

# **Обобщенная окрестность сильного землетрясения: снижение уровня осреднения**

**М.В.Родкин**

## Проблематика

Сценарии развития бифуркаций в разных природных системах схожи. Одним из примеров развития бифуркации является случай возникновения землетрясений, возможно, наиболее изученный из-за его практического значения и количества доступных данных.

Некоторые признаки сейсмической нестабильности, выявленные по сейсмологическим данным, затем были использованы в других областях. И, наоборот, некоторые признаки развития бифуркации из физики критических явлений были перенесены в сейсмологию.

Анализу сценария развития бифуркации сильного землетрясения препятствует огромная случайная составляющая сейсмического процесса. Для преодоления этой трудности был представлен и использован метод построения обобщенной окрестности сильного землетрясения (ООСЗ) (Родкин, 2008; 2012; Rodkin, 2020; Rodkin, Tikhonov, 2016; Родкин, 2020 и др.). От близких по постановке работ других авторов метод ООСЗ отличается суммированием данных по максимально возможному числу окрестностей и проведением нормировки на размер очага соответствующего главного события.

За счет объединения данных о сейсмическом режиме из окрестностей очень большого числа (до тысячи) отдельных сильных землетрясений метод ООСЗ дает возможность детально раскрыть типичный сценарий сейсмической неустойчивости. Робастность полученных результатов подкрепляется их единообразием при использовании разных каталогов и разных ограничений по магнитудам.

Но может, это средняя температура по больнице?

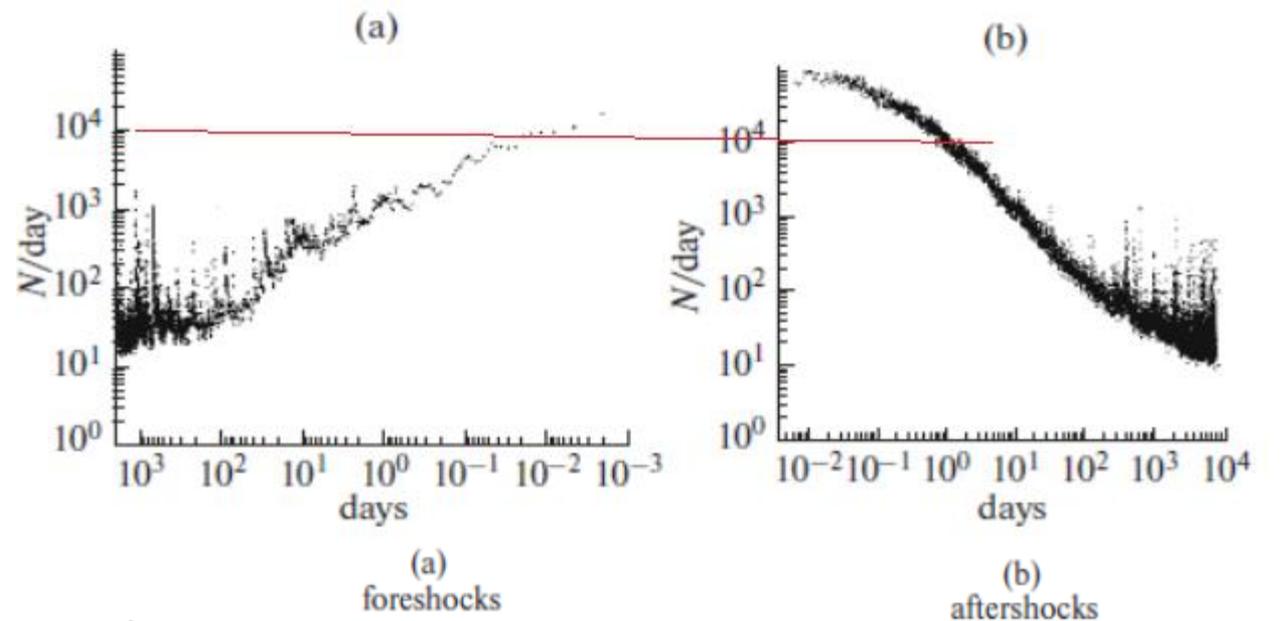
Возникает и другая проблема – сравнить характер процесса в разных ситуациях. Не только для землетрясений, но и для горных ударов, результатов экспериментов и модельных расчетов.

При применении метода ООСЗ к мировым данным некоторые особенности режима сглаживаются из-за перекрытия событий из разных сейсмических зон. Некоторые новые особенности были обнаружены при приложения ООСЗ к региональным данным Курильских островов и Камчатки. В том числе было обнаружено и исследовано существование кластеров в режиме основных событий.

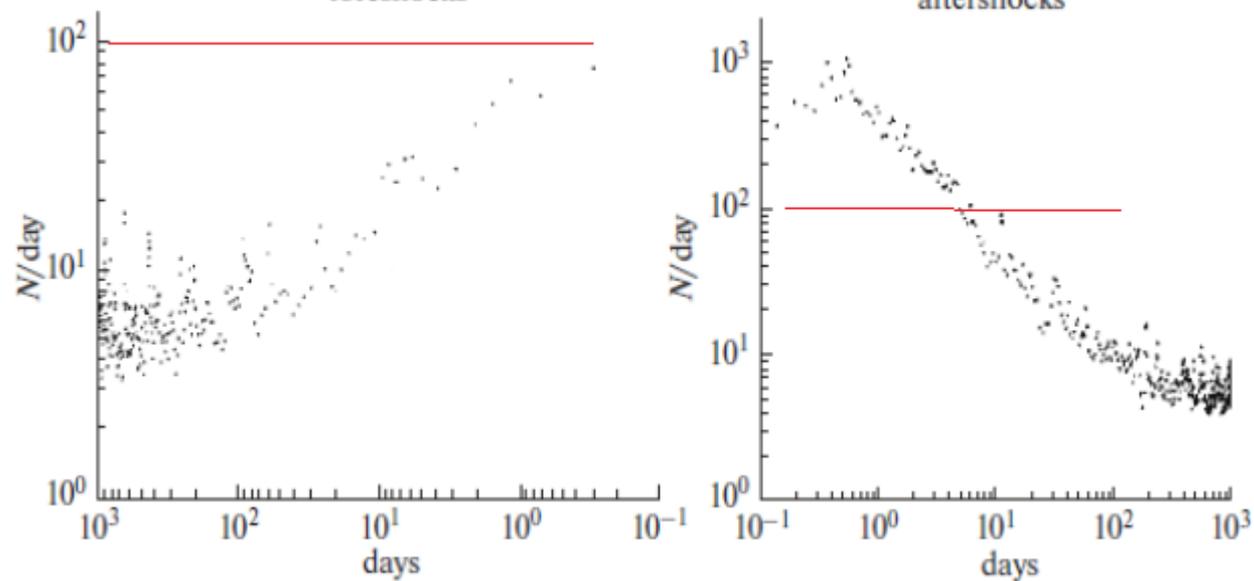
# ООСЗ: типичный режим фор- и афтершокового поведения

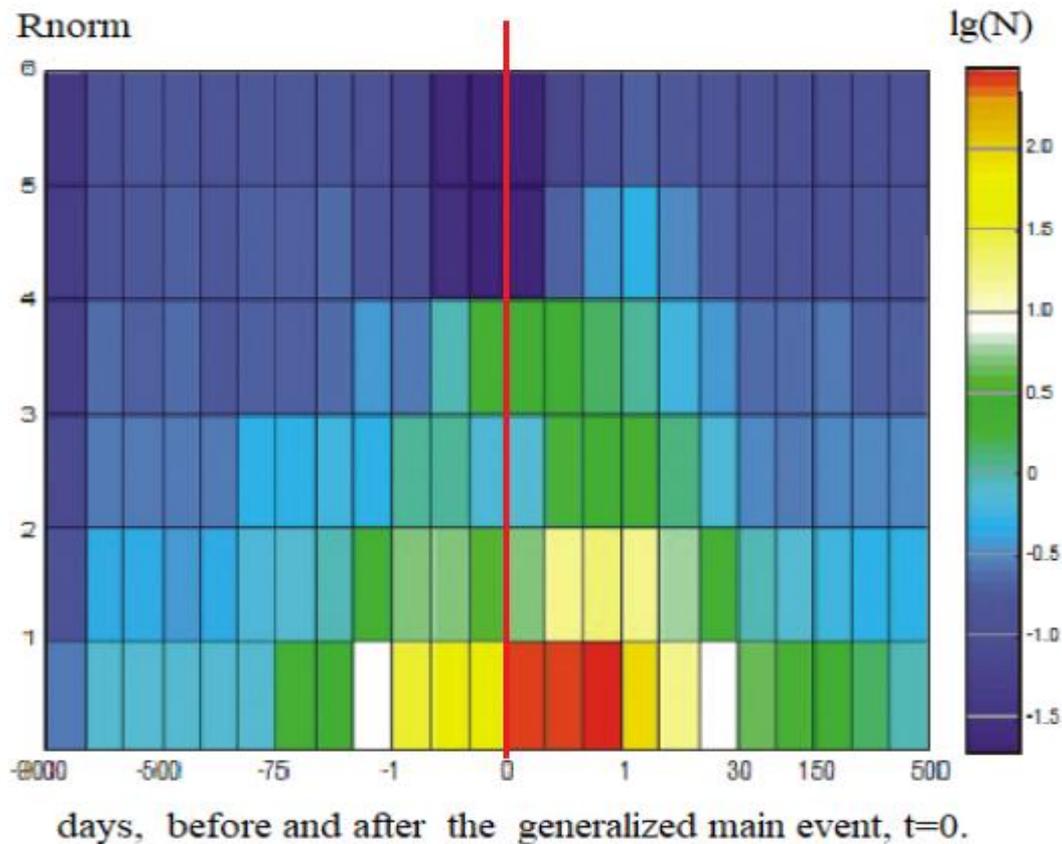
Режим фор- и афтершоков в ООСЗ:

ISC,  $M_b \geq 5.0$ ,  
1904-1917



GCMT,  $M_w \geq 5.4$ ,  
1976-2015





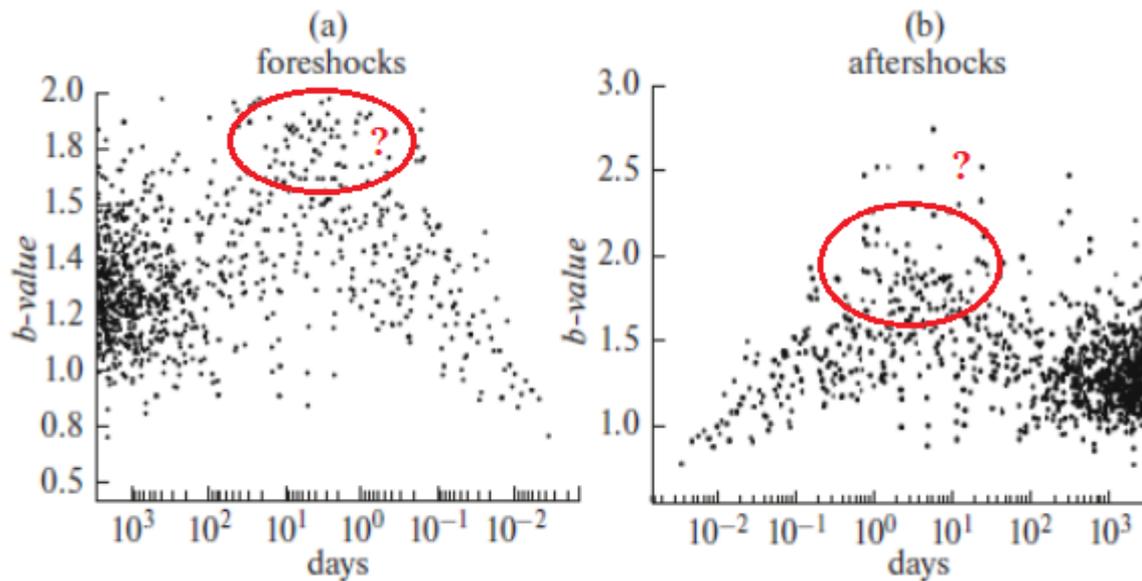
Расстояние от эпицентра  
основного события (ОСЗ)  
нормировано на размер очага  
этого главного события.  
Временная шкала без  
нормировки.

