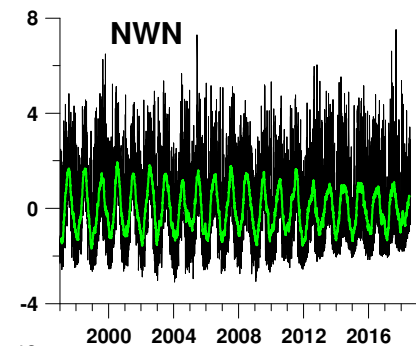


**Медианные значения 3-х
ежесуточных свойств
сейсмического шума в
каждой из 8 групп
станций:**

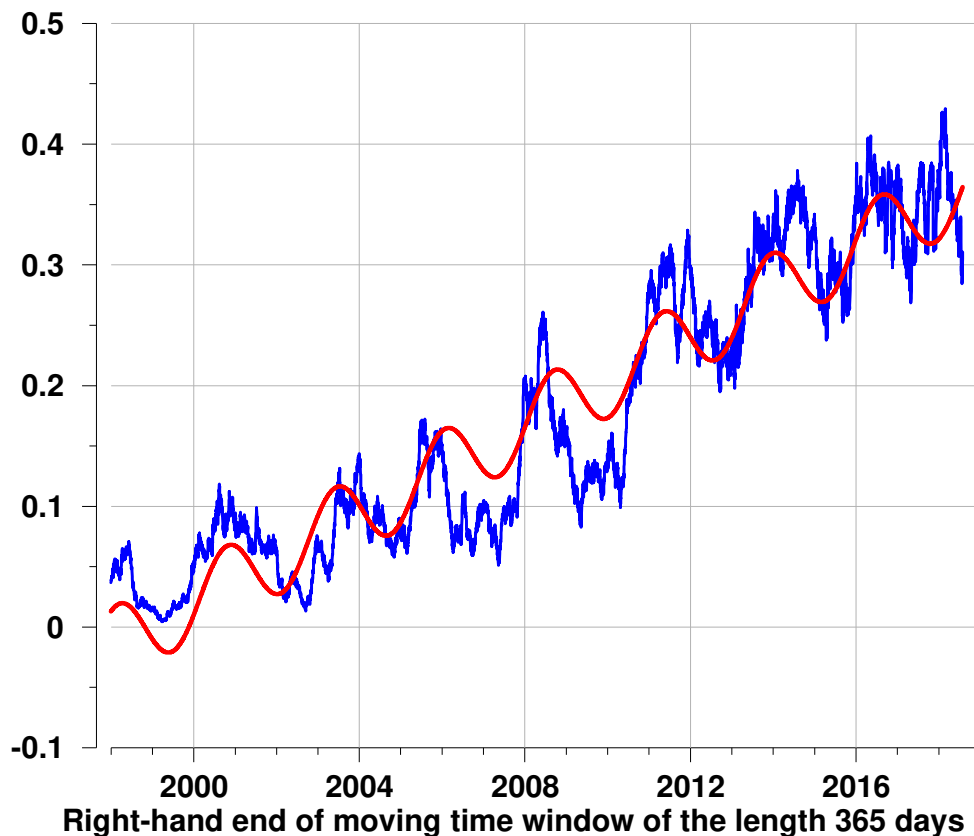
$\Delta\alpha$ – ширина носителя
мульти-фрактального
спектра сингулярности;

α^* – обобщенный
показатель Херста;

En – минимальная
нормализованная
энтропия распределения
квадратов вейвлет-
коэффициентов.

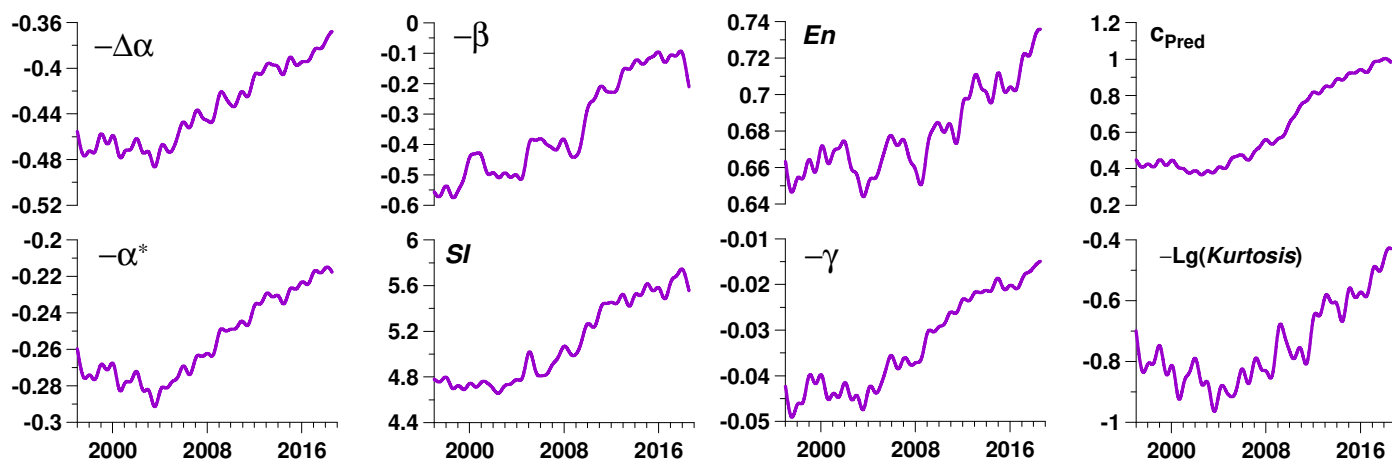


Первые главные компоненты 3-х медианных ежесуточных свойств сейсмического шума ($\Delta\alpha$, α^* , En) от каждой из 8 групп станций глобальной сейсмической сети, вычисленные в скользящем окне длиной 365 суток.



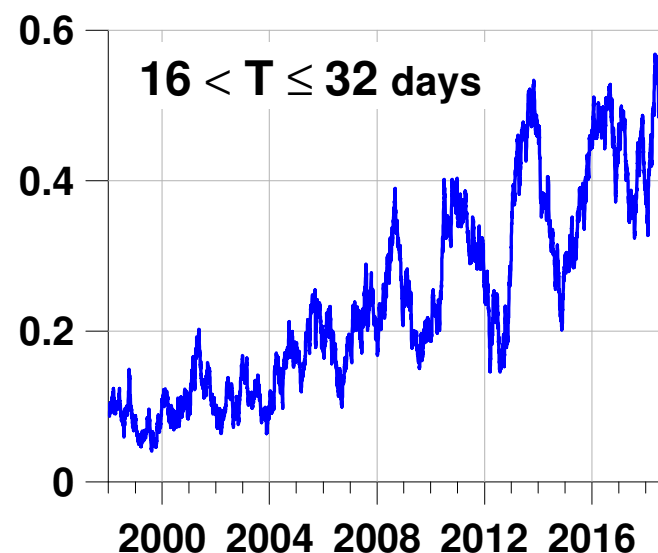
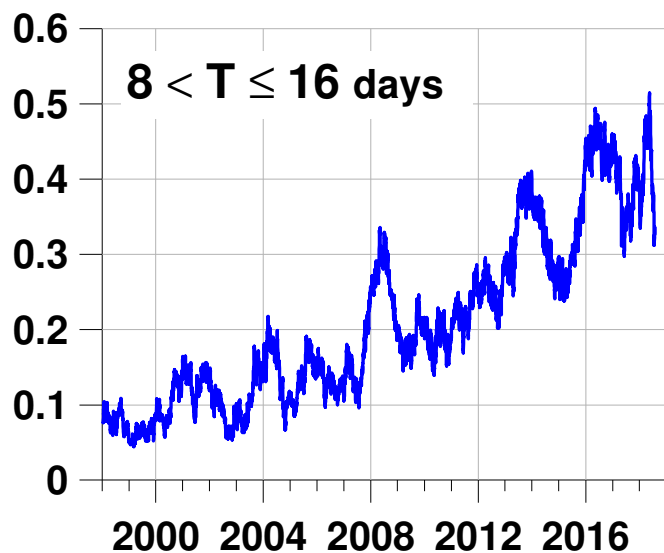
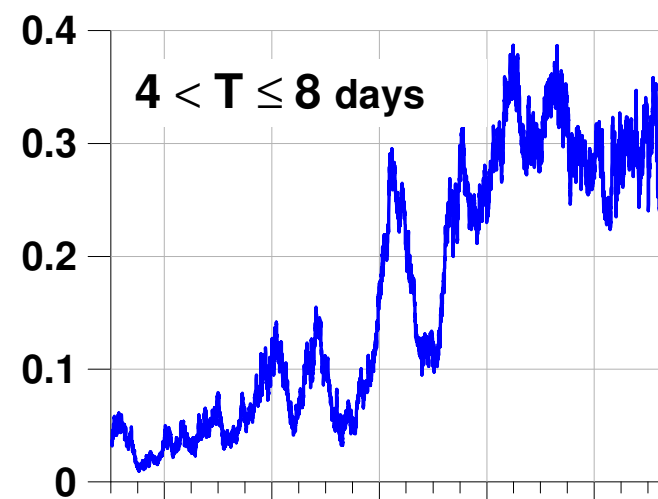
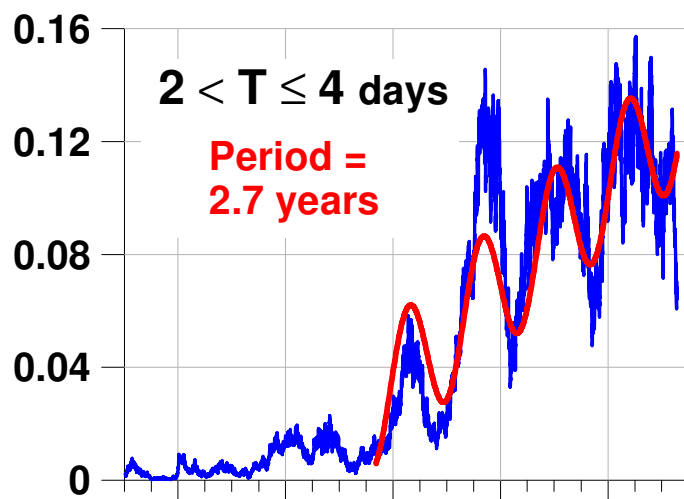
Синяя линия – множественный коэффициент корреляции между первыми главными компонентами 3-х средних ежесуточных свойств сейсмического шума из 8 частей глобальной сейсмической сети в скользящем временном окне длиной 365 суток.

Красная линия – гармоническое колебание с периодом 960 суток (~ 2.6 года), найденное из условия минимума остаточной дисперсии.



Тренды средних ежесуточных свойств глобального сейсмического шума.

Вейвлетная мера когерентности между вариациями первых главных компонент 3-х средних ежесуточных свойств сейсмического шума из 8 частей глобальной сейсмической сети в скользящем временном окне длиной 365 суток. Вейвлеты Хаара.



Right-hand end of moving time window of the length 365 days

Таблица сильнейших землетрясений с начала 20-го века

Strongest earthquakes, , from the beginning of 20 th century							
Source: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/							
Date	Magnitude	Latitude	Longitude	Date	Magnitude	Latitude	Longitude
1906.01.31	8.8	0.955	-79.369	1963.10.13	8.5	44.872	149.483
1922.11.11	8.5	-28.293	-69.852	1964.03.28	9.2	60.908	-147.339
1923.02.03	8.4	54.486	160.472	1965.02.04	8.7	51.251	178.715
1933.03.02	8.4	39.209	144.59	2001.06.23	8.4	-16.265	-73.641
1938.02.01	8.5	-5.045	131.614	2004.12.26	9.1	3.295	95.982
1946.04.01	8.6	53.492	-162.832	2005.03.28	8.6	2.085	97.108
1950.08.15	8.6	28.363	96.445	2007.09.12	8.4	-4.438	101.367
1952.11.04	9	52.623	159.779	2010.02.27	8.8	-36.122	-72.898
1957.03.09	8.6	51.499	-175.626	2011.03.11	9.1	38.297	142.373
1960.05.22	9.5	-38.143	-73.407	2012.04.11	8.6	2.327	93.063

Выводы по анализу глобального сейсмического шума

Можно выдвинуть гипотезу, что **нарастание среднего уровня синхронизации параметров глобального поля сейсмических шумов** за всю историю сейсмического мониторинга с начала 1997 г. предвещало всплеск сейсмической активности с конца 2004 г. по текущее время.

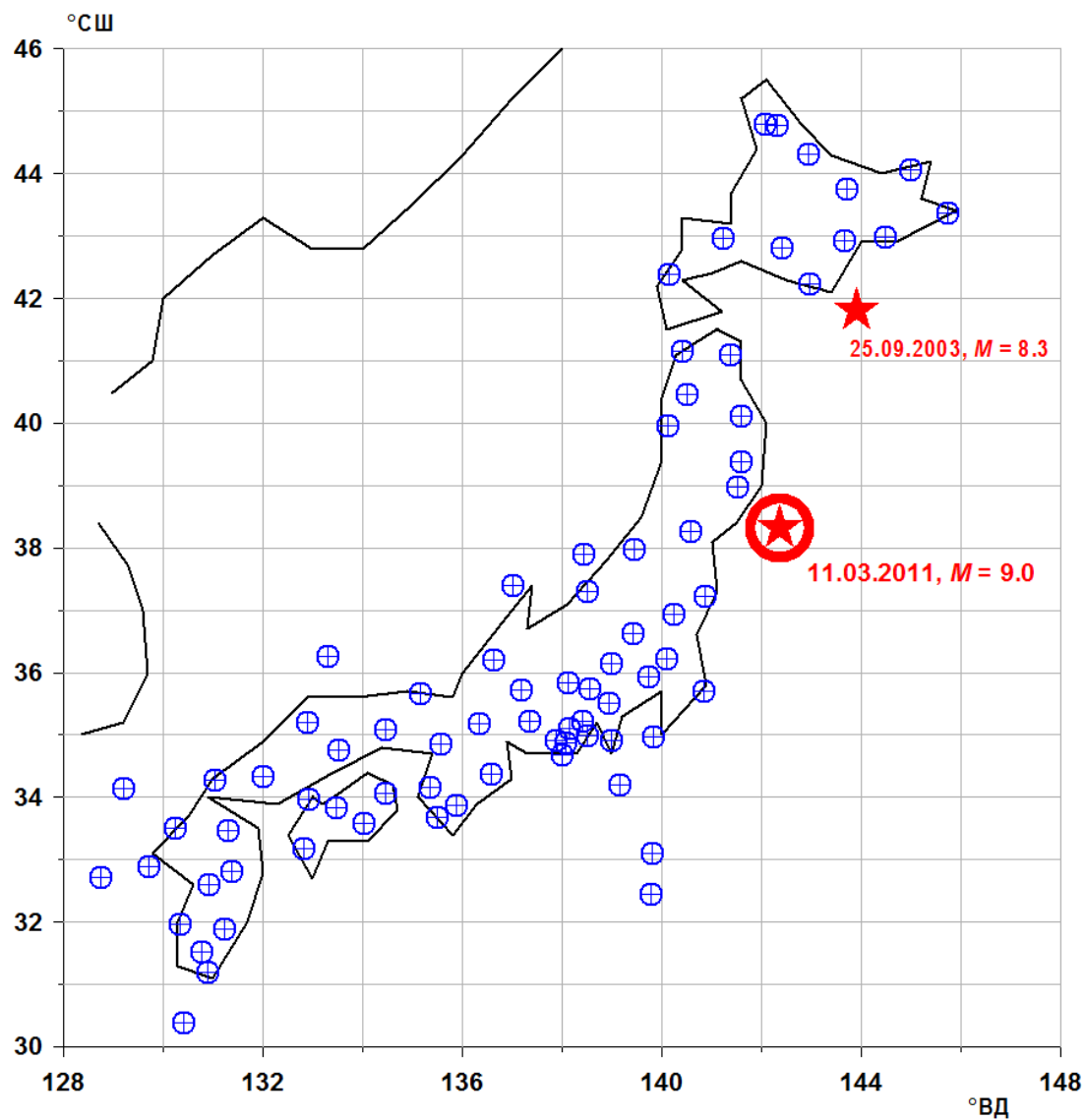
Следует также отметить, что рост среднего уровня синхронизации наблюдается за весь анализируемый период наблюдений, причем **к середине 2018 г. средняя мера синхронизации достигла максимума.**

Последнее может быть предвестником **дальнейшего роста интенсивности сильнейших сейсмических событий**, подобно тому, как это произошло в 1950-1965 гг.