В обобщенной окрестности сильного землетрясения из-за наложения данных о сотнях сильных землетрясений режимы активации предвестников и каскада афтершоков видны достаточно четко, в частности, видна «зона тени» вокруг области активизации.

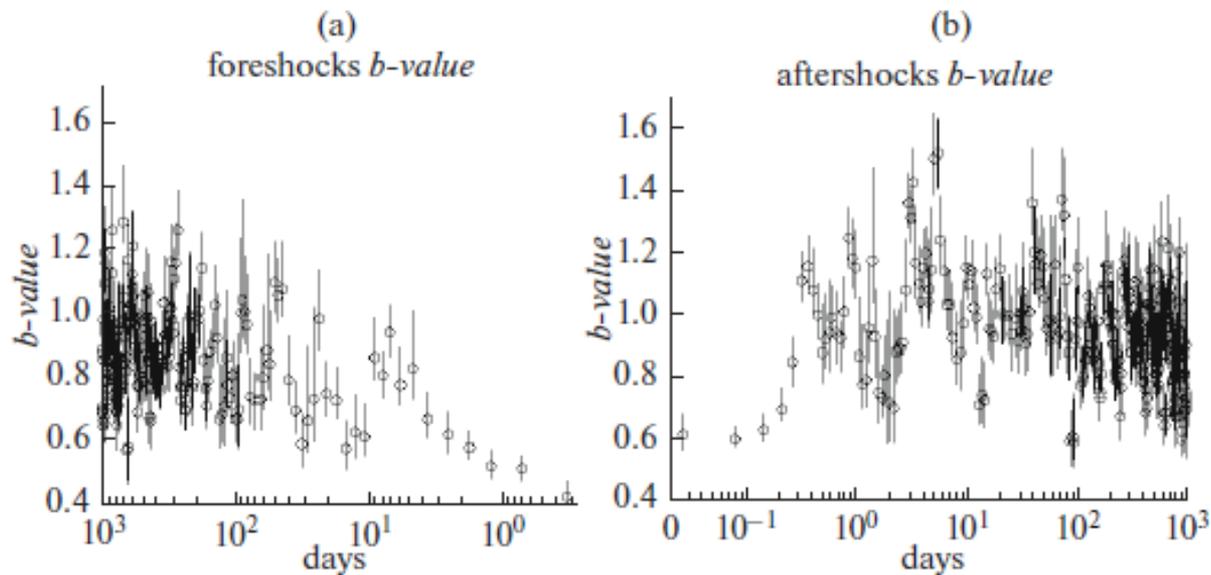
Можно видеть ДВЕ моды активизации: продолжительная монотонная (годы, до 10 лет) и краткая, лавинообразно нарастающая – в районе 100 дней.

Впервые на вероятность такого двойного предвестникового режима указывал Н.В.Шебалин.

## Примеры аномалий: - $b$ -value



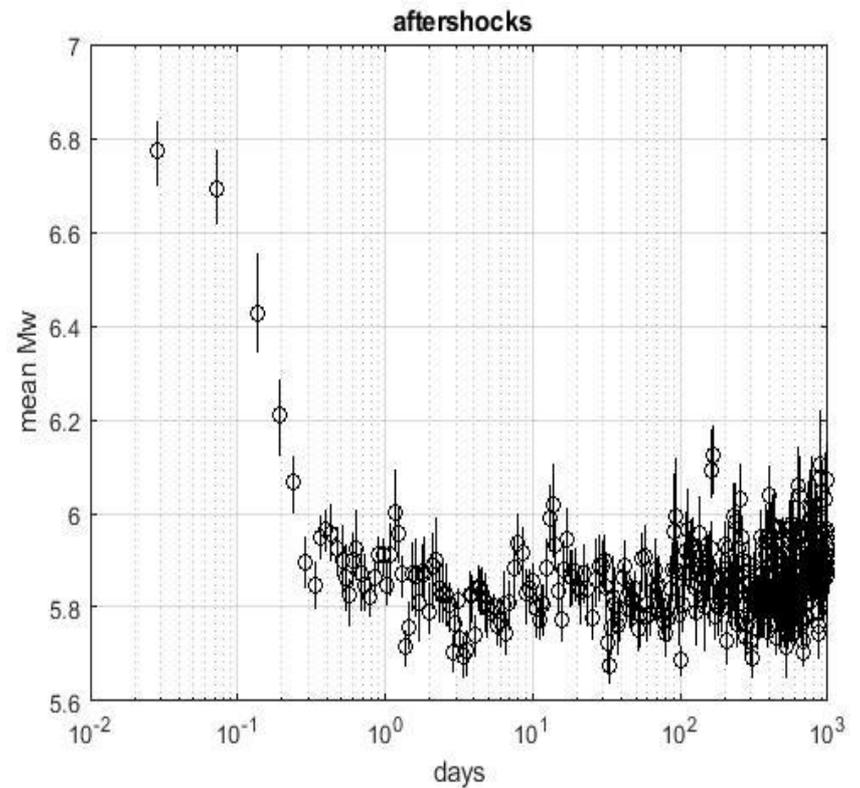
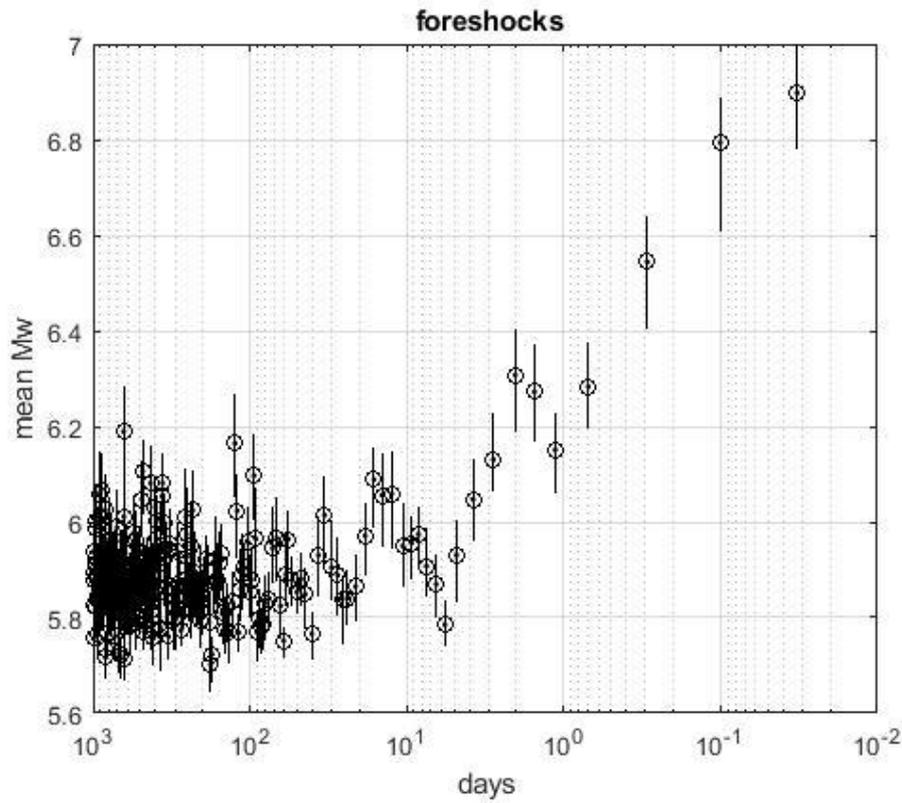
Тенденция изменений  $b$ -values в OOCЗ, форшоки (a), афтершоки (b), ISC.



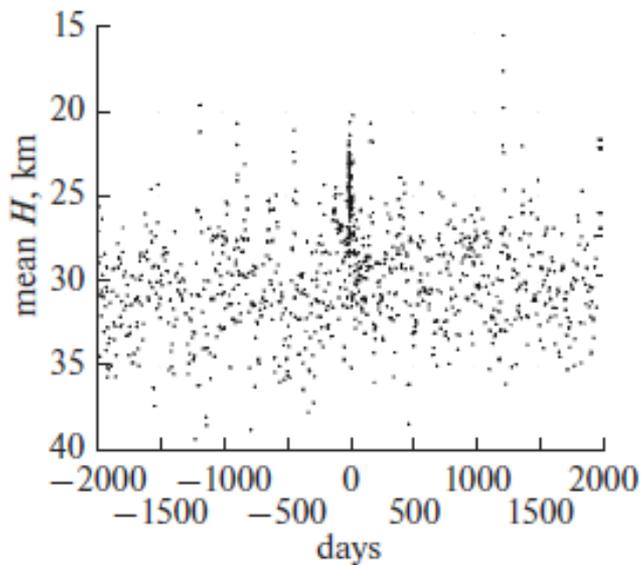
Тенденция изменений  $b$ -values в OOCЗ, форшоки (a), афтершоки (b), GCMT.

$$b\text{-value} = \lg(e) / (\text{mean}(M) - M_c). \quad (1)$$

Из (1) видно, что аналогом изменений  $b$ -value должны быть изменения среднего значения магнитуды.

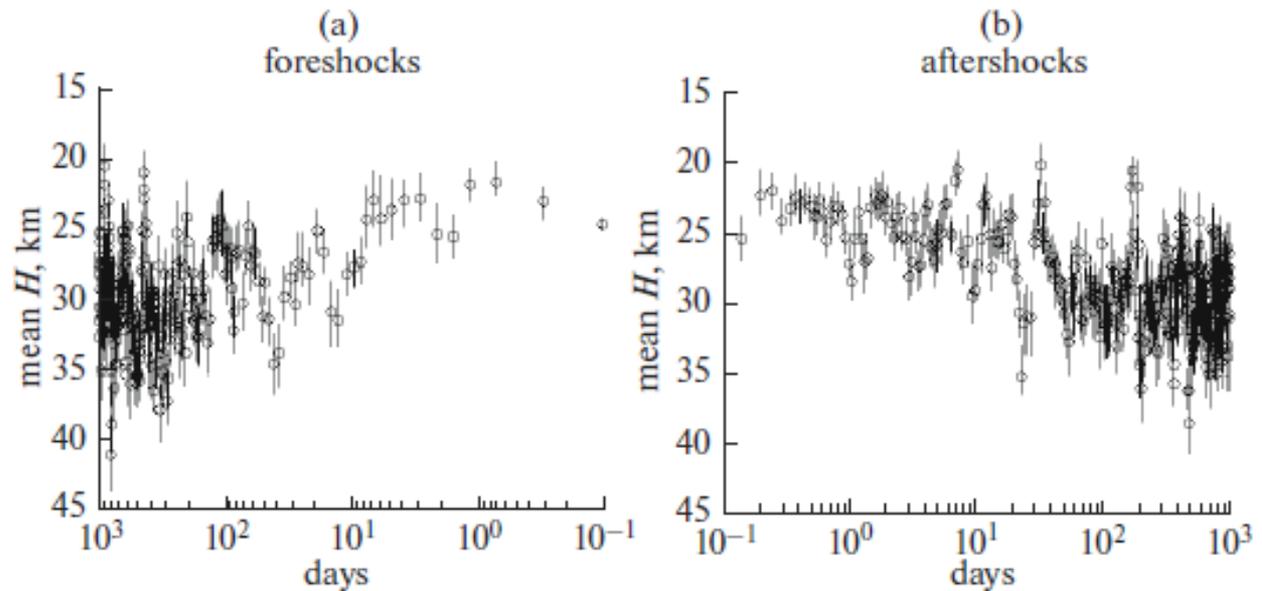


Средние значения ( $M_w \geq 5.4$ )  
форшоки (слева)  
афтершоки (вверху справа),  
**GCMT**



Изменения средней глубины землетрясений в ООСЗ – очаги «всплывают». Следствие развития трещиноватости, наличия флюидной фазы и ее прорыва по трещинам наверх?

ISC



Аналогично в логарифмическом масштабе по времени, форшоки (a), афтершоки (b), GCMТ

**Итак:**

**Анализ мировых каталогов землетрясений дает набор хорошо повторяющихся и взаимно согласованных типовых аномалий параметров сейсмического режима в областях предвестников и афтершоков сильных землетрясений.**

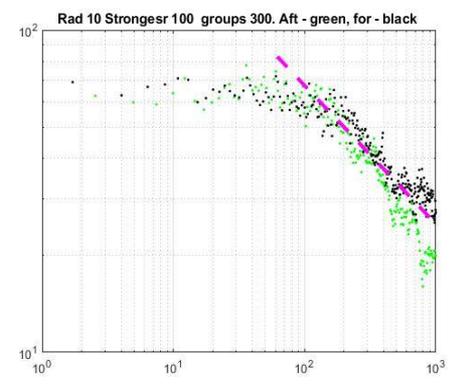
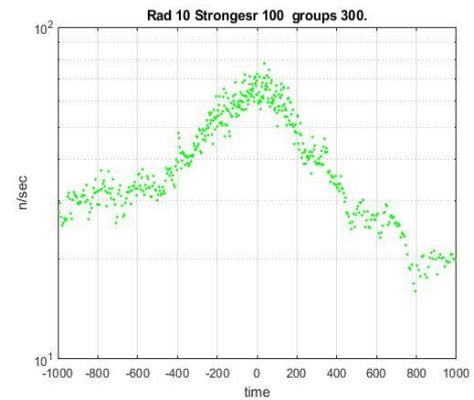
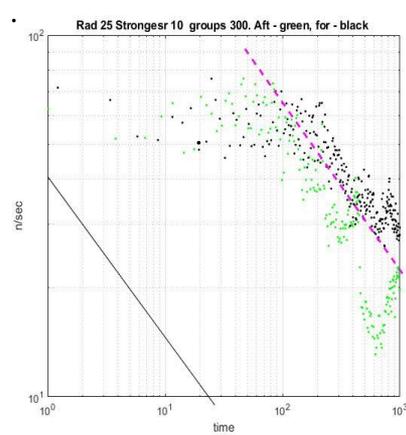
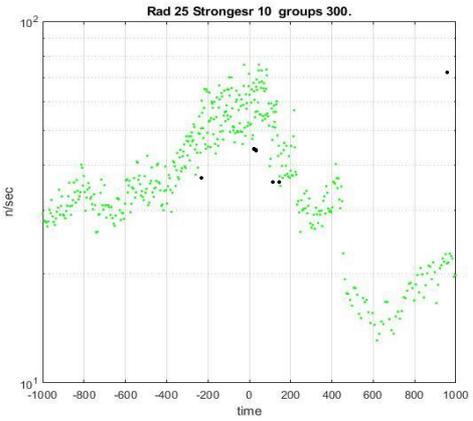
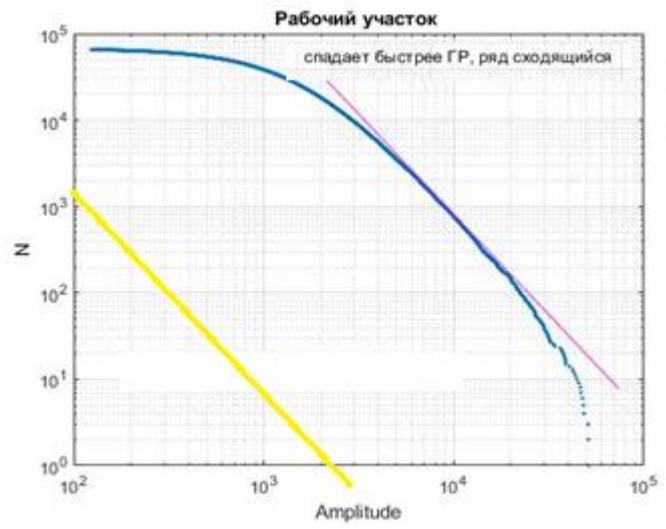
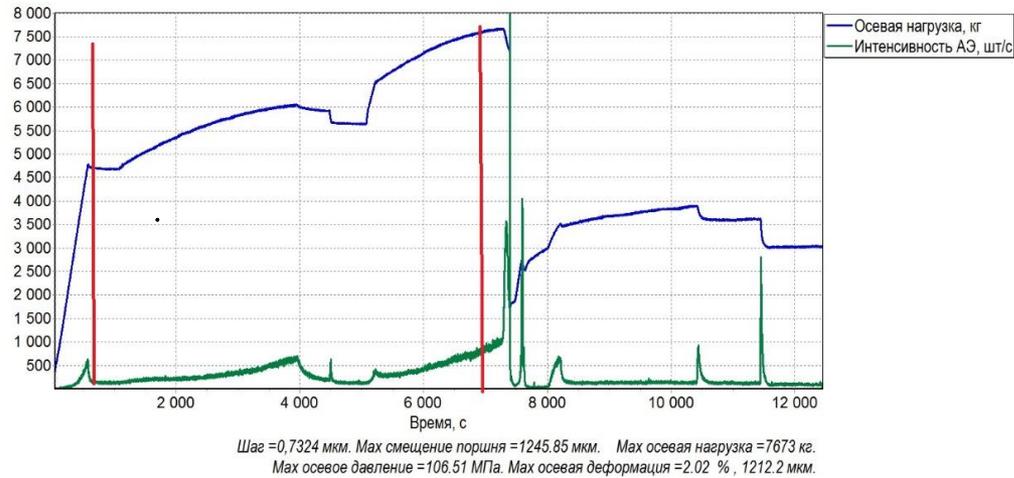
**Эти аномалии можно использовать в качестве идеальных изображений предвестникового и постшокового режима сейсмичности, в частности, для разработки и уточнения алгоритмов прогноза.**

**Можно предположить, что большинство этих аномалий (и других, не представленных здесь) применимы для анализа катастрофических событий разной природы, а не только для случая сильных землетрясений.**

**Теперь посмотрим, что дает подобный подход**

- 1) Для случаев горных ударов и АЭ**
- 2) По данным региональных каталогов землетрясений.**

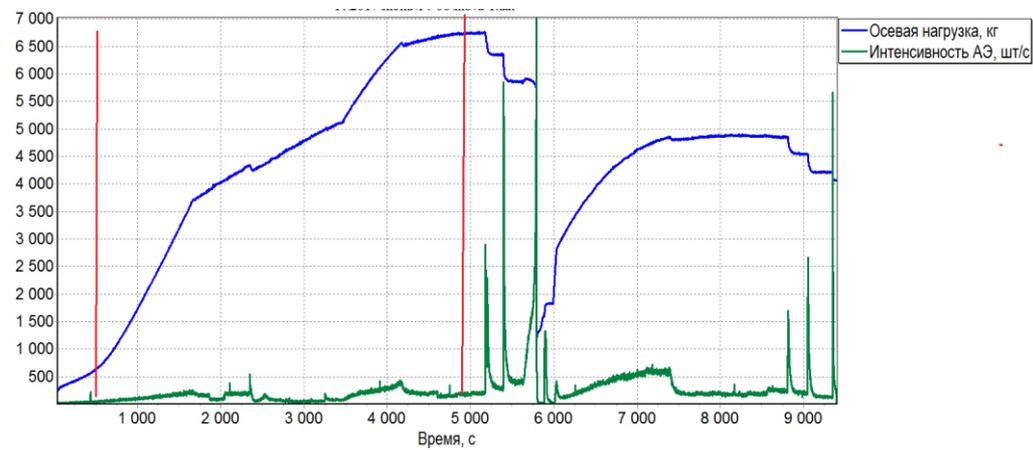
# АЭ эксперименты N 1. Удалось выявить фор- афтершоковый режим на сильные АЭ события.