Выявлена **временная точка перелома тренда свойств сейсмического шума – начало 2003 года**, после которой стали наблюдаться усиление тех средних свойств шума, которые характерны для сейсмически опасных регионов.

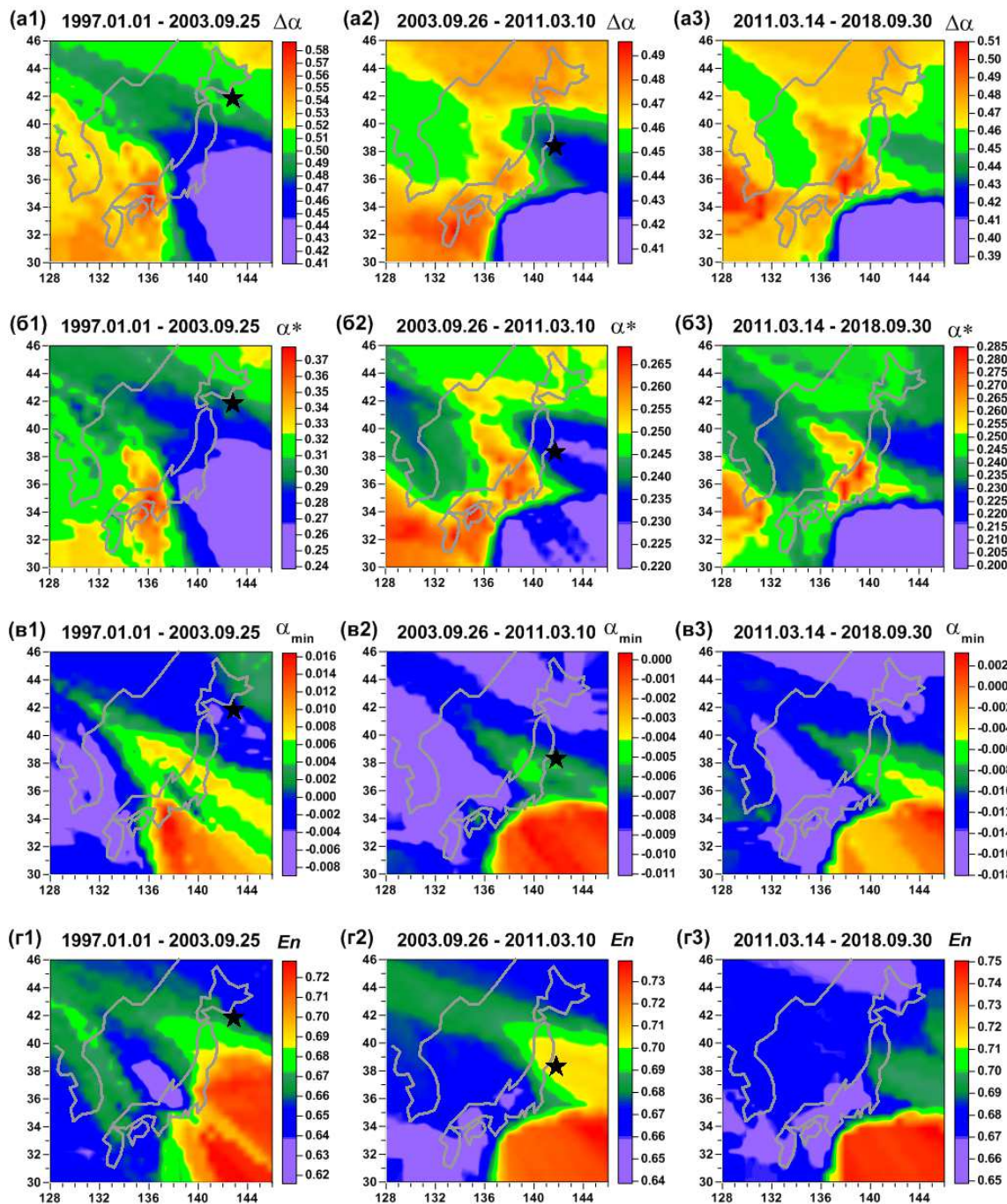
Вариации мер корреляции между средними свойствами сейсмического шума из различных частей глобальной сети имеют выраженные **периодические составляющие с периодами 2.6-2.7 года.**

Сейсмическая опасность в Японии после землетрясения Тохоку 11.03.2011



**Положения 78
широкополосных
сейсмических станций
сети F-net на Японских
островах.**

Наблюдения 1997-2018.



Усредненные карты
распределения по пространству
свойств сейсмического шума:

ширины носителя спектра
сингулярности $\Delta\alpha$ ((a1)-(a3));

обобщенного показателя Херста
 α^* ((b1)-(b3));

минимального показателя
Гельдера-Липшица α_{\min} ((v1)-
(v3));

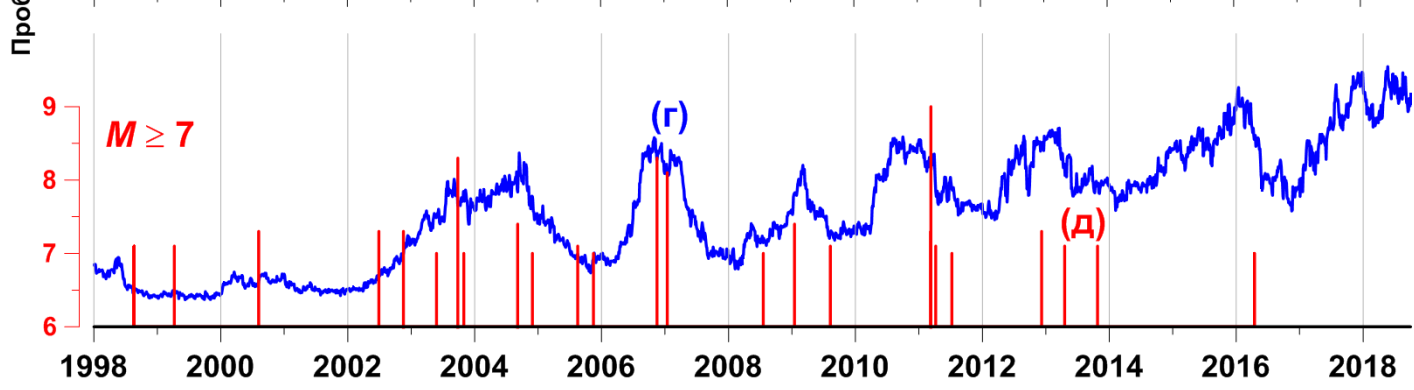
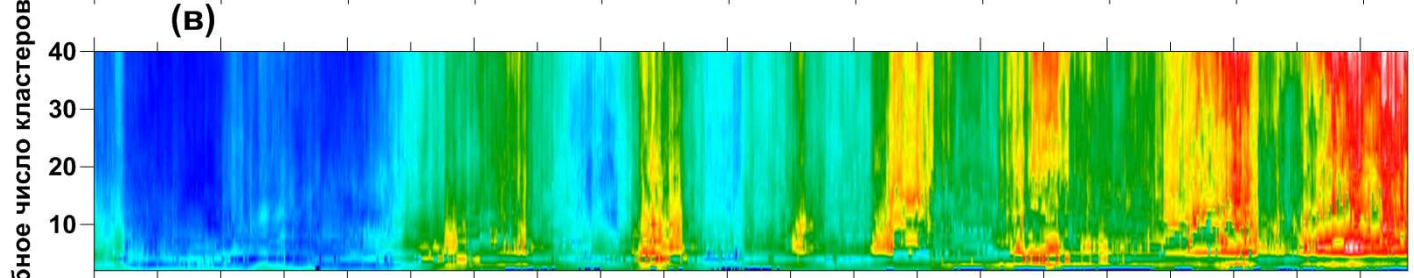
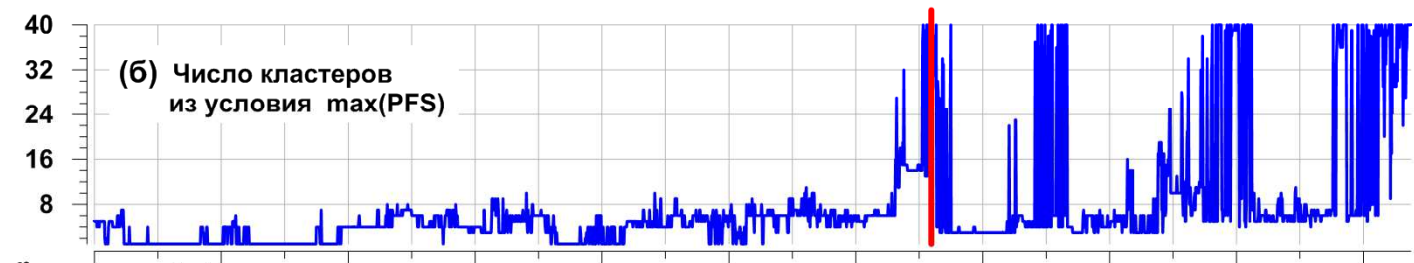
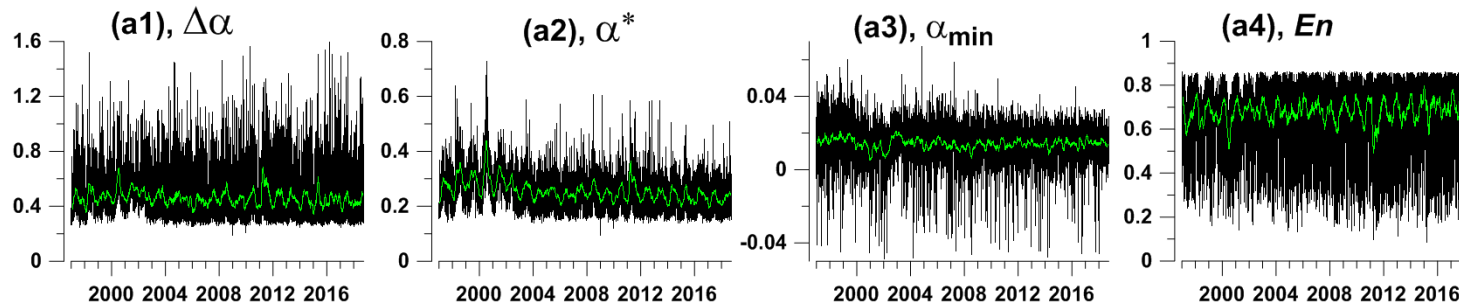
минимальной нормализованной
энтропии квадратов вейвлет-
коэффициентов En ((r1)-(r3)).

Левая колонка карт (a1), (b1), (v1)
и (r1) соответствует интервалу
времени 01.01.1997-25.09.2003,
звездочкой отмечен эпицентр
землетрясения 25.09.2003, $M=8.3$.

Средняя колонка карт (a2), (b2),
(v2) и (r2) - интервалу времени
26.09.2003-10.03.2011, звездочкой
отмечен эпицентр
землетрясения 11.03.2011, $M=9.1$.

Правая колонка карт (a3), (b3),
(v3) и (r3) - интервалу времени
14.03.2011-30.09.2018.

Кластерный анализ векторов свойств шума как попытка прогноза момента времени сильного землетрясения



Время, правый конец скользящего временного окна длиной 365 суток

((a1)-(a4) – графики ежегодных медиан используемых свойств сейсмического шума (черные линии) и их скользящие средние в окне длиной 57 суток (зеленые линии);

(б) – зависимость наилучшего числа кластеров от положения правого конца скользящего временного окна, вертикальной красной линией указан момент времени мега-землетрясения 11.03.2011;

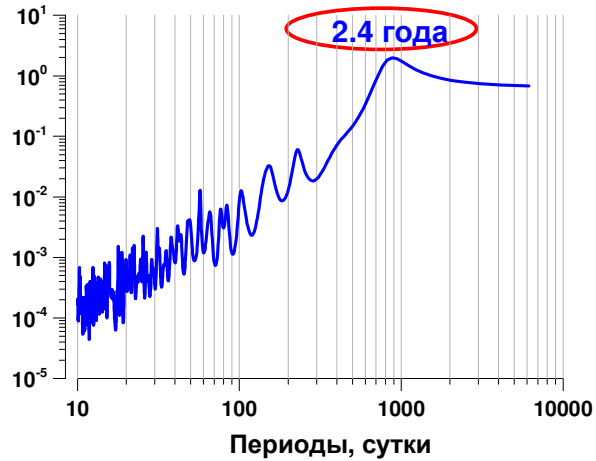
(в) – диаграмма изменчивости величины PFS в зависимости от положения правого конца временного окна и пробного числа кластеров от 2 до 40;

(г), синие линии – зависимость среднего значения статистики PFS от положения правого конца временного окна;