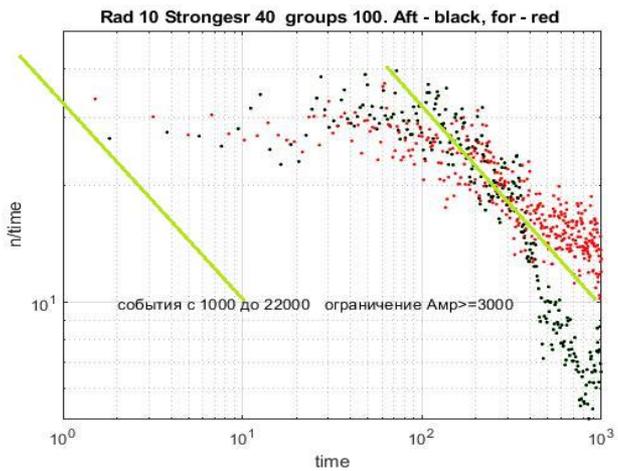
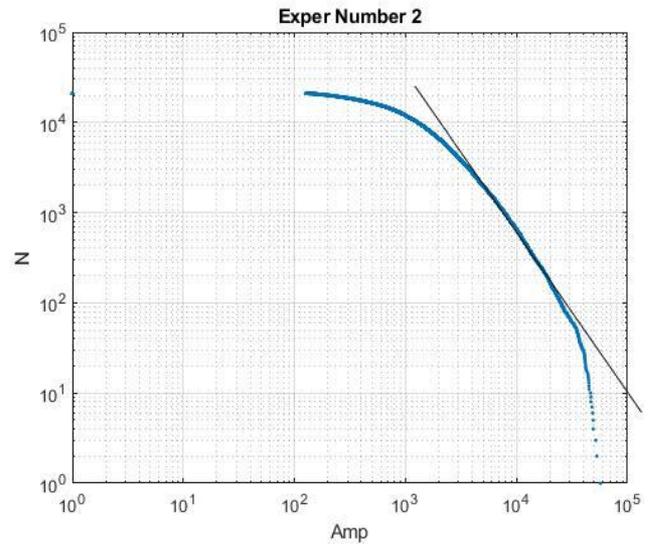
Как-бы **симметричный режим фор- и афтершоков**, нарастание-спадание к моменту обобщенного сильного события (ОСС) медленнее чем по закону Омори.  
**Форшоки выражены несколько сильнее афтершоков.** Проблема большого значения «с» параметра - возможно артефакт условий регистрации в эксперименте.

Данные и обсуждения – соавторы - А.В.Пономарев, А.В.Патонин, В.Б.Смирнов, Н.М.Шихова

# АЕ эксперименты, N 2. Подтверждение преддылшего



Шаг = 0,7324 мкм. Мах смещение поршня = 1344,73 мкм. Мах осевая нагрузка = 6774 кг.  
Мах осевое давление = 94,03 МПа. Мах осевая деформация = 2,21 %, 1323,6 мкм.

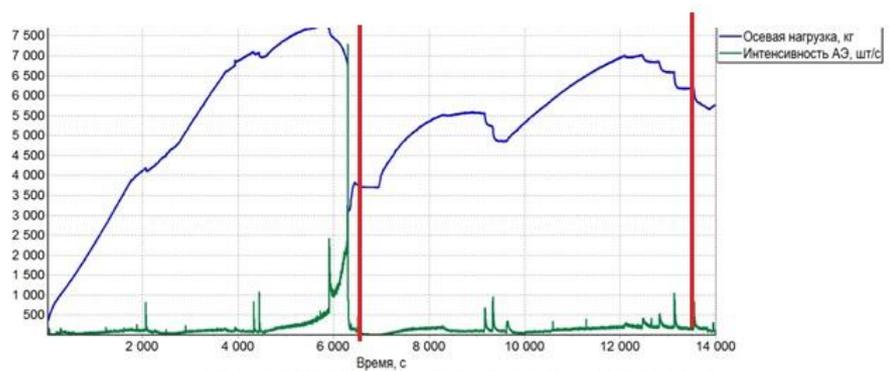


Симметричный режим фор- и афтершоков, нарастание-спадание к моменту обобщенного сильного события (ОСС) медленнее чем по закону Омори.

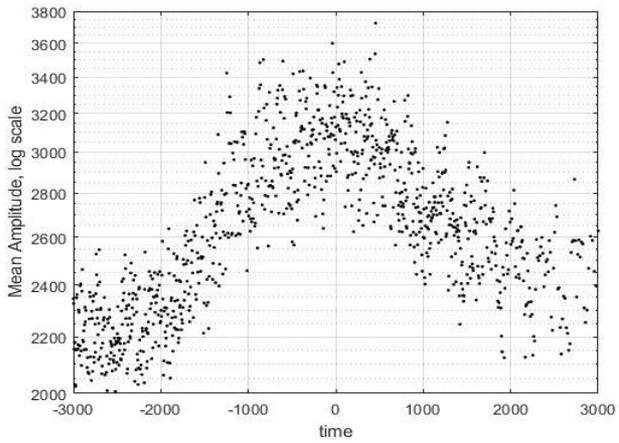
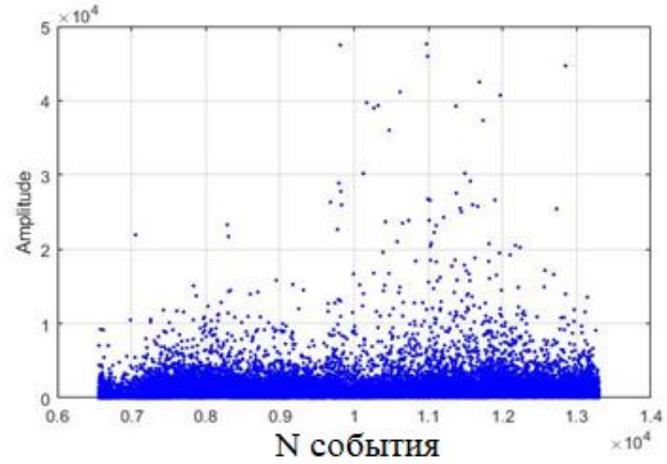
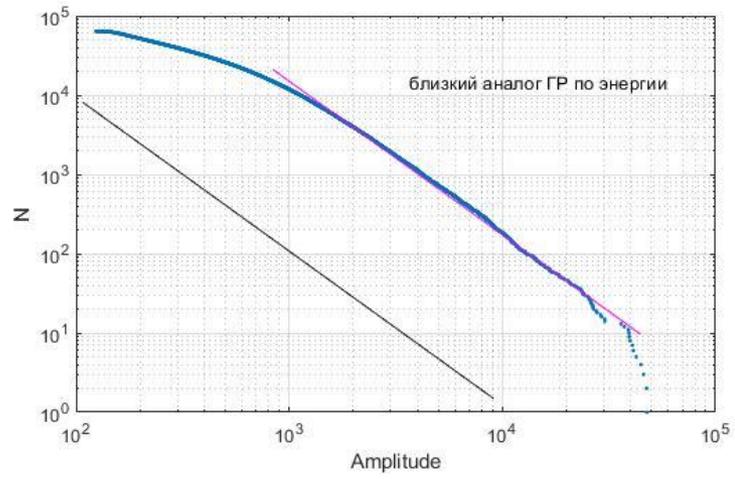
**Форшоки выражены несколько сильнее афтершоков.**

*Данные и обсуждения – А.В.Пономарев, А.В.Патонин, В.Б.Смирнов, Н.М.Шихова*

# АЭ эксперименты N 3



Шаг = 0,7324 мм. Max смещение поршня = 1427,49 мм. Max осевая нагрузка = 7752 кг.  
Max осевое давление = 107,61 МПа. Max осевая деформация = 2,26 %, 1358,6 мм.



Аналог аномалии b-value и среднего значения магнитуды в ООСЗ

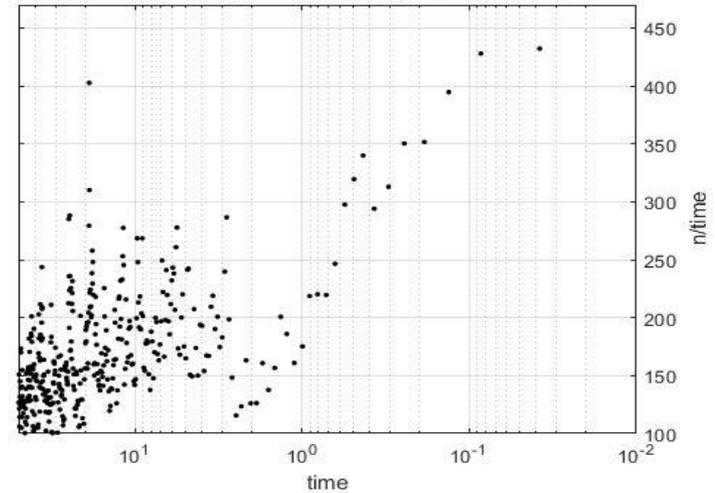
Симметричный режим фор- и афтершоков, нарастание-спадание к моменту обобщенного сильного события (ОСС) медленнее чем по закону Омори.

Возможен артефакт условий эксперимента – неполная регистрация импульсов АЭ на максимуме активности, пропуск преимущественно слабых событий.

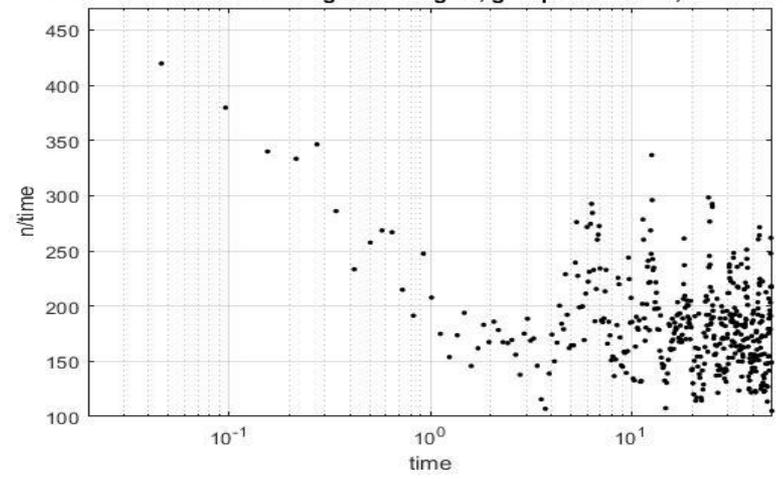
*Данные и обсуждения – соавторы - А. В. Пономарев, А.В. Патонин, В. Б. Смирнов, Н.М. Шихова*

# АЭ эксперименты N 4, 5

inovaDAT11072017 catalog. 300 strogest, groups 40 events, foreshocks

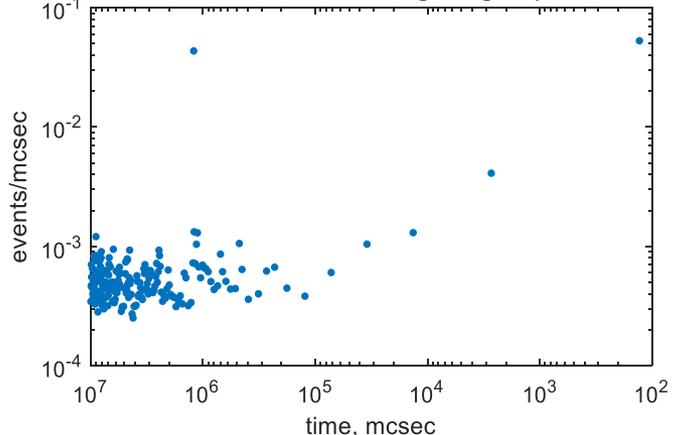


inovaDAT11072017 catalog. 300 strogest, groups 40 events, aftershocks

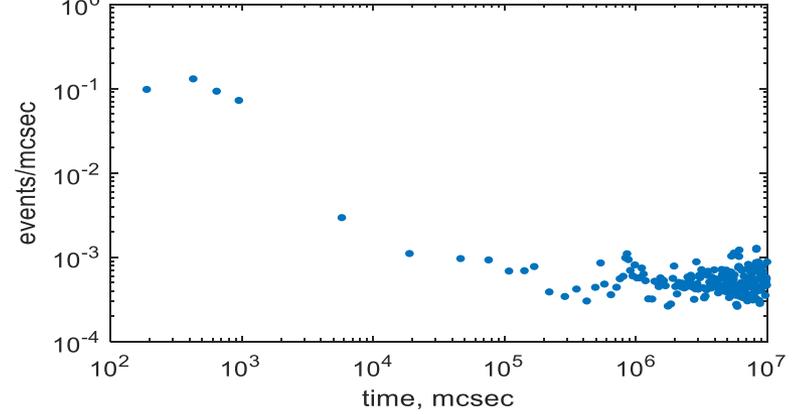


Результаты построения обобщенной окрестности сильного события по данным АЭ экспериментов (inovaDAT11072017), 300 сильнейших событий, группы по 40. Полученные данные указывают на последовательных по времени событий с шагом 20 событий. По базе данных типа «Каталог».

21052015. Forshocks, 20 strongest, groups 20 events



21052015. Afreshocks, 20 strongest, groups 20 events



Пример изменения потока событий для другого набора данных, по базе данных типа «Бюллетень».

**Наращение-спадание медленнее, чем по закону Омори**

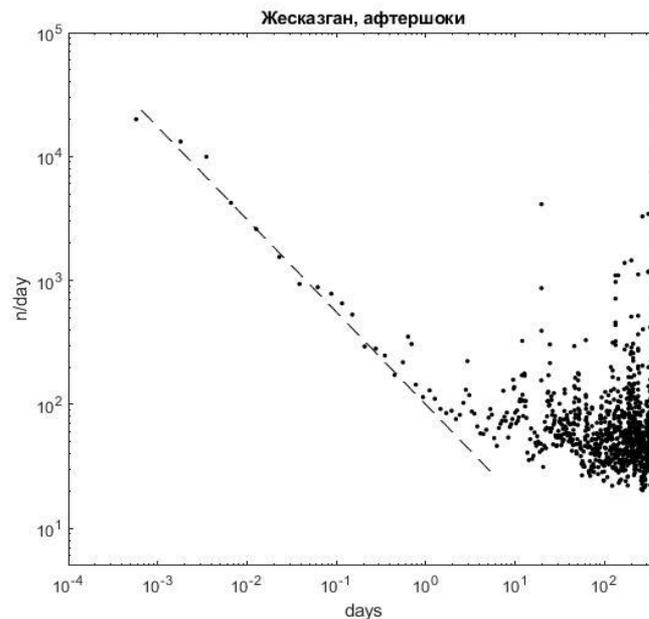
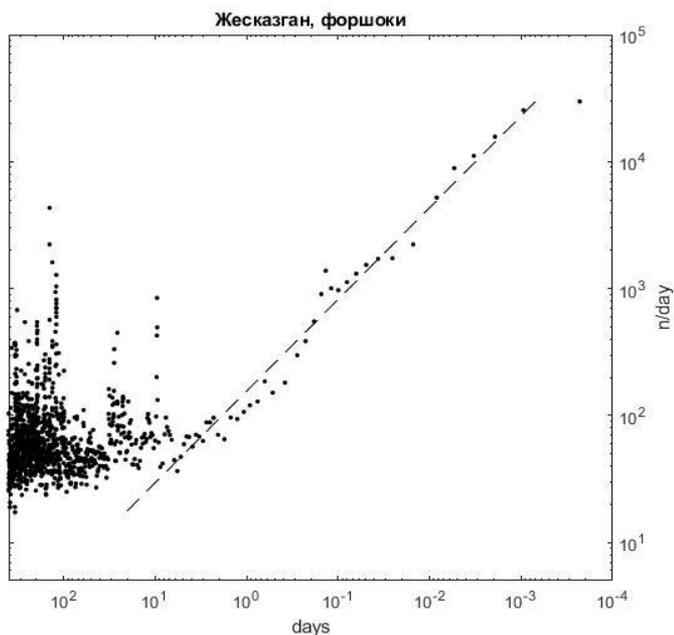
## Резюме по данным АЭ:

В целом - по данным АЭ - в отличие от случая землетрясений - наблюдается приблизительная симметричность режима фор- и афтершоковой активизации, даже при **несколько более сильной выраженности форшокового режима.**

Нарастание числа форшоков и спад числа афтершоков относительно главного события происходит несколько медленнее, чем в случае землетрясений (но это может быть и следствием перегрузки системы регистрации).

Сильнее, чем в случае землетрясений выражен дефицит числа поздних форшоков и ранних афтершоков. Но это также может быть следствием перегрузки системы регистрации импульсов АЭ в эксперименте.

# Горные удары, данные по району Жезказгана

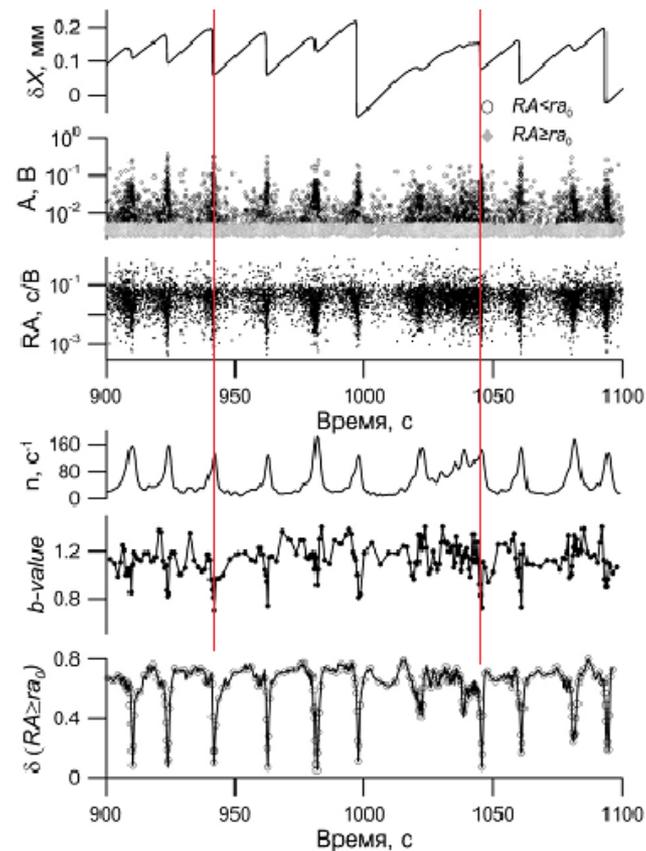
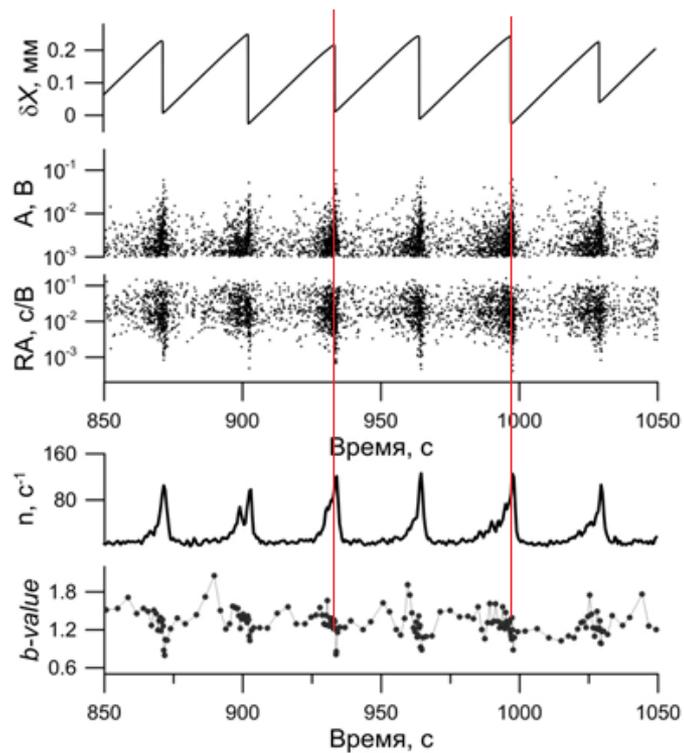
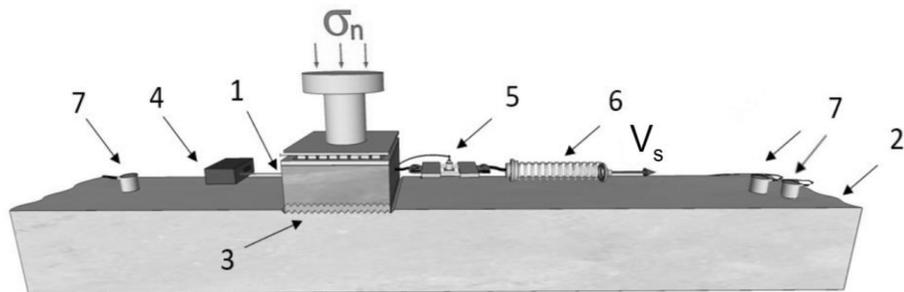


**Приведены данные для ООСС (сильного горного удара) для каталога горных ударов рудников Жезказгана. Видна симметрия развития фор- и афтершокового процесса.**

**Как известна в горном деле сложилась успешная практика минимизации потерь от горных ударов. Если, по результатам мониторинга, в некоторой области намечается активизация, то работы там временно прекращаются, ценное оборудование выводится, и ждут предполагаемого сильного события, после которого проводят необходимые ремонтные работы и возобновляют работу.**

***Такой возможности в случае землетрясений не наблюдается – форшоки выражены слабо.***

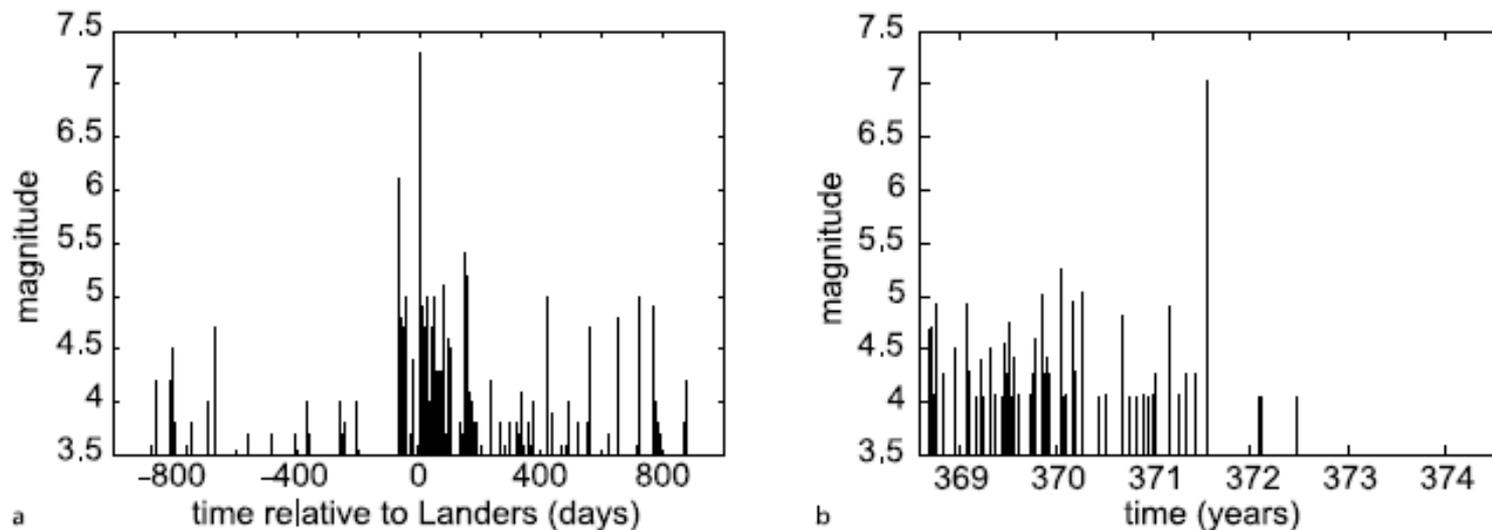
Каталог любезно передан В.И.Германом, главным сейсмологом ГПКК «Красноярский НИИ геологии и минерального сырья»