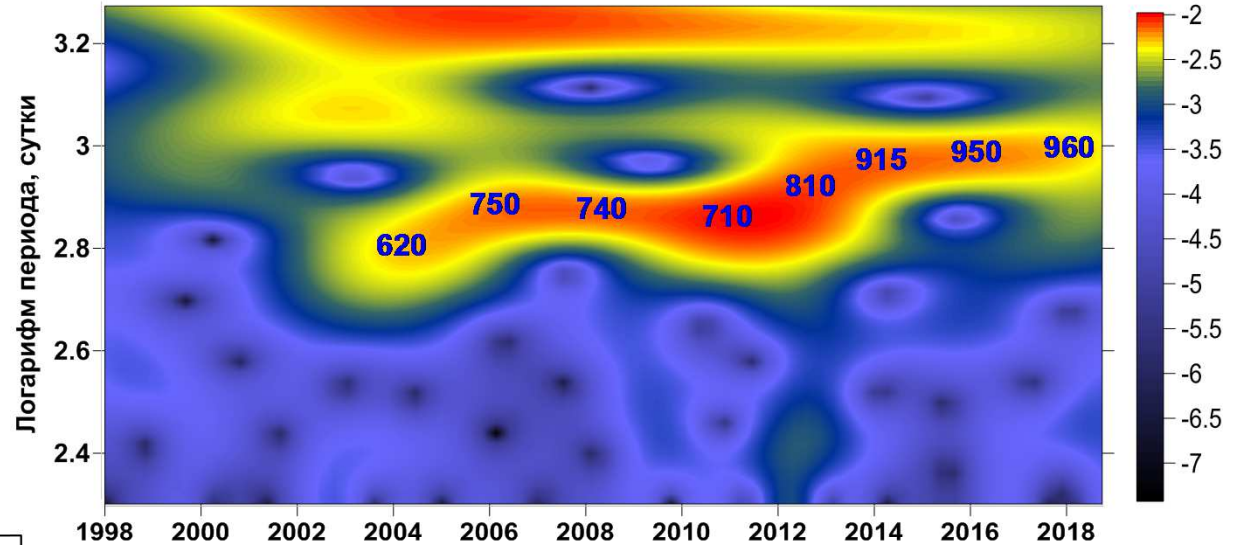
(д), вертикальные красные линии – последовательность сейсмических событий магнитудой $M \geq 7$ в прямоугольной области с географическими координатами $(28N+48N) \times (128E+156E)$

Периодические компоненты корреляционных свойств сейсмического шума

Спектр мощности средних значений PFS



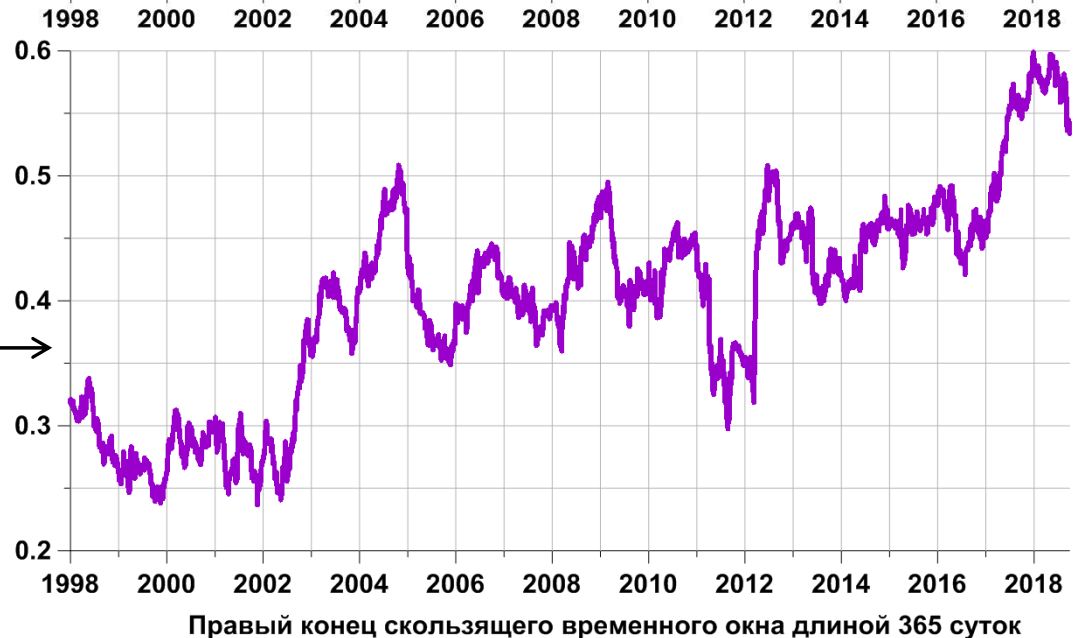
Вейвлет-диаграмма Морле для множественного коэффициента корреляции
Синие цифры - значения периодов в сутках



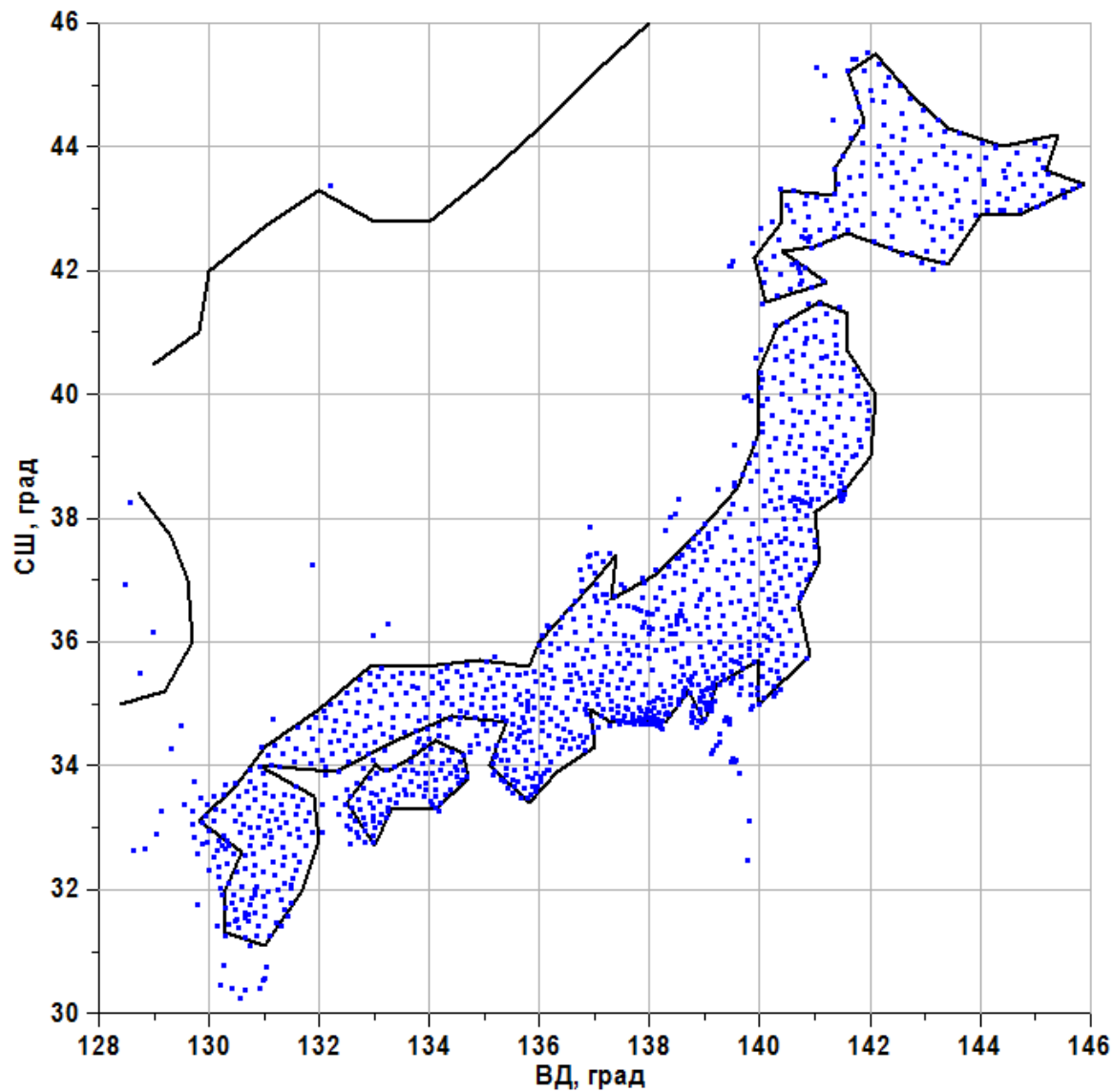
Множественная корреляция для средних значений 9
ежесуточных свойств
сейсмического шума на сети широкополосных
станций F-net:

1. ширина носителя мульти-фрактального спектра сингулярности;
2. обобщенный показатель Херста;
3. минимальный показатель Гельдера-Липшица;
4. спектральная экспонента на основе вейвлет-разложений;
5. логарифм дисперсии;
6. минимальная нормализованная энтропия квадратов вейвлет-коэффициентов;
7. порог Донохо-Джонстона для выделения "шумовых" вейвлет-коэффициентов;
8. индекс линейной предсказуемости;
9. логарифм коэффициента эксцесса.

Точка повышения корреляции соответ. первой половине 2002 г



Правый конец скользящего временного окна длиной 365 суток



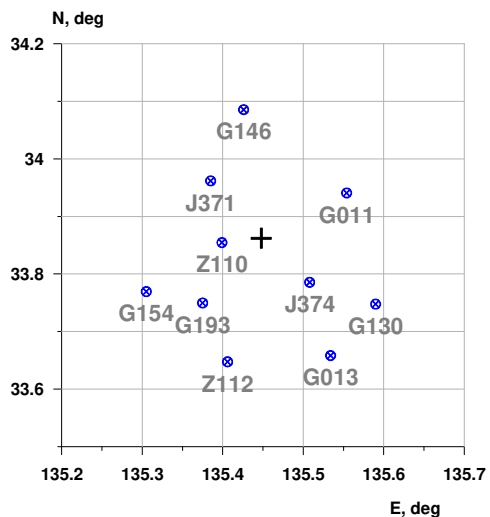
Анализ смещений земной поверхности по данным сети GPS в Японии с шагом по времени 5 минут.

Трех-компонентные временные ряды GPS доступны с марта 2015 года с сайта Nevada Geodetic Laboratory.

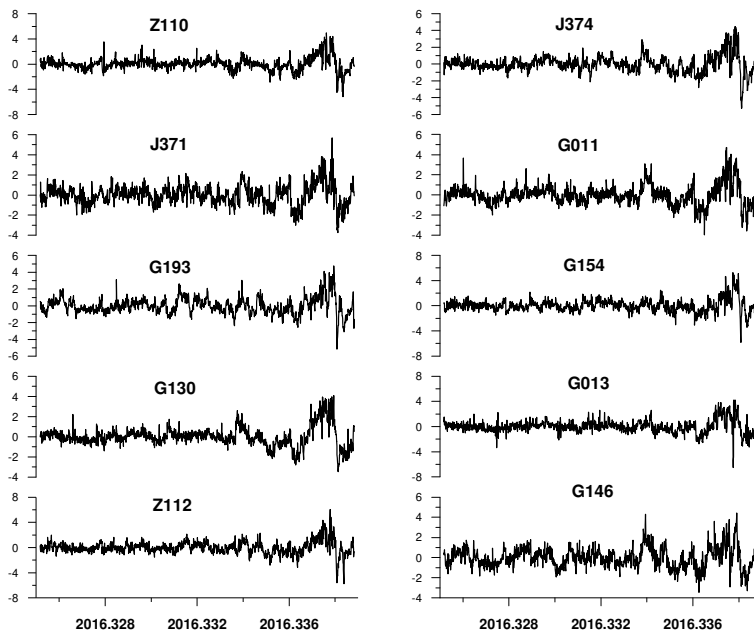
Сеть из 1341 стационарных пунктов.

Функция множественной когерентности, вычисляемая в каждом узле регулярной сетки в скользящем временном окне длиной 5 суток от 10 ближайших работоспособных станций

Black cross is some reference point.
 Blue circles - positions of nearest 10 operable stations within current time window of the length 5 days.
 Grey letters are GPS stations identifiers.

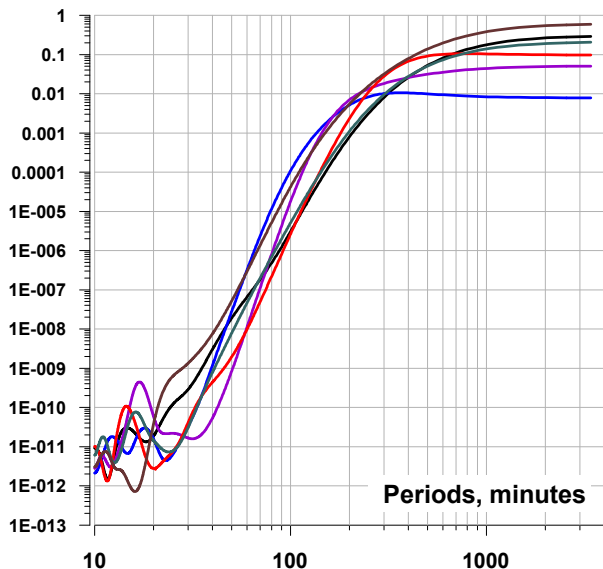


Examples of vertical GPS time series within current time window of the length 5 days from 10 nearest operable stations after trend removing and normalizing.



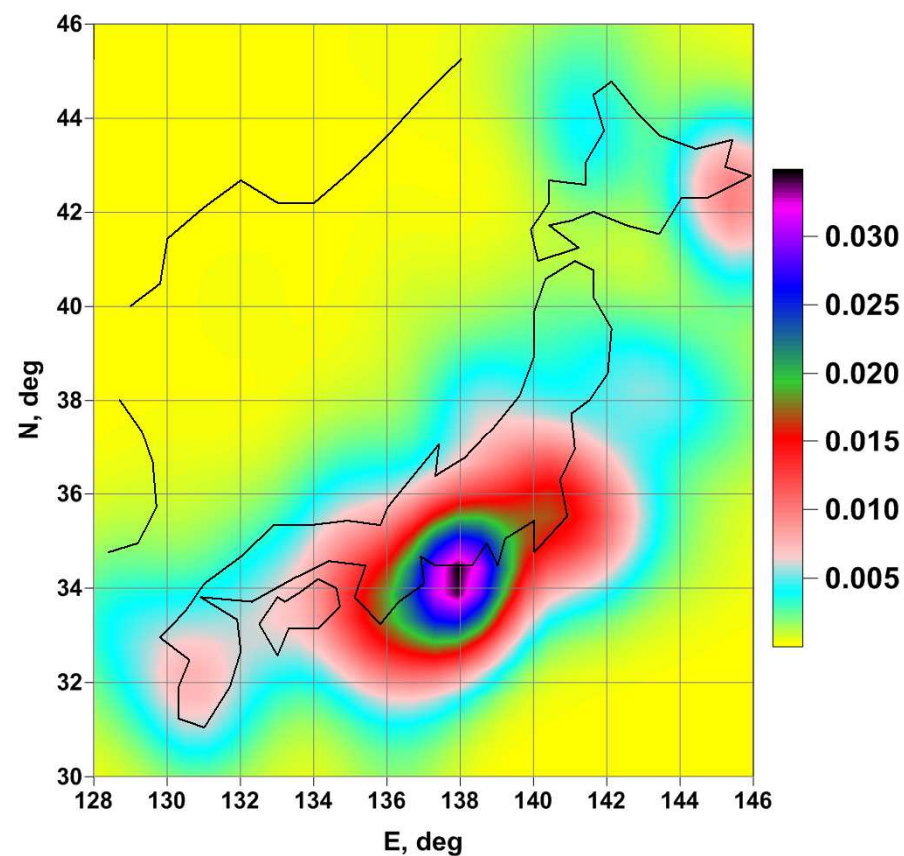
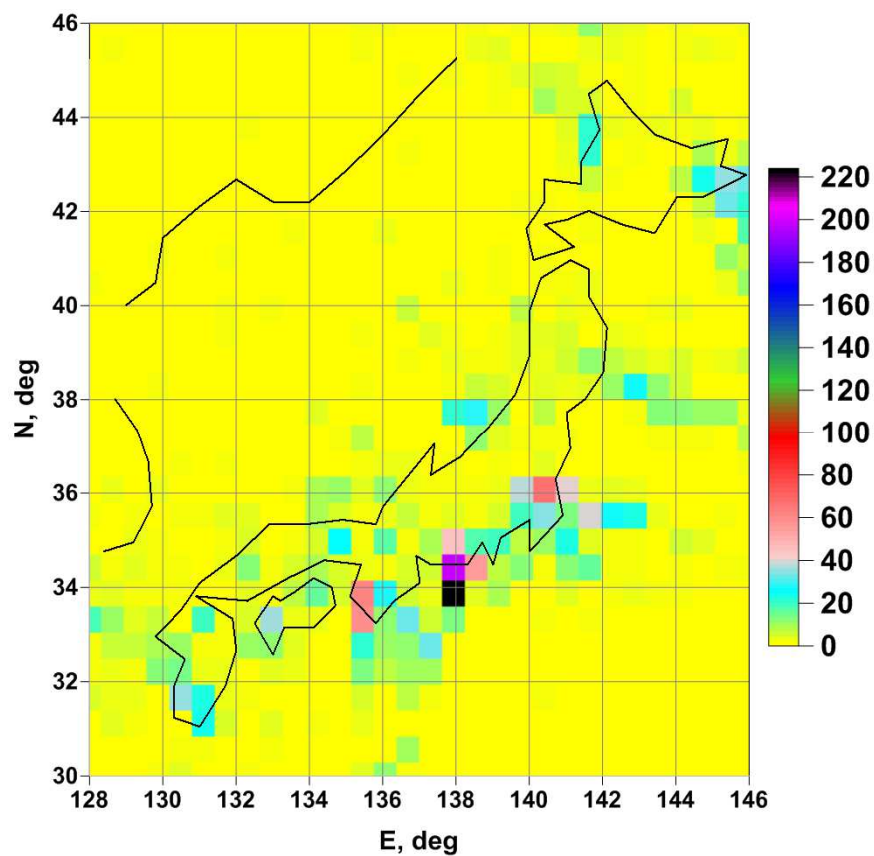
Станция GPS считается работоспособной в текущем временном окне, если в этом окне число пропущенных значений не превышает 10% общей длины окна (в нашем случае 1440 отсчетов с шагом 5 минут, что составляет 5 суток).