**А. А. Остапчук, Г. Г. Кочарян, К. Г. Морозова, Д. В. Павлов, Г. А. Гридин. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО СДВИГА В ТОНКОМ СЛОЕ ГРАНУЛИРОВАННОГО МАТЕРИАЛА. Физика Земли, 2021 (в печати).**

Сравнение типичных последовательностей проскальзываний для механической модели (справа) и реальной последовательности землетрясений. В модели наблюдается **спад числа проскальзываний после сильного события и сброса напряжений**.

В сейсмическом режиме – напротив – **ПОСЛЕ** сброса напряжений наблюдается всплеск афтершоков.



Seismicity, Critical States of: From Models to Practical Seismic Hazard Estimates Space, Figure 12

Earthquakes before and after a mainshock: **a** the *M*7.3 Landers (California) earthquake; **b** *M*7.3 earthquake in the basic version of the model

Zöller G., Hainzl S., Ben-Zion Y., Holschneider M. (2009) Seismicity, Critical States of: From Models to Practical Seismic Hazard Estimates Space. In: Meyers R. (eds) Encyclopedia of Complexity and Systems Science. Springer, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-30440-3\\_466](https://doi.org/10.1007/978-0-387-30440-3_466)

## **Результаты сопоставления:**

**Механическая модель - после сильного события и сброса напряжений наблюдается уменьшение активности.**

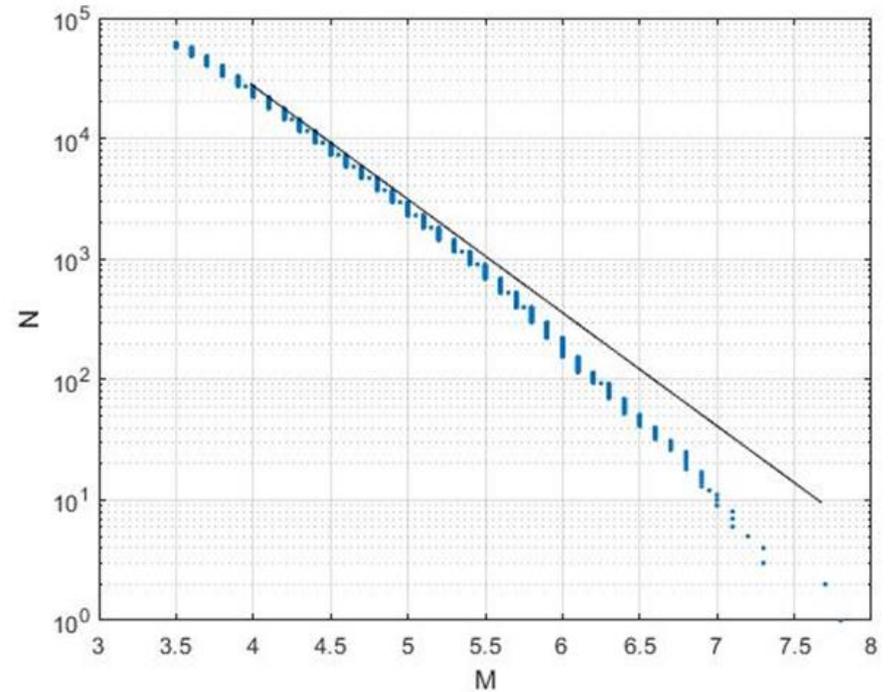
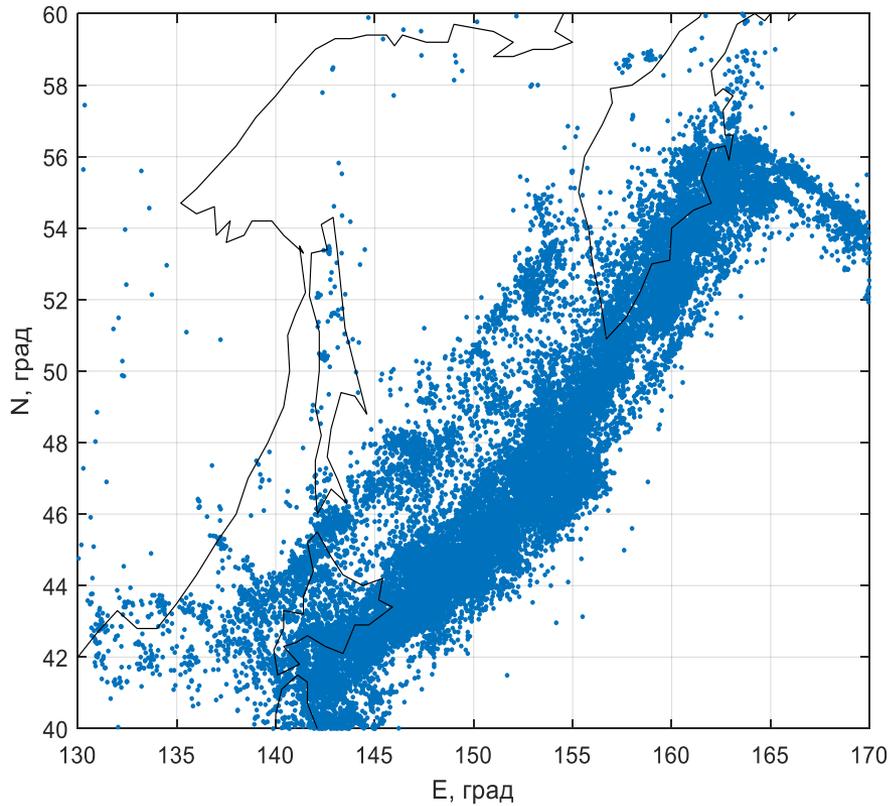
**В экспериментах по АЭ - приблизительно симметричный режим форшоковой и афтершоковой активности при несколько более сильной выраженности режима форшоков.**

**Данные по горным ударам - Жезгазган - практически симметричные активизации форшоков и афтершоков.**

**Землетрясения - резкое – на порядок - доминирование числа афтершоков.**

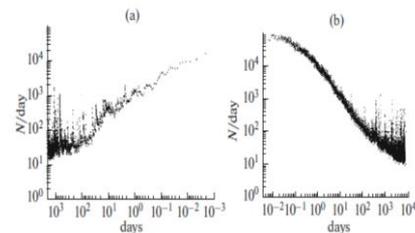
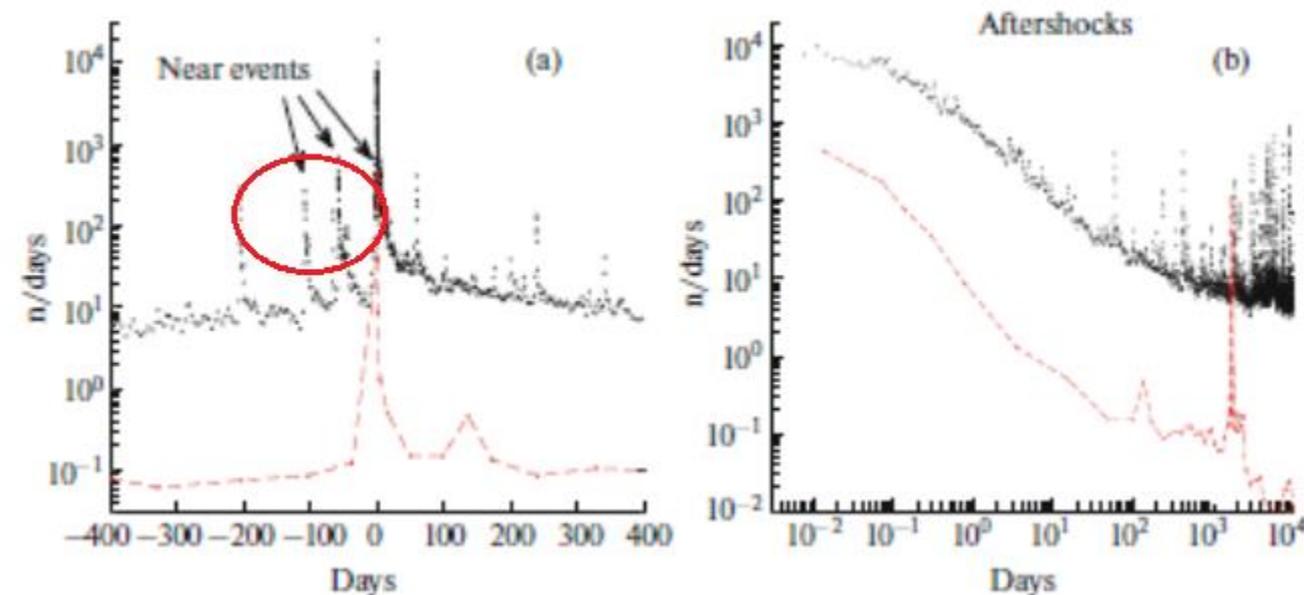
**Различие в физике? Разная среда?**

# Опыт применения метода построения и анализа ООСЗ к региональным данным, каталог Камчатки



Эпицентры землетрясений (синие точки). Сильные землетрясения, отобранные для обобщенной окрестности и составляющие. Рассмотрены землетрясения с  $M \geq 4.0$ .

# Анализ ООСЗ на основе региональных данных для Камчатки - некоторые сюрпризы



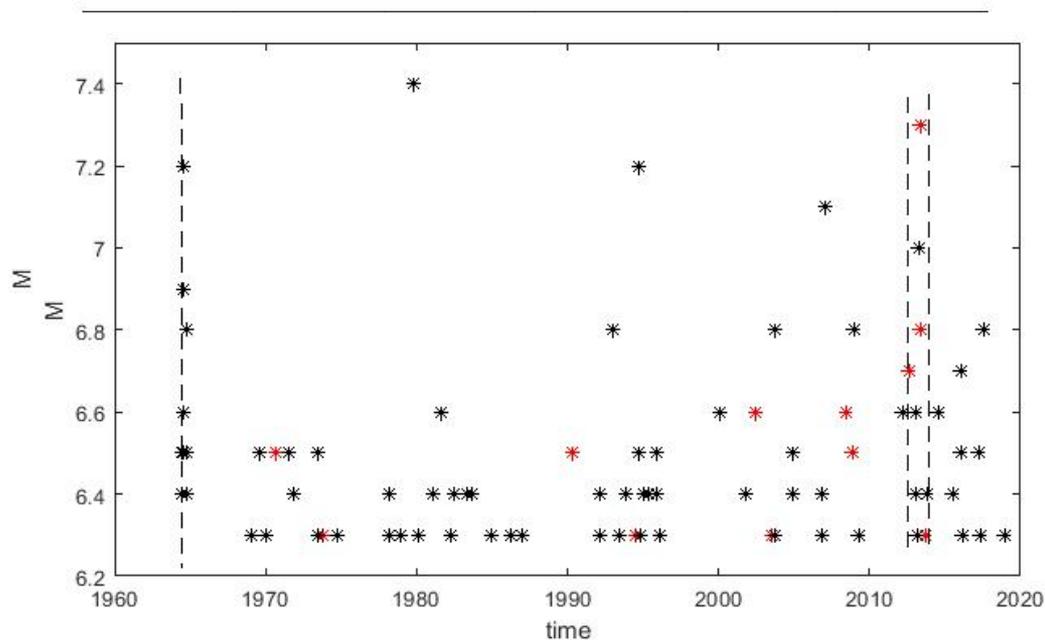
Мировые  
данные – для  
сравнения

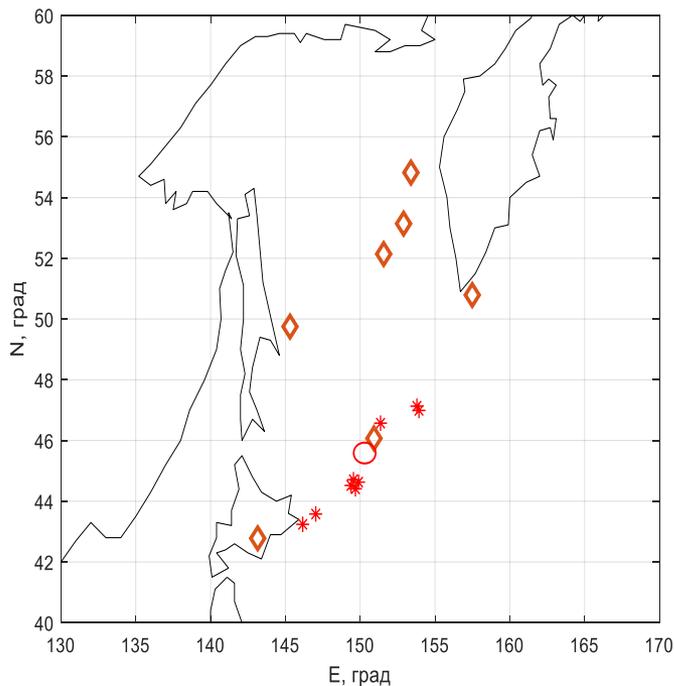
Активность форшоков и афтершоков в общей окрестности сильного землетрясения в линейной шкале времени (а) и в логарифмической шкале времени для афтершоков (б). Сильные  $M \geq 6.3$ .

черные точки обозначают основные события  $N < 300$  км,

пунктирная линия и красные точки - для событий  $N > 400$ .

Стрелками (а) отмечены некоторые события, близкие друг к другу по времени.

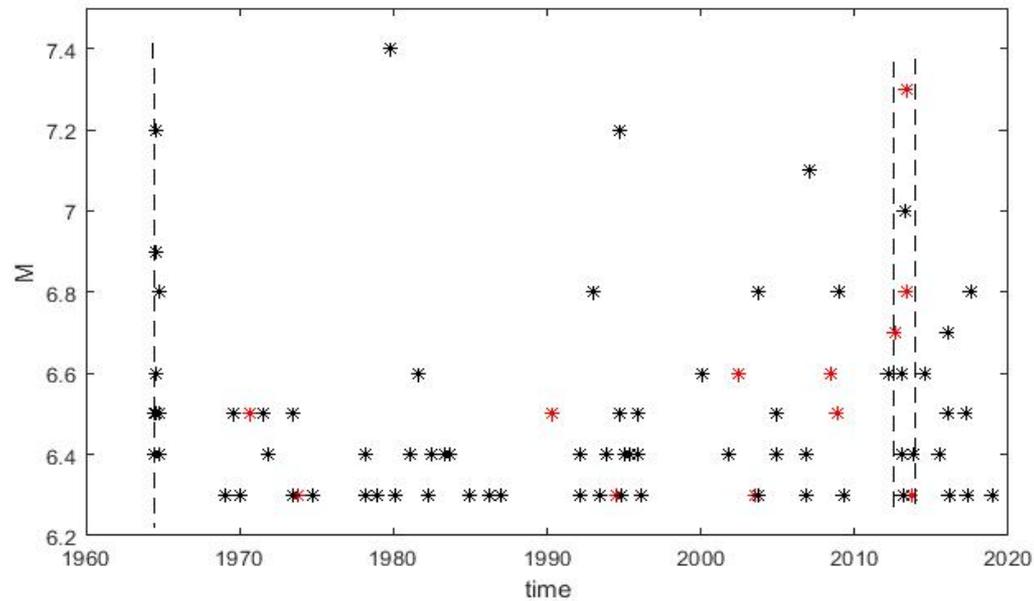




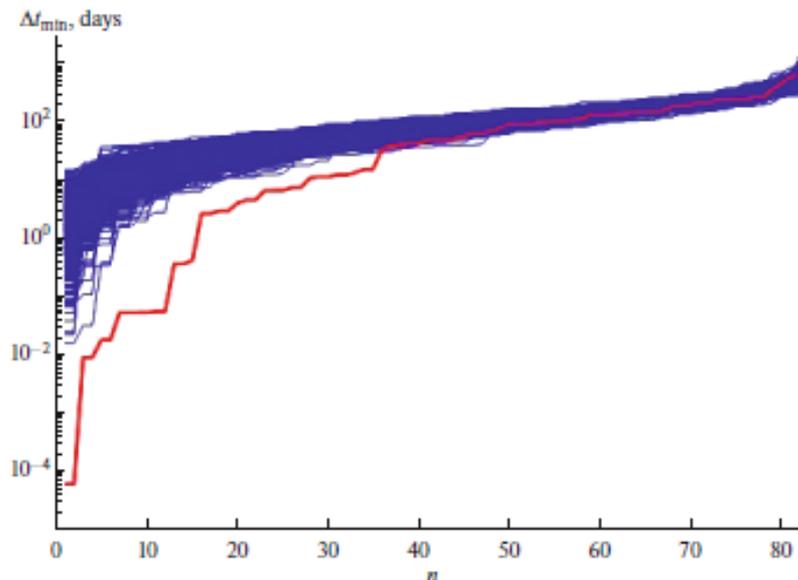
Две группы землетрясений показаны красными звездами и ромбами.

Размер области наибольшего события показан красным кружком.

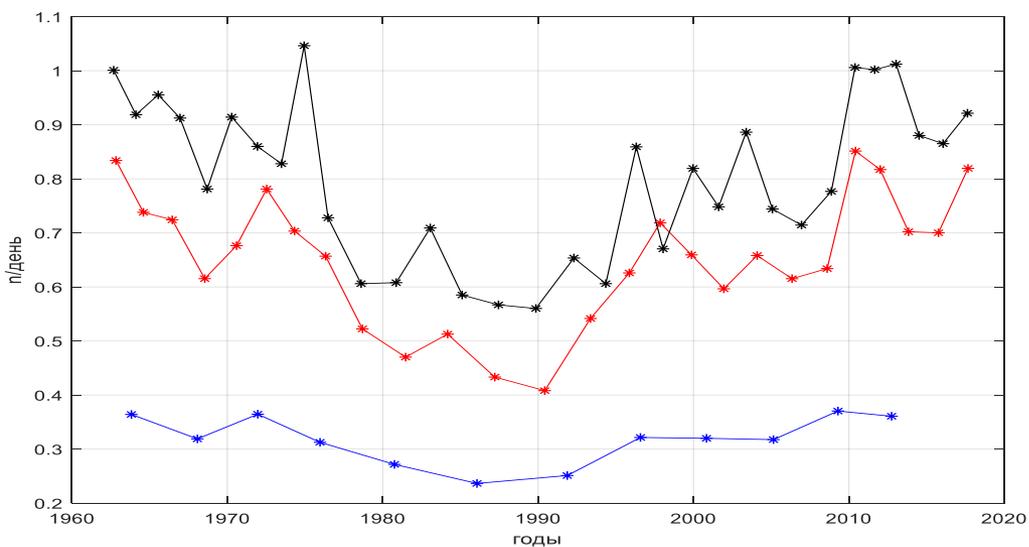
Сравнение смоделированных распределений минимального расстояния до соседнего землетрясения  $\Delta t_{\min}$  для 500 независимых случайных выборок (синие линии) и для фактически наблюдаемых данных для сильных землетрясений с  $M \geq 6.3$ .



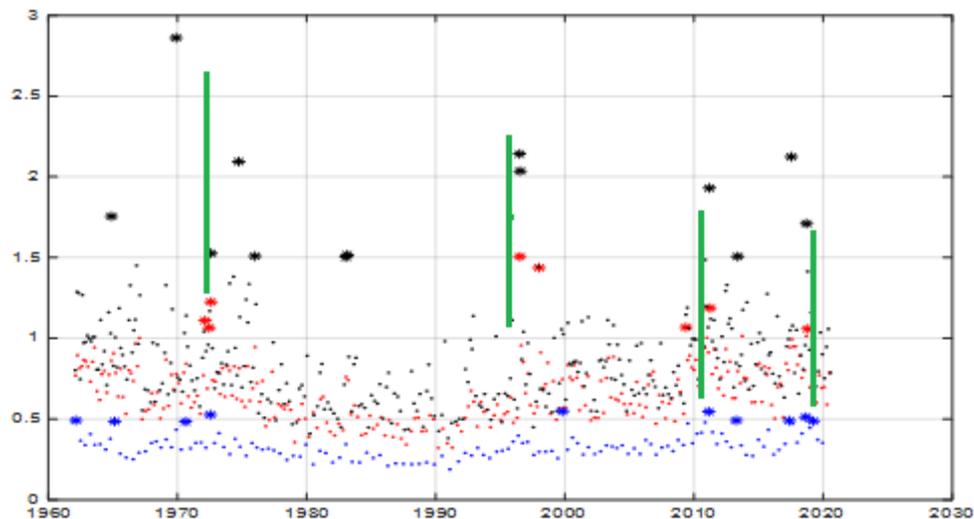
Почти очевидная группируемость по времени сильных ( $M \geq 6.3$ ) землетрясений:  $H < 300$  km (черные),  $H > 400$  km (красные).