Пропущенные значения восполняются искусственными данными, генерируемыми по поведению временного ряда слева и справа от пропуска на интервалах той же длины, что и длина пропуска.



Примеры нескольких функций множественной когерентности в Японии. Оценка в скользящих временных окнах длиной 5 суток со смещением 1 сутки для 10 ближайших работоспособных GPS станций. Вертикальная компонента смещения земной поверхности.

Карты чисел попаданий максимумов максимального значения спектральной множественной меры когерентности шума временных рядов GPS совместно по всем компонентам E, N, Z, в узлы регулярной сети размером 30x30 и ядерная оценка плотности вероятности распределения этих узлов с использованием изотропного гауссовского ядра усреднения с радиусом $h = 1$ градус. Спектральные матрицы вычислялись в скользящем временном окне длиной 5 суток для каждого узла регулярной сетки от 10 ближайших работоспособных станций.



Выводы по Японии

Построение карт различных свойств низкочастотных сейсмических шумов (ширины носителя спектра сингулярности и минимальной нормализованной энтропии вейвлет-коэффициентов) в скользящих временных окнах представляет **новый метод оценки динамической сейсмической опасности.**

Этот метод дает возможность проследить **возникновение и эволюцию «пятен сейсмической опасности»**. Анализ сейсмического шума на островах Японии на широкополосной сейсмической сети F-net дал возможность заблаговременно оценить приближение региона к мега-землетрясению 11 марта 2011 года.

Согласно анализу сейсмического шума после 11 марта 2011 года в районе желоба Нанкай может произойти **следующее мега-землетрясение в Японии.**

Для оценки временного интервала возникновения сейсмического события может быть использована **периодическая структура естественных флуктуаций сейсмической опасности с периодом около 2.4 года.**

Анализ пространственных высокочастотных временных рядов GPS выделяет пятно повышенной когерентности шумов с центром в точке **(34°СШ, 138°ВД)**, что представляет **независимую оценку региона повышенной сейсмической опасности в желобе Нанкай.**

Вопросы, которые желательно было бы выяснить:

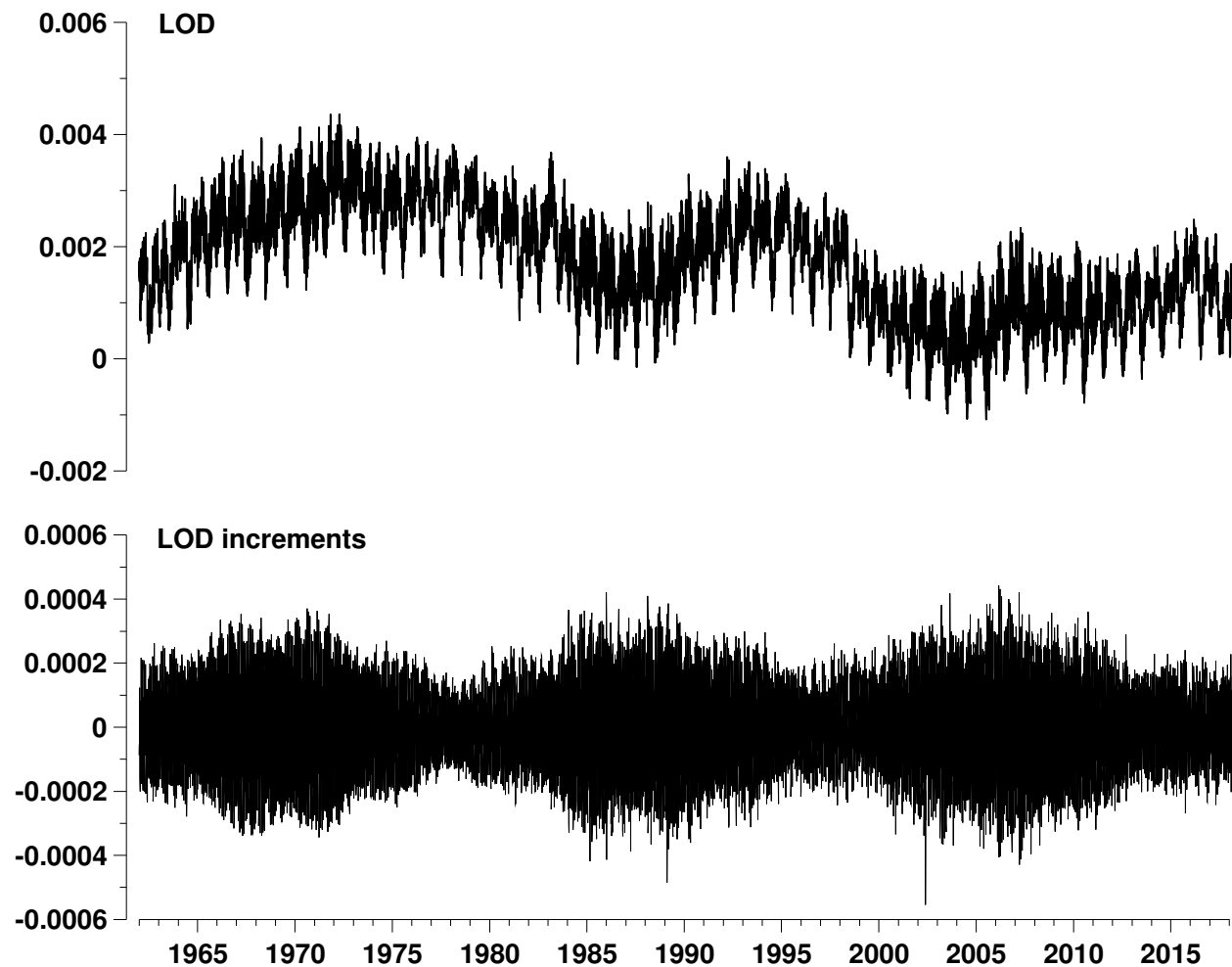
- 1) Почему временной интервал 2002-2003 является «переломным» в поведении свойств сейсмического шума? Заметим, что он же предшествует Суматранскому землетрясению 26.12.2004, с которого началась активизация сильнейших землетрясений мира.**
- 2) Что является причиной периодичности с периодом 2.4-2.7 лет, которая наблюдается в вариациях мер корреляции свойств сейсмического шума?**

В попытках ответить на эти вопросы рассмотрим данные о неравномерности вращения Земли (LOD – length of day).

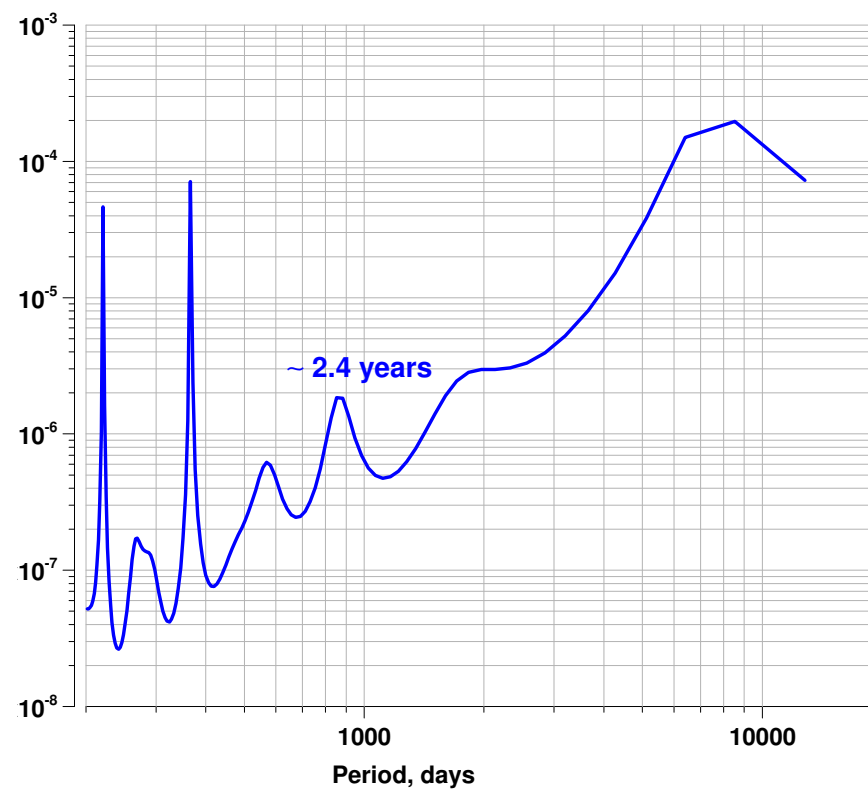
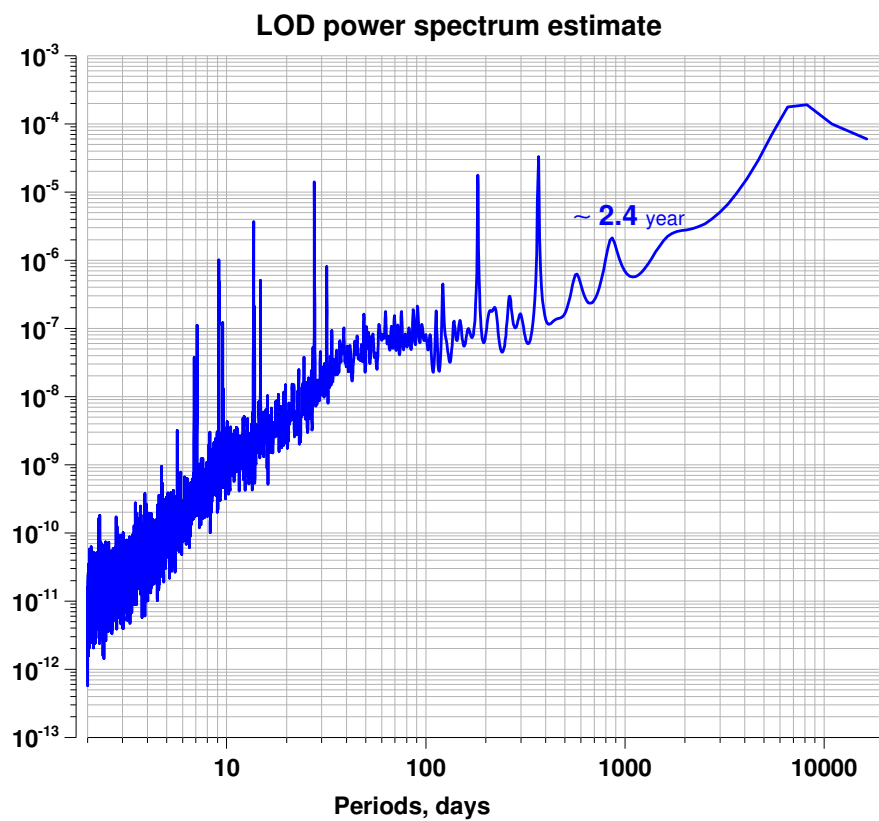
Высокочастотные аномалии временного ряда неравномерности вращения Земли

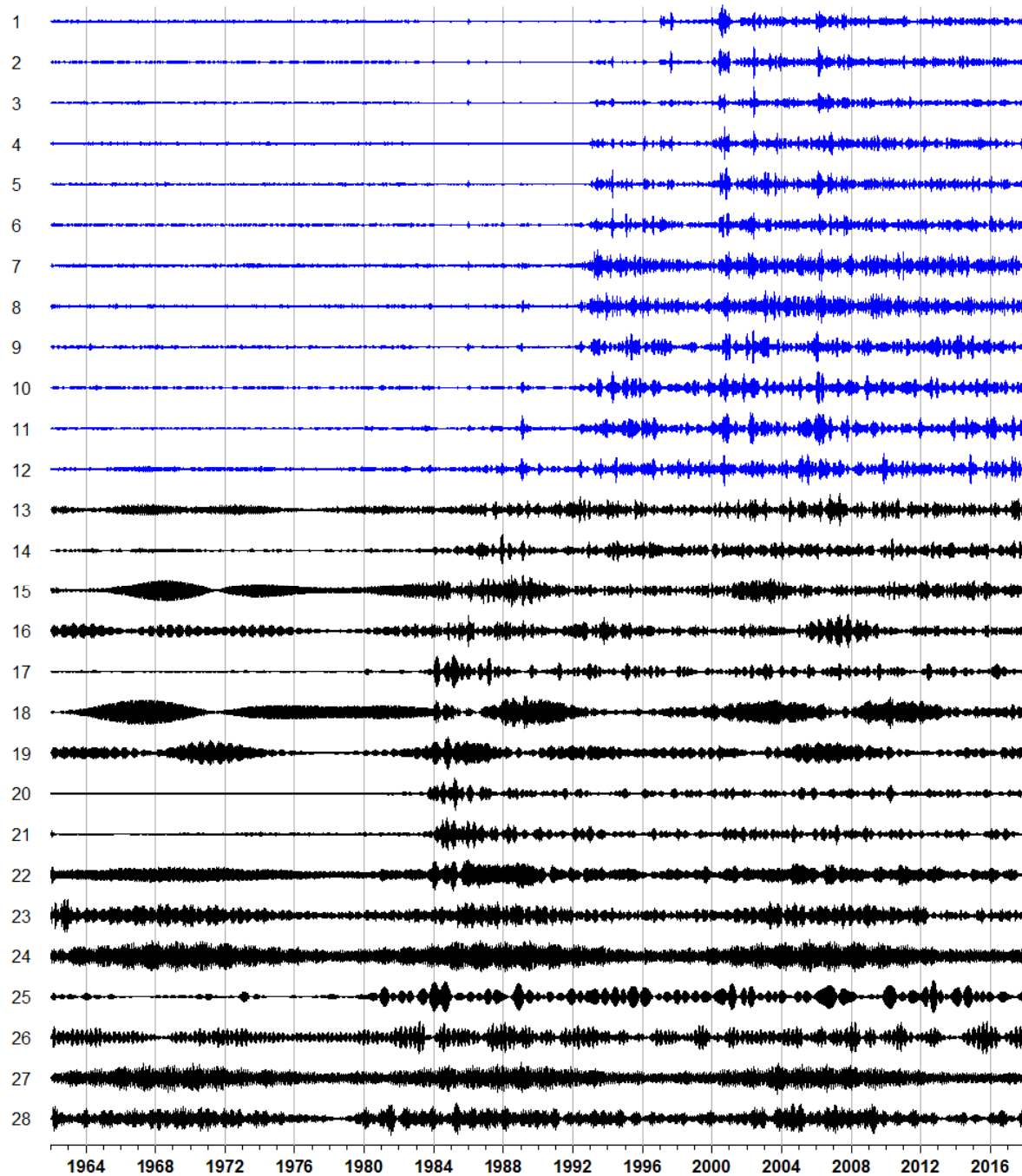
Daily LOD (Length of Day) time series, 1962 – 2018,

<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/index.php?index=C04&lang=en>



Периодичность 2.4 года в спектре мощности LOD





Вейвлет-пакетное
разложение
временного ряда
приращений LOD.
Вейвлет Daub20,
10 обнуляемых моментов

№	Мин. период	Макс. период
1	2.00000	2.13333
2	2.13333	2.28571
3	2.28571	2.46154
4	2.46154	2.66667
5	2.66667	2.90909
6	2.90909	3.20000
7	3.20000	3.55556
8	3.55556	4.00000
9	4.00000	4.26667
10	4.26667	4.57143
11	4.57143	4.92308
12	4.92308	5.33333
13	5.33333	5.81818
14	5.81818	6.40000
15	6.40000	7.11111
16	7.11111	8.00000
17	8.00000	8.53333
18	8.53333	9.14286
19	9.14286	9.84615
20	9.84615	10.66667
21	10.66667	11.63664
22	11.63664	12.80000
23	12.80000	14.22222
24	14.22222	16.00000
25	16.00000	17.06667
26	17.06667	18.28571
27	18.28571	19.69230
28	19.69230	21.33333

**С 1992 года
высокочастотные
вариации LOD с
периодами от 2 до 5 суток
стали статистически
значимыми благодаря
использованию средств
космической геодезии**

Вейвлет-пакетная мера нестационарного поведения временного ряда

Пусть $x_\alpha(t)$, $1 \leq t \leq N$ – ортогональная вейвлет-пакетная компонента временного ряда, где α – целочисленный номер вейвлет-пакетного подуровня, $\alpha_0 \leq \alpha \leq \alpha_1$. Чем больше номер подуровня α , тем больше период τ_α , соответствующий центру частотной полосы подуровня. Ширина вейвлет-пакетного подуровня зависит от числа подуровней, на которое расщепляется уровень детального вейвлет-разложения. Мы использовали расщепление на 8 подуровней. Для каждого подуровня выполним предварительную нормировку:

$$y_\alpha(t) = \frac{x_\alpha(t)}{\max_t |x_\alpha(t)|}$$

Пусть s – центр скользящего временного окна длиной $(2m_\alpha + 1)$ отсчетов, где $m_\alpha = \lceil \tau_\alpha \rceil$. Вычислим суммы квадратов амплитуд нормализованной вейвлет-пакетных компонент $y_\alpha(t)$ в левой и правой окрестности скользящей центральной точки s :

$$Z_{\text{Left}}^{(\alpha)}(s) = \sum_{t=s-m_\alpha}^{s-1} |y_\alpha(t)|^2, \quad Z_{\text{Right}}^{(\alpha)}(s) = \sum_{t=s+1}^{s+m_\alpha} |y_\alpha(t)|^2$$

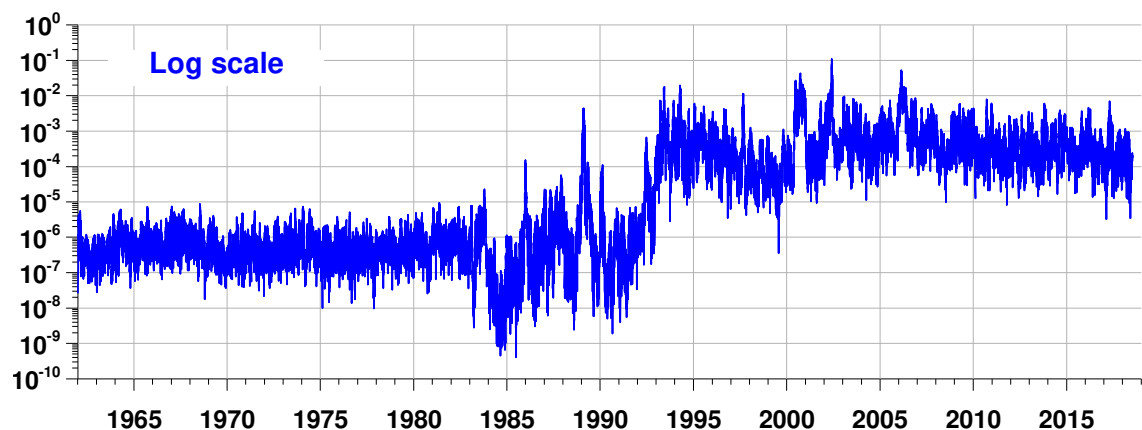
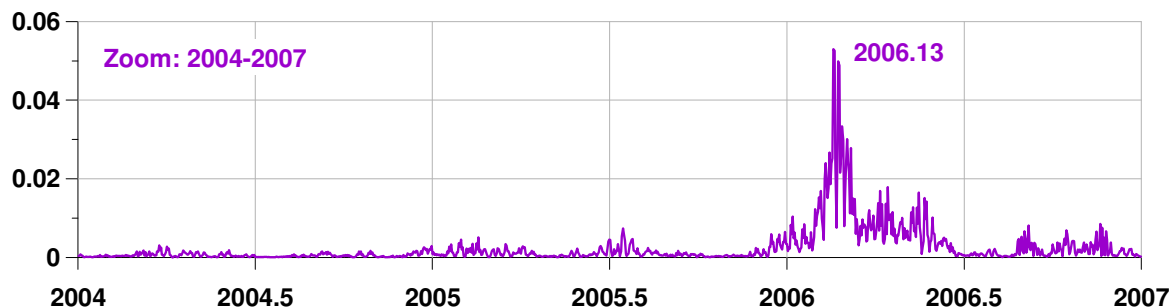
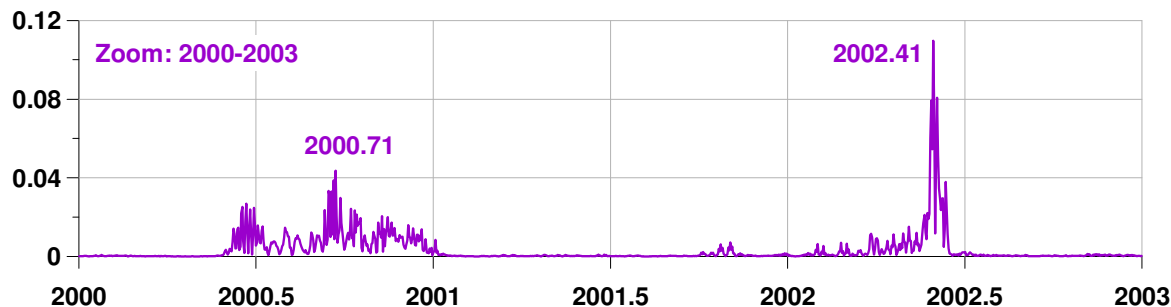
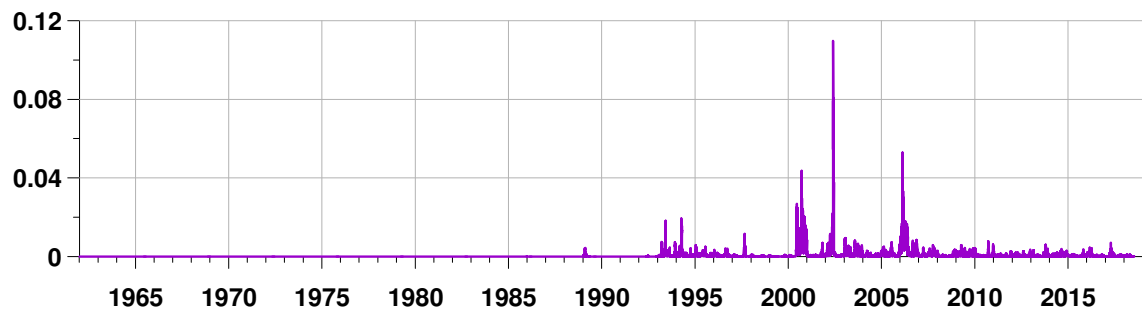
и вычислим среднее значение их разности:

$$\Delta Z^{(\alpha)}(s) = (Z_{\text{Left}}^{(\alpha)}(s) - Z_{\text{Right}}^{(\alpha)}(s)) / m_\alpha$$

Вейвлет-пакетная мера нестационарного поведения определяется формулой:

$$r^2(s) = \sum_{\alpha=\alpha_0}^{\alpha_1} |\Delta Z^{(\alpha)}(s)|^2 / (\alpha_1 - \alpha_0 + 1)$$

Эта мера определена для временных точек s , удовлетворяющих условию $1 + m_{\alpha_1} \leq s \leq N - m_{\alpha_1}$.



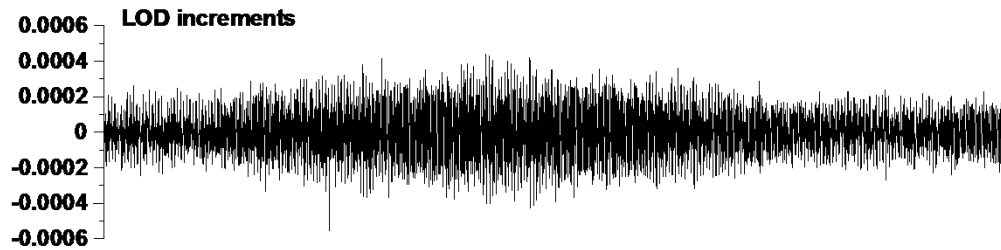
Мера нестационарности
временного ряда LOD на
основе вейвлет-пакетного
разложения с
расщеплением каждого
уровня детальности на 8
под-уровней.

Использовался
ортогональный вейвлет
Добеши с 10 обнуляемыми
моментами.

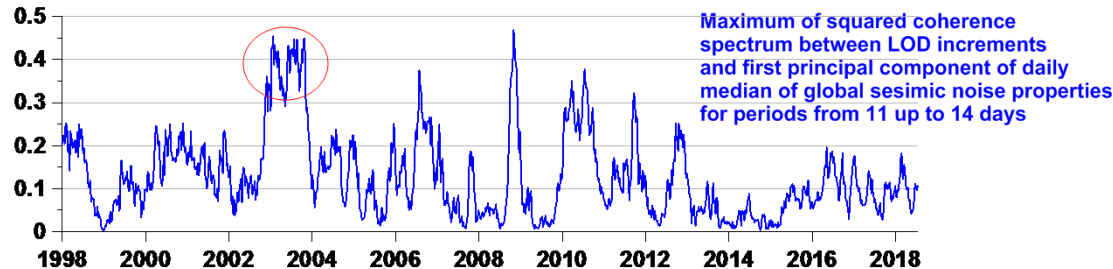
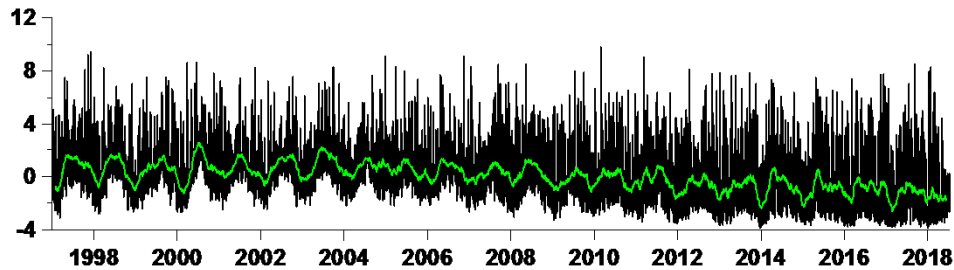
Мера нестационарного
поведения вычислялась
для периодов от 2 до 5.33
суток для первых 12 под-
уровней разложения.

Радиус усредняющей
окрестности = 5 суток

Видна последовательность
из 3 всплесков
нерегулярности вращения
Земли с максимальным
всплеском в середине 2002
года.

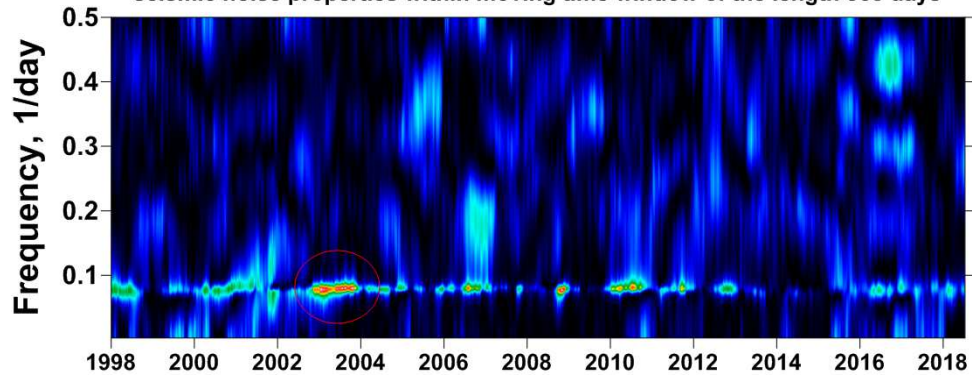


First principal component of daily median values of 8 global seismic noise properties from broadband stations all over the world



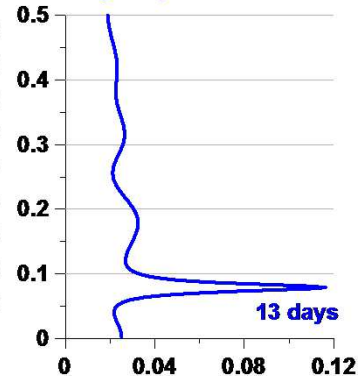
Maximum of squared coherence spectrum between LOD increments and first principal component of daily median of global seismic noise properties for periods from 11 up to 14 days

Estimate of squared coherence spectrum between LOD increments and first principal component of daily median values of 8 global seismic noise properties within moving time window of the length 365 days



Right-hand end of moving time window of the length 365 days

Frequency-dependent squared coherence spectrum averaged by all time windows



Оценка квадратичной когерентности между приращениями LOD и первой главной компонентой средних свойств глобального сейсмического шума в окне длиной год.

Когерентность сосредоточена в узкой частотной полосе с периодами 11-14 суток

Максимум когерентности соответствует интервалу времени 2002-2004 гг.

Выводы по анализу временного ряда LOD:

Спектр мощности LOD содержит **низкочастотный пик с периодом 2.4 года**.

Анализ меры нестационарного поведения высокочастотной составляющей LOD (доступной для исследования с 1992 года) выделил всплески меры нестационарности в интервале 2000-2006 гг. с максимальным значением **в первой половине 2002 года**.

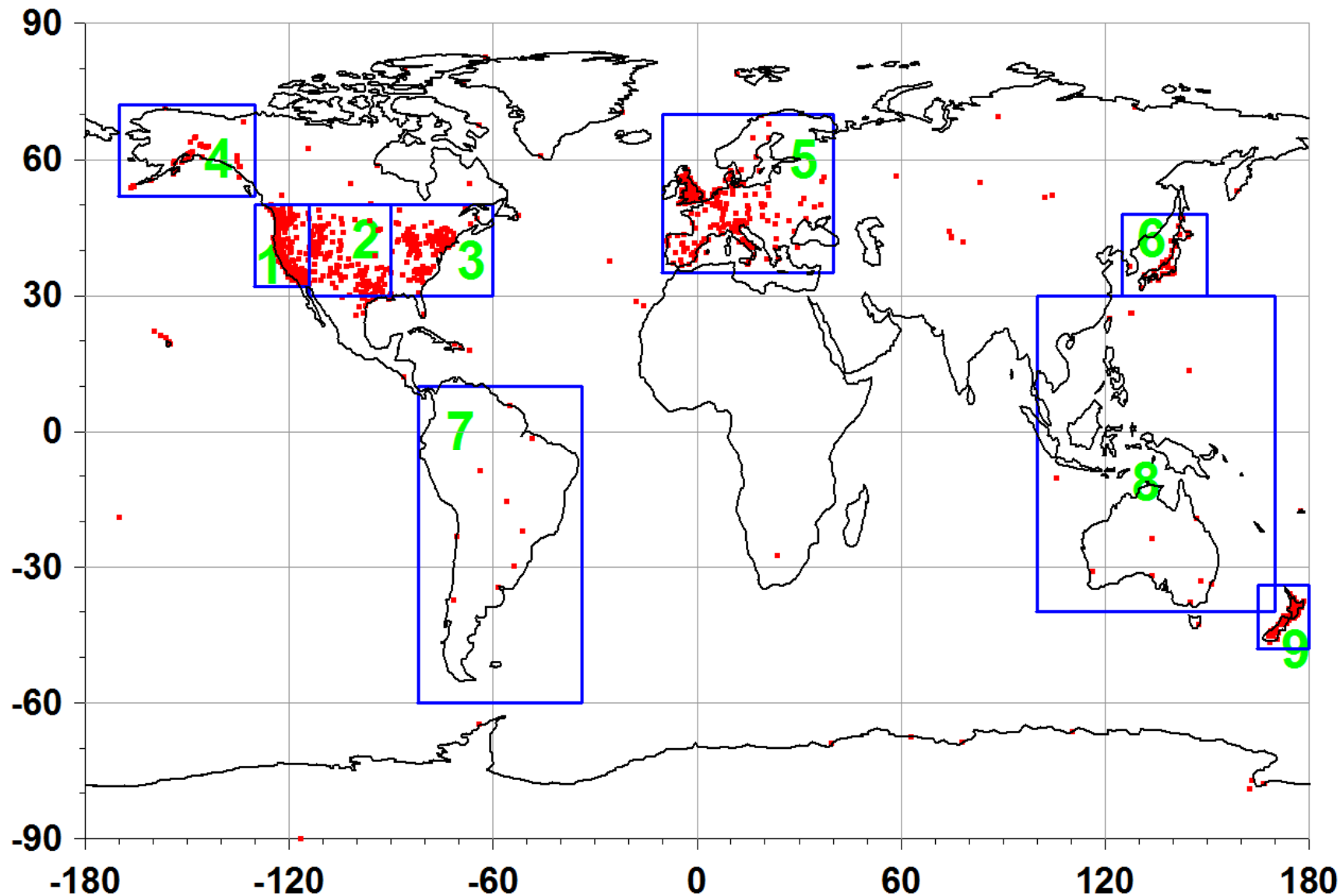
Прямая оценка спектра когерентности между временным рядом приращений LOD и первой главной компонентой средних ежесуточных свойств глобального сейсмического шума в скользящем временном окне 365 суток выделила **временной интервал максимальной когерентности 2002-2004 гг.** Когерентность сосредоточена **в узкой частотной полосе с центральным периодом около 13 суток**.

Можно выдвинуть гипотезу о том, что всплеск меры нестационарного поведения LOD в середине 2002 года был **триггером, запустившим активизацию сильнейших сейсмических событий**, начавшейся с Суматранского мега-землетрясения 26.12.2004. **Низкочастотные вариации LOD с периодом около 2.4 года могут быть причиной модуляции корреляционных свойств сейсмического шума и естественных флуктуаций сейсмической опасности.**

Собственный шум Земли в очень низкочастотном диапазоне: временные ряды GPS с шагом по времени 1 сутки.

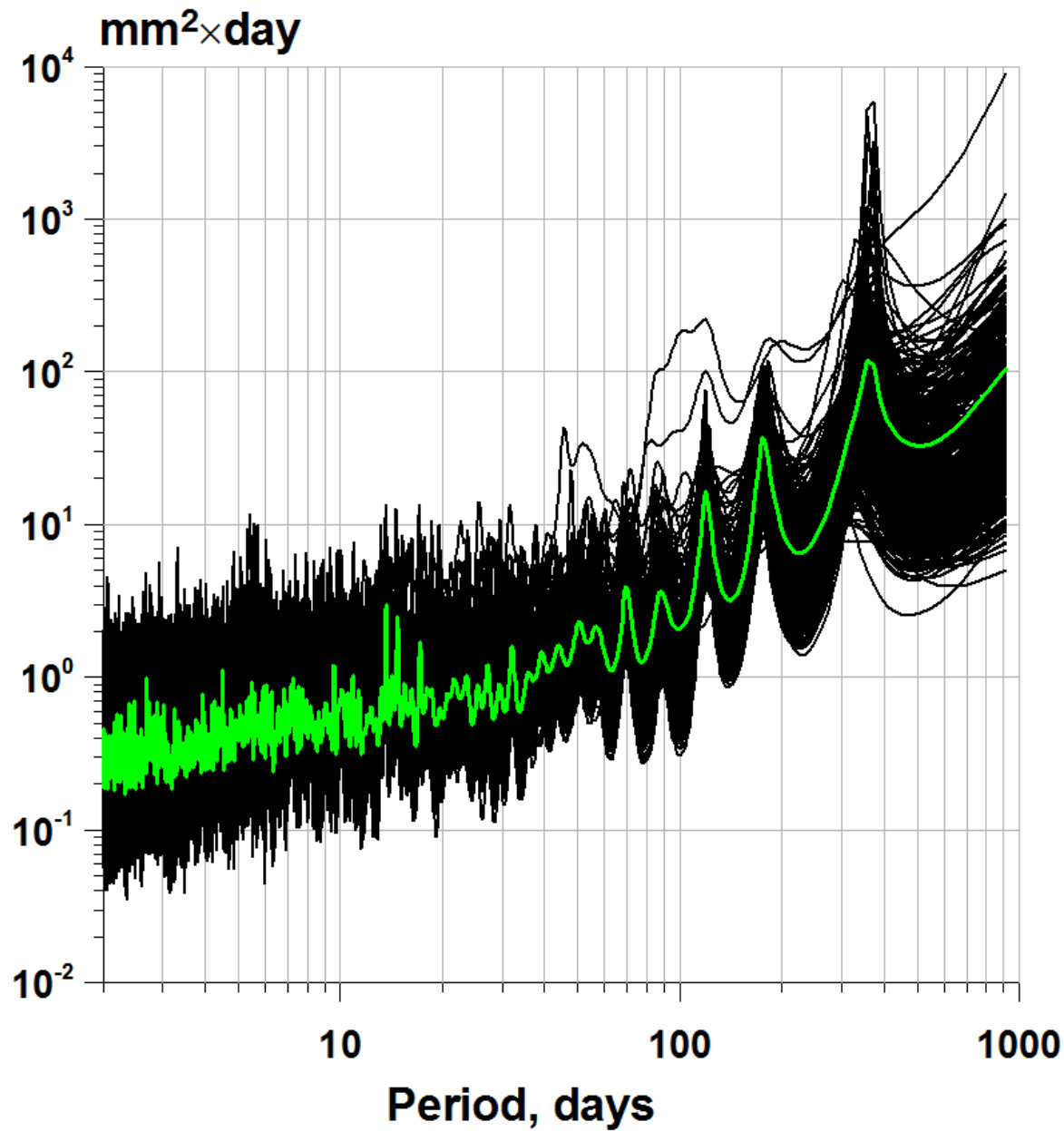
Возможны ли нестационарные эффекты глобальной синхронизации дрожи земной поверхности для периодов от нескольких суток до полугода?

Красные точки представляют положения 1191 станций GPS с трех-компонентными ежесуточными временными рядами смещений земной поверхности длиной по 4384 отсчета от 10.05.2006 по 11.05.2018 (12 лет) с пропуском число которых не превышает 360 значений. Голубые линии выделяют 9 регионов, данные из которых использовались для оценок. Данные загружены с сайта: http://gf9.ucs.indiana.edu/daily_rdahmmexec/daily



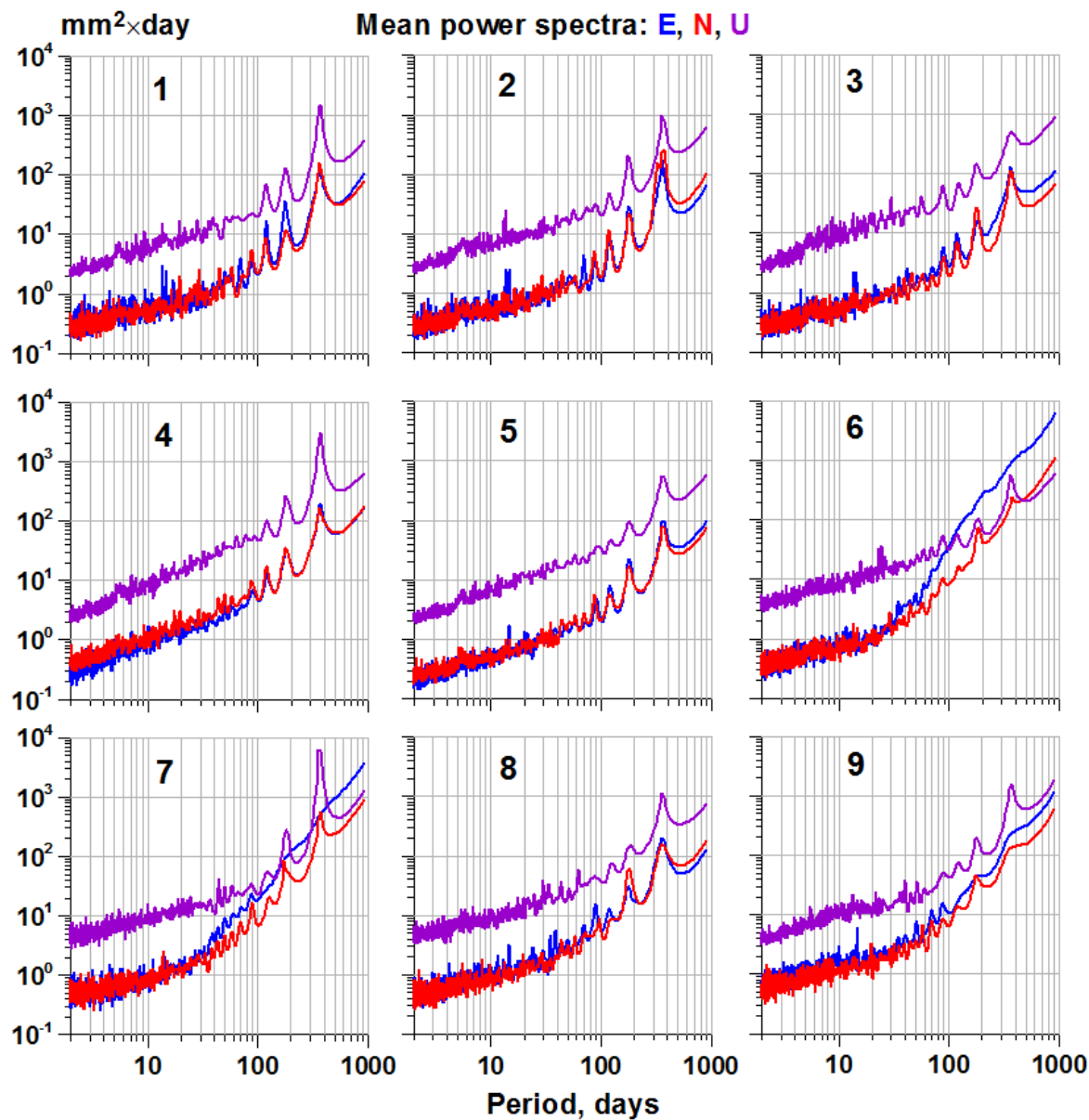
#	Domain	Minimum latitude, deg.	Maximum latitude, deg.	Minimum longitude, deg.	Maximum longitude, deg.	Number of stations
1	West USA	32	50	-130	-114	427
2	Middle USA	30	50	-114	-90	161
3	East USA	30	50	-90	-60	153
4	Alaska	52	72	-170	-130	37
5	Europe	35	70	-10	40	209
6	Japan	30	48	125	150	30
7	South America	-60	10	-82	-34	9
8	Australia	-40	30	100	170	12
9	New Zealand	-48	-34	165	180	59

Параметры 9 выбранных регионов



**Оценка спектров
мощности ежесуточных
временных рядов GPS
для компоненты E для
региона West USA.**

**Зеленая линия –
средний спектр
мощности всех 427
временных рядов.**



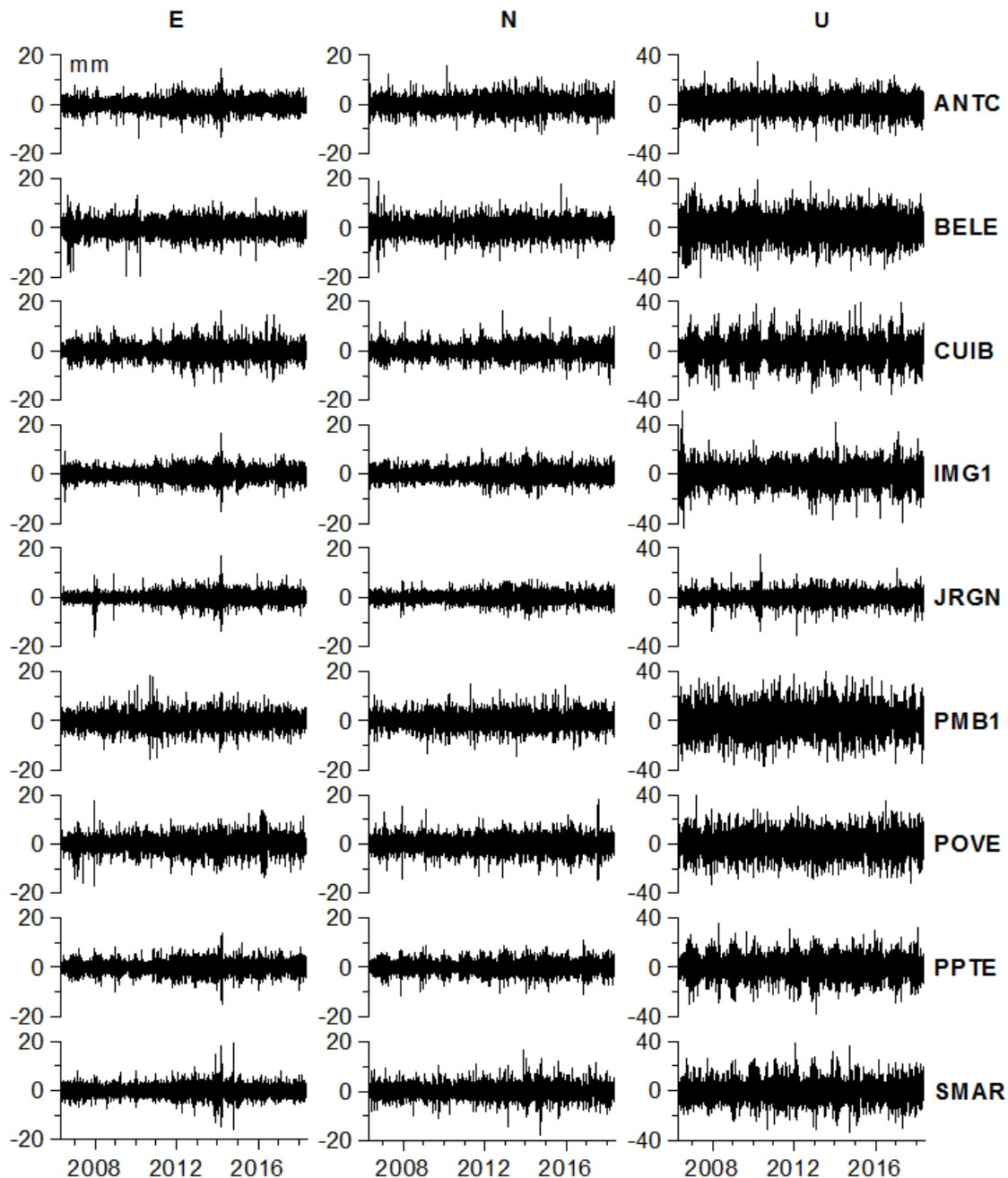
Графики средних спектров мощности для всех 9 выбранных регионов.

Синие линии – спектры компоненты E; красные – компоненты N, пурпурные – компоненты U.

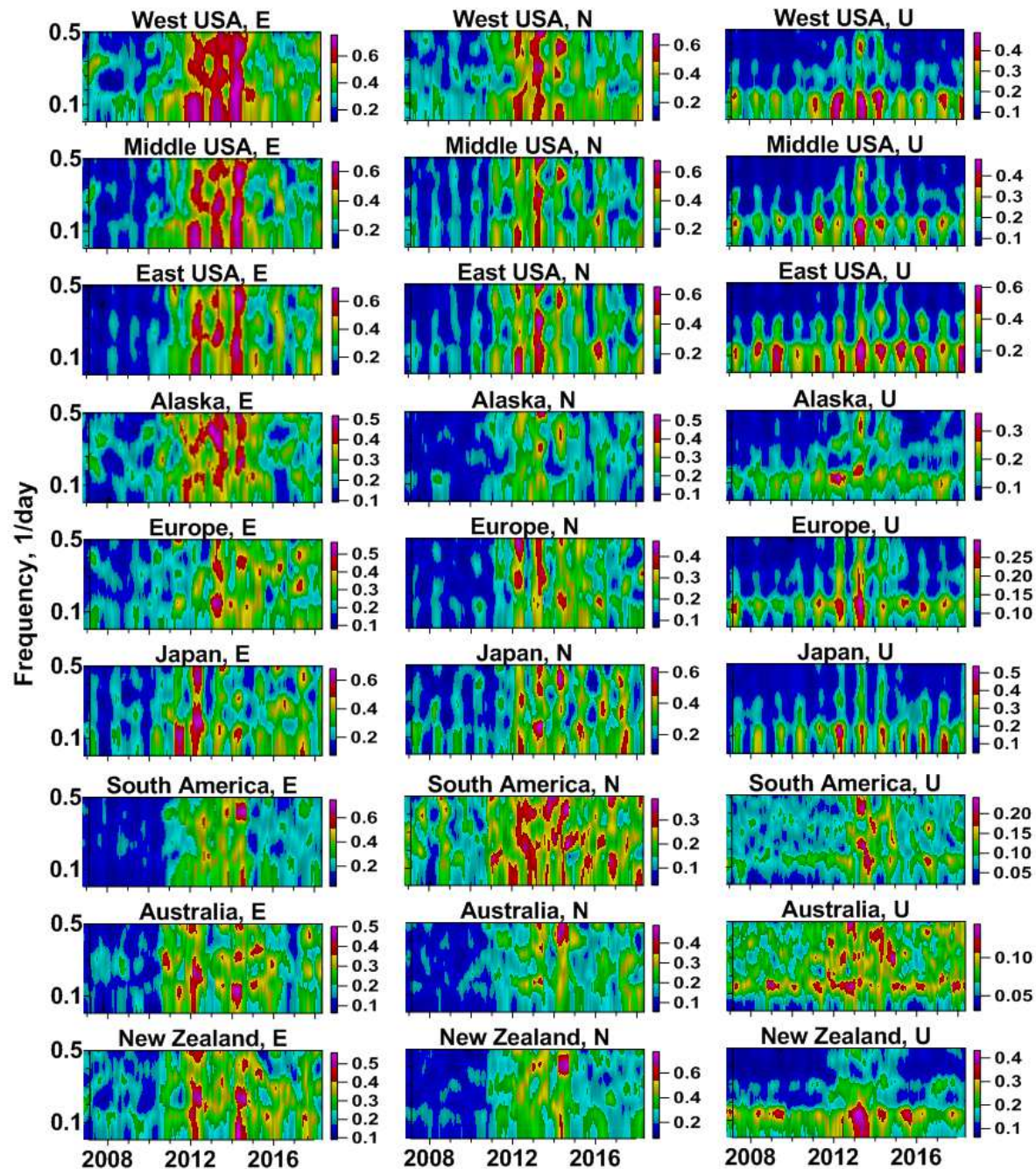
Обычно средний спектр вертикальной компоненты U больше спектров горизонтальных компонент E и N.

Однако обращает на себя внимание аномальное поведение средних спектров мощности для компоненты E (синие линии) для областей #6 (Япония) и #7 (Южная Америка).

Именно в этих областях произошли мега-землетрясения Тохоку (11.03.2011, Япония) и Мауле (27.02.2010, Чили).



Примеры анализируемых данных: 8 записей приращений ежесуточных временных рядов GPS для 3-х компонент для 9 станций в регионе «Южная Америка».



ω - frequency,

τ - right-hand end of moving window,

$k, j = 1, \dots, q$ - number of time series.

Spectral matrix 2×2 :

$$S^{(k,j)}(\tau, \omega) = \begin{pmatrix} S_k(\tau, \omega) & S_{kj}(\tau, \omega) \\ S_{jk}(\tau, \omega) & S_j(\tau, \omega) \end{pmatrix}$$

Squared by-pairs coherence spectrum:

$$\gamma_{kj}^2(\tau, \omega) = \frac{|S_{kj}(\tau, \omega)|^2}{S_k(\tau, \omega) \cdot S_j(\tau, \omega)}$$

Mean squared coherence:

$$\varphi(\tau, \omega) = \frac{\sum_{k=2}^q \sum_{j=1}^{k-1} \gamma_{kj}^2(\tau, \omega)}{q \cdot (q-1) / 2}$$

Частотно-временные диаграммы средней квадратичной попарной когерентности для 9 регионов и для 3 компонент. Оценки в скользящем временном окне длиной 182 суток со смещением 28 суток. Зависимости от частоты и правого положения скользящего временного окна.

Выделение скачка среднего уровня с помощью отношения Фишера

Найдем точку t_c резкого изменения (скачка) среднего значения сигнала $\xi(t)$ с использованием отношения Фишера, взятого из дисперсионного анализа. Вычислим среднее значение сигнала $\xi(t)$ по всему временному интервалу:

$$\bar{\xi}_0 = \sum_{t=1}^N \xi(t) / N$$

где N – полное число отсчетов. Также вычислим средние значения сигнала справа и слева от пробной точки скачка t_c :

$$\bar{\xi}_1 = \sum_{t=1}^{t_c} \xi(t) / t_c \quad \text{и} \quad \bar{\xi}_2 = \sum_{t=t_c+1}^N \xi(t) / (N - t_c).$$

Точку скачка t_c определим из условия:

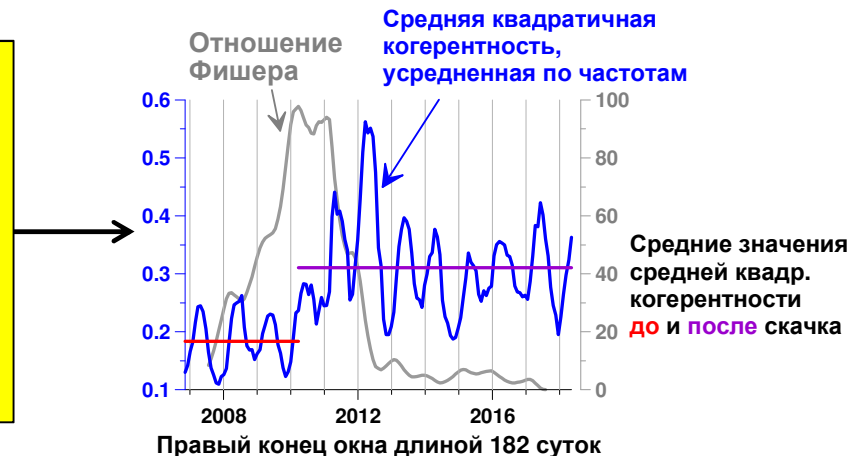
$$F(t_c) = S_1^2(t_c) / S_2^2(t_c) \rightarrow \max_{t_c},$$

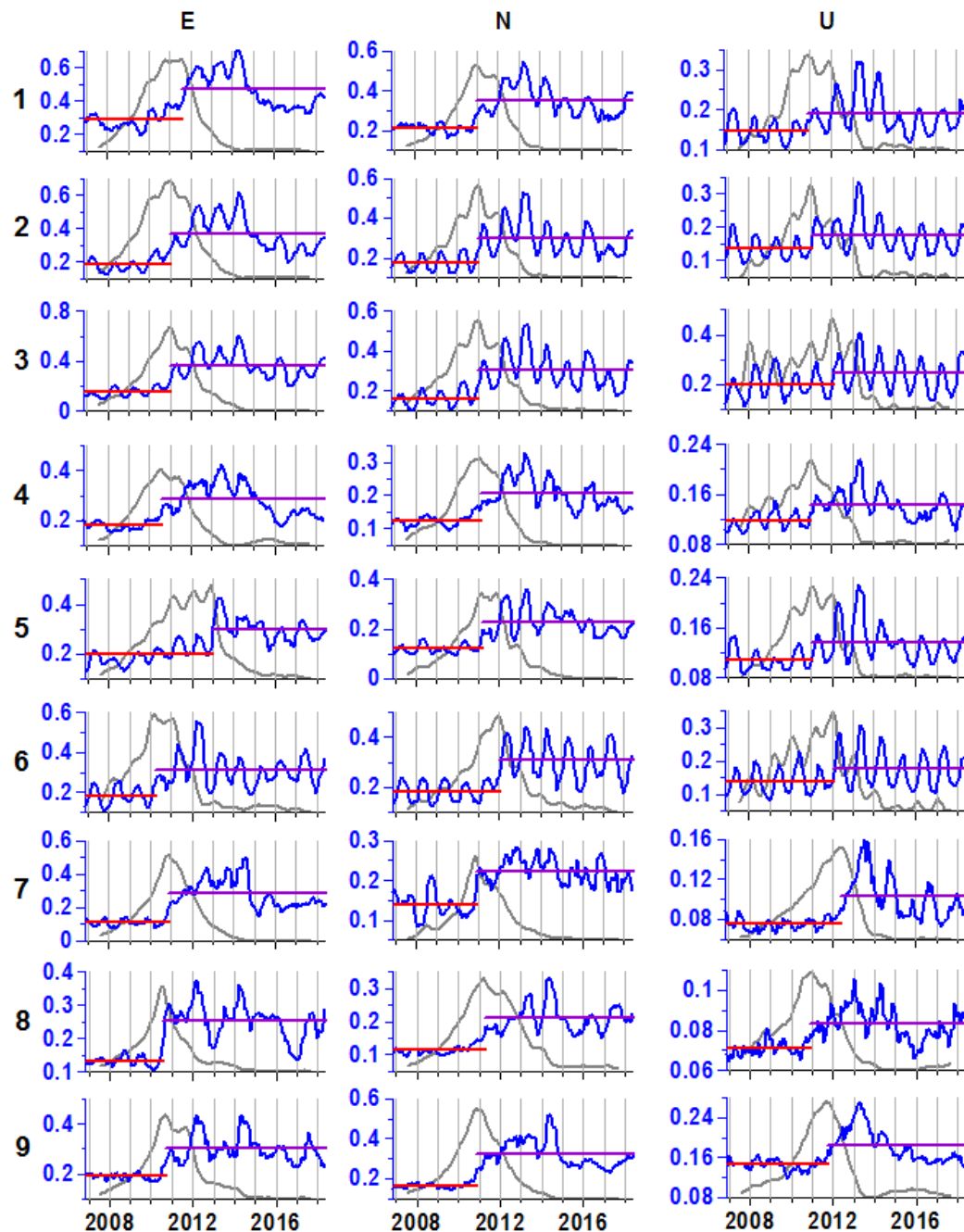
где:

$$S_1^2(t_c) = t_c \cdot (\bar{\xi}_1 - \bar{\xi}_0)^2 + (N - t_c) \cdot (\bar{\xi}_2 - \bar{\xi}_0)^2,$$

$$S_2^2(t_c) = \left(\sum_{t=1}^{t_c} (\xi(t) - \bar{\xi}_1)^2 + \sum_{t=t_c+1}^N (\xi(t) - \bar{\xi}_2)^2 \right) / (N - 2)$$

Пример для Японии, компонента E, выделение момента времени скачка среднего значения средней квадратичной когерентности





$$\rho(\tau) = \sum_{\omega} \varphi(\tau, \omega) / N_{\omega}$$

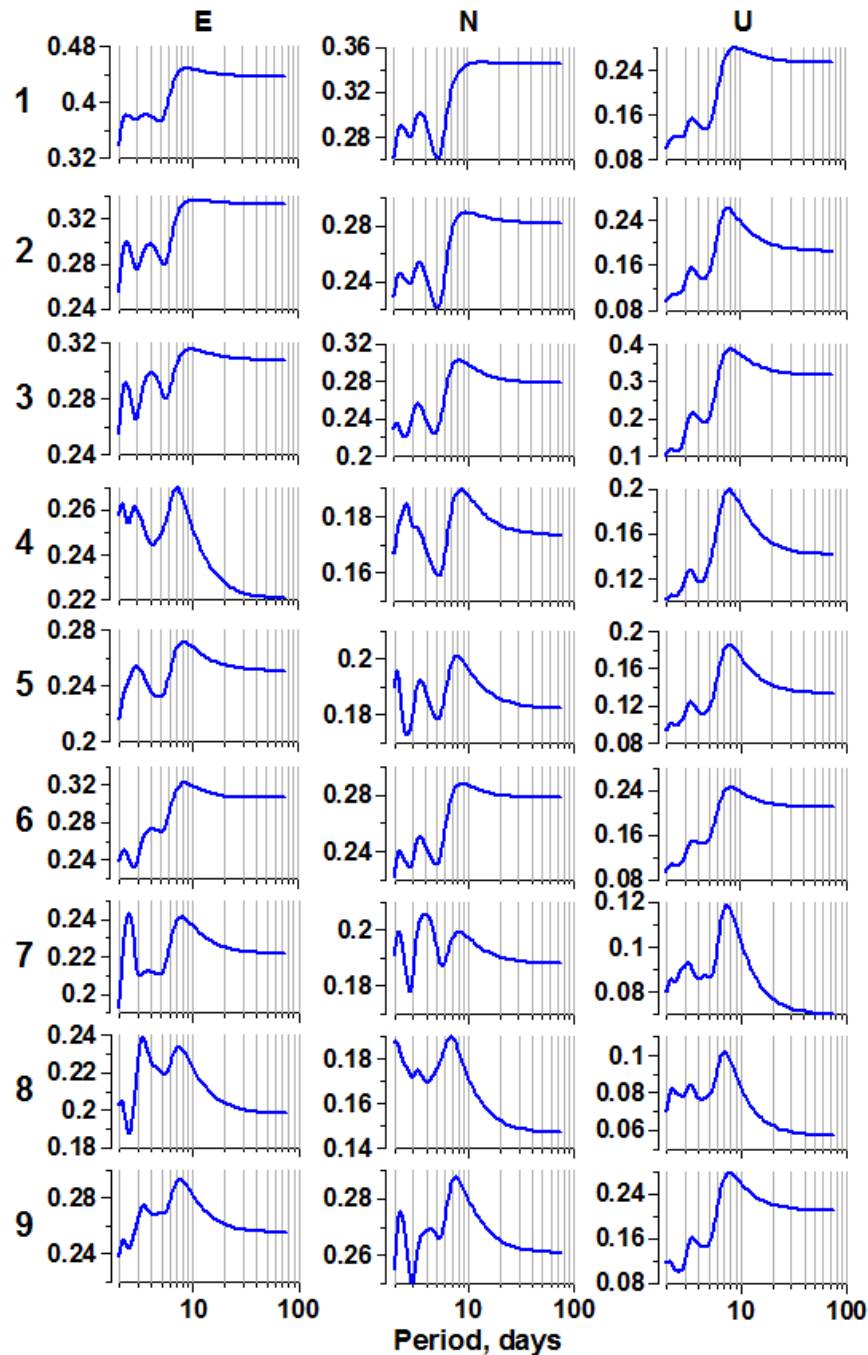
Синие линии – значения средней попарной квадратичной когерентности, усредненной по всем частотам в каждом окне для всех регионов и для всех компонент GPS. Зависимости даны от положения правого конца скользящего временного окна длиной 182 суток.

Красные и пурпурные горизонтальные линии – средние значения попарных квадратичных когерентностей до и после скачков средних уровней, определенных из условия максимума отношения Фишера.

Серые линии – графики отношения Фишера в зависимости от положения пробной точки скачка среднего уровня.

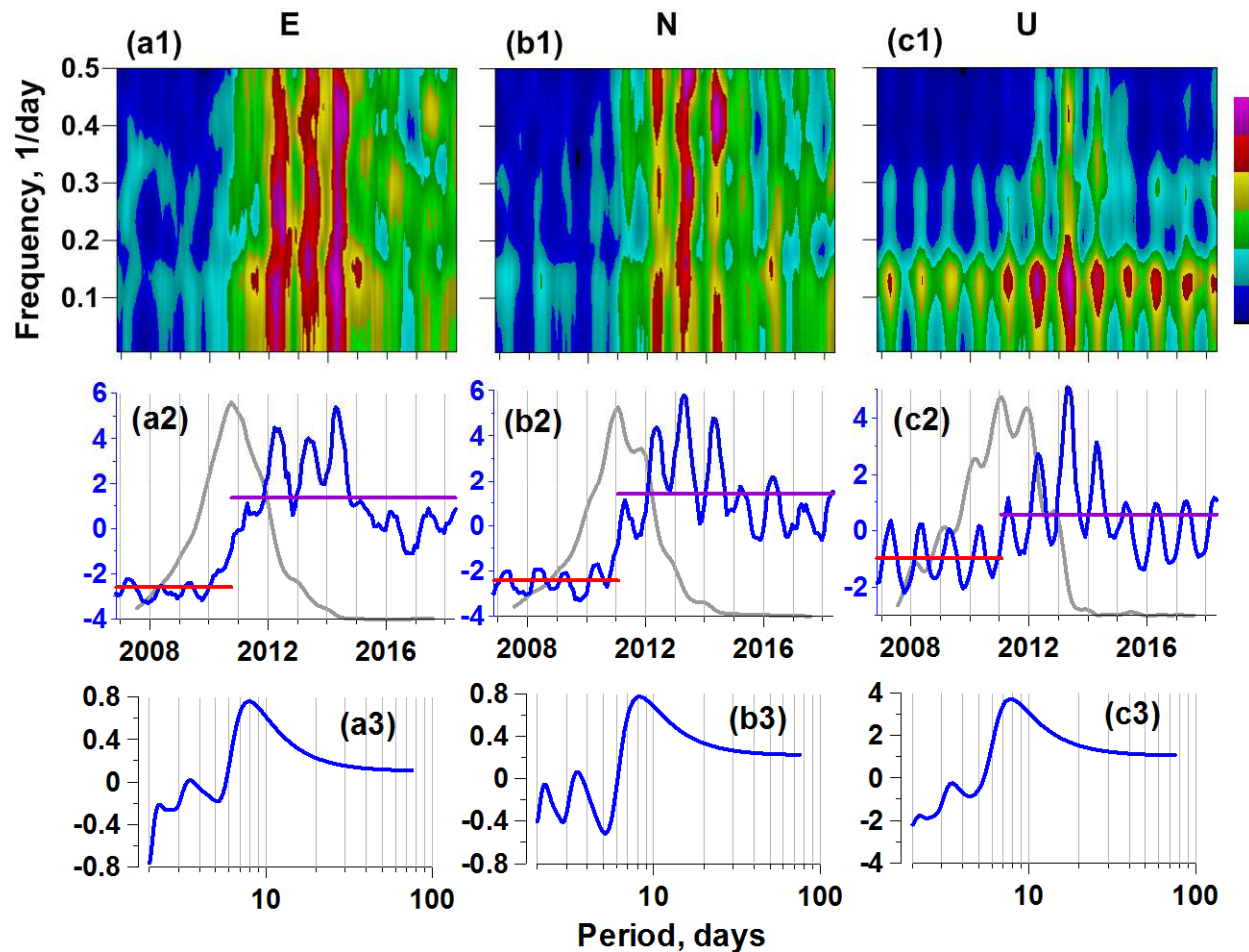
Таблица выделенных моментов времени скачков среднего уровня средней попарной квадратичной когерентности в зависимости от положения правого конца скользящего временного окна длиной 182 суток.

Domain	E	N	U
West USA	2011.531	2010.918	2010.841
Middle USA	2010.918	2010.994	2010.994
East USA	2010.918	2010.994	2012.067
Alaska	2010.534	2011.071	2010.918
Europe	2012.911	2011.148	2010.994
Japan	2010.228	2011.991	2011.991
South America	2010.841	2010.841	2012.374
Australia	2010.534	2011.224	2010.841
New Zealand	2010.688	2010.841	2011.684



$$\psi(\omega) = \sum_{\tau} \varphi(\tau, \omega) / N_{\tau}$$

Графики частотно-зависимой средней квадратичной когерентности после усреднения по всем положениям скользящих временных окон для всех 9 рассматриваемых регионов и для всех 3-х компонент временных рядов GPS.



(a1-c1) – первые частотно-временные главные компоненты средних квадратичных когерентностей, вычисленные для всех регионов и для каждой компоненты временных рядов GPS. (a2-c2), синие линии – графики первой главной компоненты после усреднения по всем частотам; серые линии – графики отношения Фишера; красные и пурпурные горизонтальные линии – средние значения слева и справа от точки скачка, определенной из условия максимума отношения Фишера. Все графики на (a1-c1) и (a2-c2) даны в зависимости от положения правого конца скользящего временного окна длиной 182 суток. Временные точки резкого изменения средних уровней: для (a2) – **2010.764**; для (b2) and (c2) – **2011.071**. (a3), (b3) и (c3) – графики частотно-зависимых первых главных компонент после усреднения по всем временным окнам. **Периоды максимумов – 7-9 суток.**

Выводы по анализу когерентности низкочастотной дрожи земной поверхности:

Основываясь на результатах анализа когерентности шумовых составляющих ежедневных трехкомпонентных временных рядов GPS на почти 1200 станциях за 12 лет измерений, обнаружено, что в течение 2010-2011 годов наблюдался значительный рост среднего уровня когерентности поверхностного тремора с доминирующими периодами 7-9 дней в 9 областях Земли, а в некоторых из этих регионов средний уровень когерентности по-прежнему высок и не возвращается на предыдущий уровень.

Ранее был показан эффект увеличения синхронизации параметров глобальных низкочастотных сейсмических шумов после мега-землетрясения на Суматре в конце 2004 года, после чего активизировались сильнейшие землетрясения по всему миру. Можно предположить, что обнаруженный эффект увеличения когерентности низкочастотных данных GPS связан с общим процессом синхронизации собственного шума Земли, который наблюдается в настоящее время.

Некоторые публикации по теме:

Lyubushin A.A. (2009) Synchronization Trends and Rhythms of Multifractal Parameters of the Field of Low-Frequency Microseisms - Izvestiya, Physics of the Solid Earth, 2009, Vol. 45, No. 5, pp. 381-394. <http://link.springer.com/article/10.1134%2FS1069351309050024>

Lyubushin A.A. (2010) The Statistics of the Time Segments of Low-Frequency Microseisms: Trends and Synchronization - Izvestiya, Physics of the Solid Earth, 2010, Vol. 46, No. 6, pp. 544-554. <http://link.springer.com/article/10.1134%2FS1069351310060091>

Lyubushin A. (2010) Multifractal Parameters of Low-Frequency Microseisms // V. de Rubeis et al. (eds.), Synchronization and Triggering: from Fracture to Earthquake Processes, GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences 1, DOI 10.1007/978-3-642-12300-9_15, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010, 388p., Chapter 15, pp.253-272. http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-12300-9_15

Lyubushin, A. (2012) Prognostic properties of low-frequency seismic noise. Natural Science, 4, 659-666.doi: 10.4236/ns.2012.428087. <http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?paperID=21656>

Lyubushin, A. (2013) How soon would the next mega-earthquake occur in Japan? Natural Science, Vol.5, No.8A1, 1-7. doi: 10.4236/ns.2013.58A1001. <http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=35770>

Lyubushin A.A. (2014) Dynamic estimate of seismic danger based on multifractal properties of low-frequency seismic noise. Natural Hazards, January 2014, Volume 70, Issue 1, pp 471-483. DOI 10.1007/s11069-013-0823-7. <http://link.springer.com/article/10.1007%2FS11069-013-0823-7>

Lyubushin A.A. (2014) Analysis of Coherence in Global Seismic Noise for 1997-2012. Izvestiya, Physics of the Solid Earth, 2014, Vol. 50, No. 3, pp. 325-333, ISSN 106-3513. <http://link.springer.com/article/10.1134%2FS1069351314030069>

Lyubushin A.A. (2015) Wavelet-based coherence measures of global seismic noise properties - Journal of Seismology, April 2015, Volume 19, Issue 2, pp 329-340. doi 10.1007/s10950-014-9468-6. <http://link.springer.com/article/10.1007/s10950-014-9468-6>

Lyubushin A.A. (2016) Coherence between the Fields of Low-Frequency Seismic Noise in Japan and California - Izvestiya, Physics of the Solid Earth, 2016, Vol. 52, No. 6, pp. 810-820, doi: 10.1134/S1069351316050086. <http://link.springer.com/article/10.1134/S1069351316050086>

Filatov D.M., A.A. Lyubushin (2017) Fractal analysis of GPS time series for early detection of disastrous seismic events, Physica A, Volume 469, 1 March 2017, Pages 718-730, <http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2016.11.046>

Lyubushin A.A. (2017) Long-range coherence between seismic noise properties in Japan and California before and after Tohoku mega-earthquake. - Acta Geodaetica et Geophysica, 2017, 52:467-478, DOI 10.1007/s40328-016-0181-5. <http://dx.doi.org/10.1007/s40328-016-0181-5>

Любушин А.А. (2018) Циклические свойства сейсмического шума и проблема прогнозируемости сильнейших землетрясений на Японских островах - Геофизические процессы и биосфера, 2018, т.17, № 3, С.62-77. DOI: 10.21455/GPB2018.3-4

Lyubushin A. (2018) Synchronization of Geophysical Fields Fluctuations // Tamaz Chelidze, Luciano Telesca, Filippos Vallianatos (eds.), Complexity of Seismic Time Series: Measurement and Applications, Elsevier 2018, Amsterdam, Oxford, Cambridge. Chapter 6. P.161-197. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813138-1.00006-7>

Lyubushin A. (2018) Global coherence of GPS-measured high-frequency surface tremor motions. GPS Solutions. October 2018, 22:116. <https://doi.org/10.1007/s10291-018-0781-3>