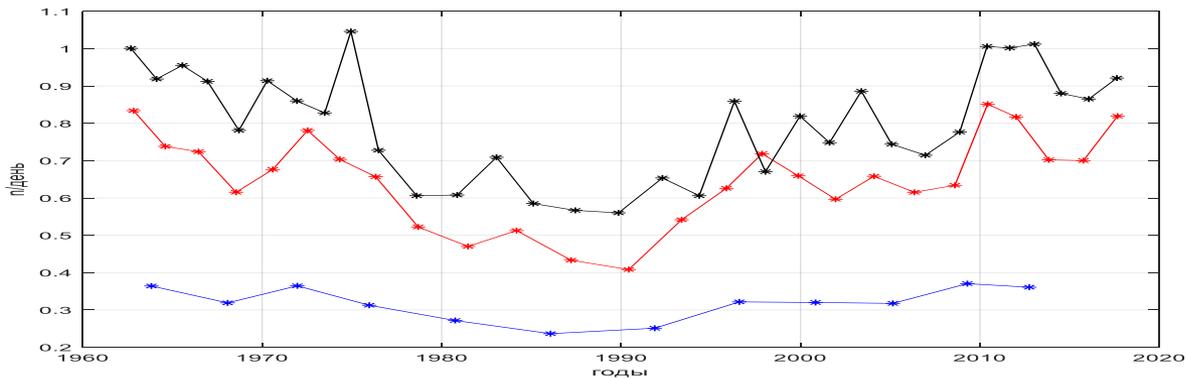
# Теперь рассмотрим режим основных независимых землетрясений. Нестационарность режима на разных временных масштабах почти очевидна, кластеры повышенной сейсмичности существуют.



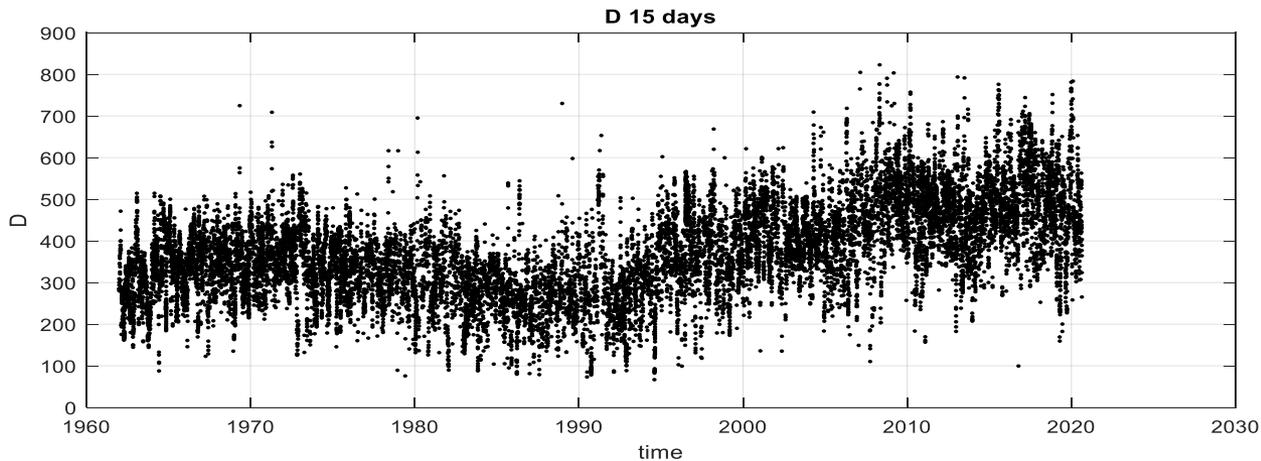
- Средняя плотность потока независимых основных событий ( $M \geq 4.0$ ) для последовательных во времени групп из 500 землетрясений:
- синие точки - определение оконным методом [Gardner, Knopoff, 1974],
  - черный - по алгоритму [Молчан, Дмитриева, 1992],
  - красный - по методике [Писаренко, Родкин, 2019].



Средняя плотность числа основных независимых событий ( $M \geq 4.0$ ) для последовательных во времени групп из 50 землетрясений; Звездочками показаны значения интенсивности потока событий, превышающие среднее значение на две сигмы (случайно таких 2.3%). Видны краткосрочные кластеры

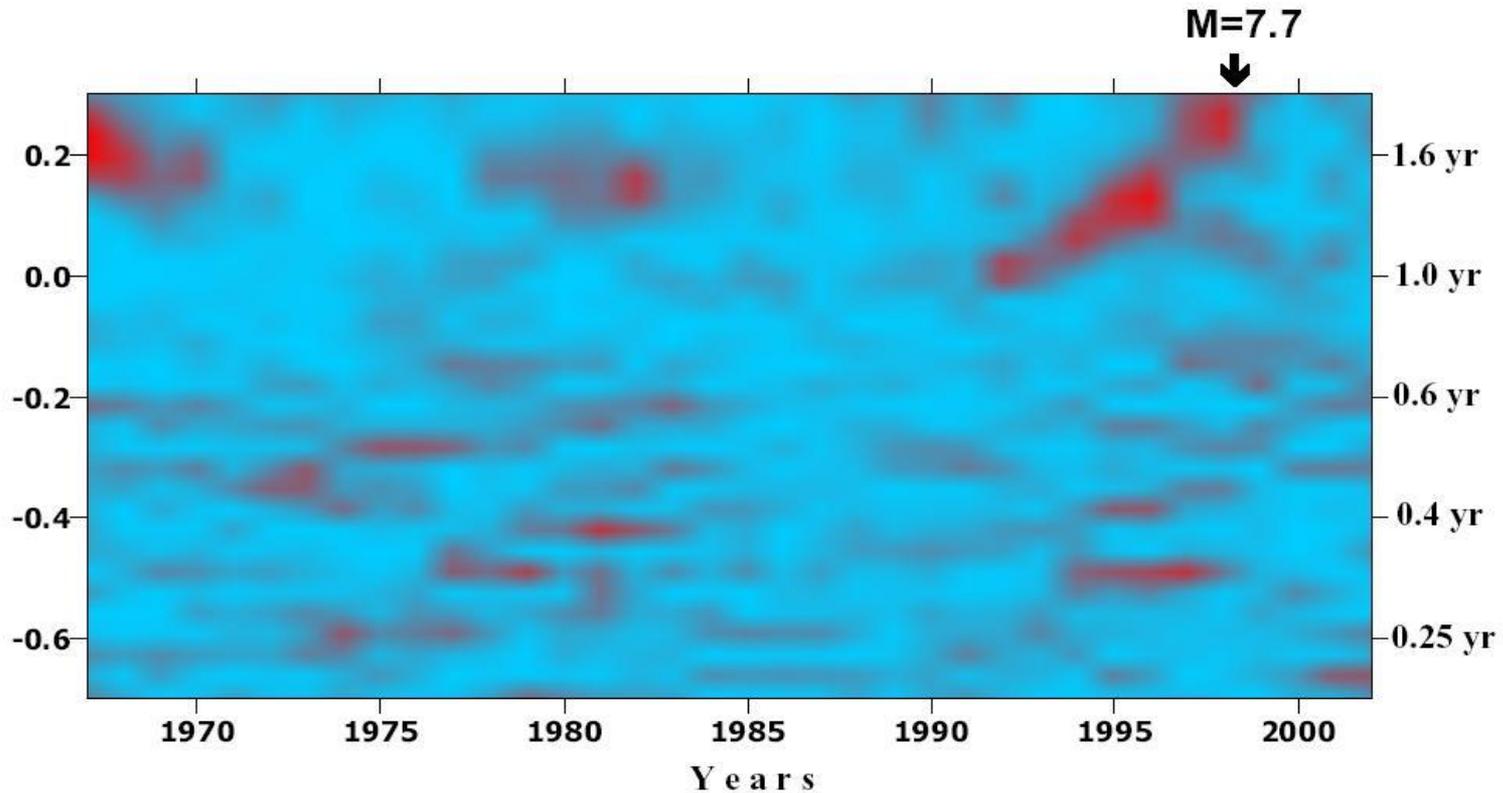


Средняя плотность потока независимых основных событий ( $M \geq 4.0$ ) для последовательных во времени групп из 500 землетрясений: - синие точки - определение оконным методом [Gardner, Knopoff, 1974], - черный - по алгоритму [Молчан, Дмитриева, 1992], красный - по методике [Писаренко, Родкин, 2019].

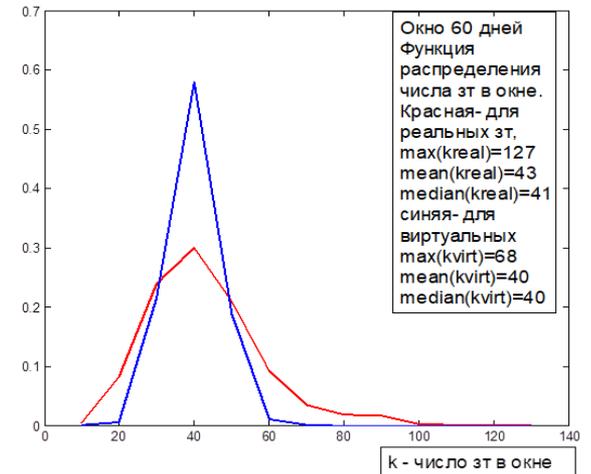
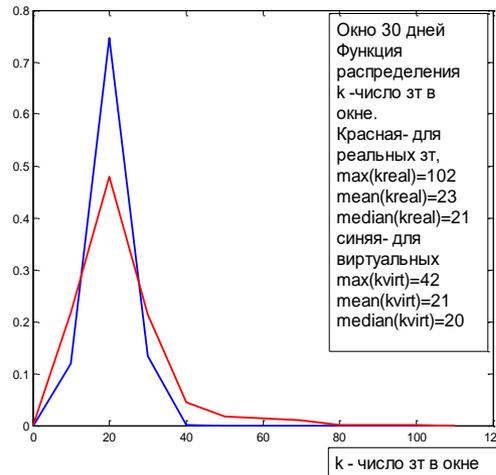
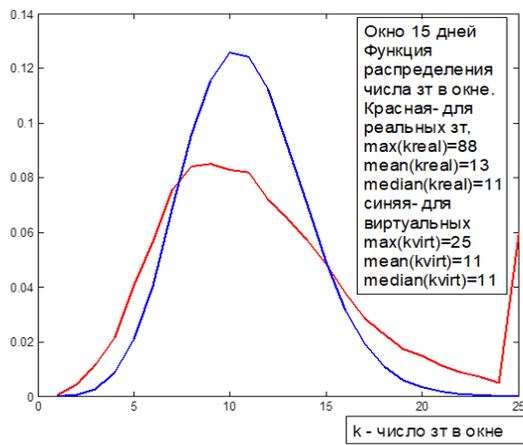


Временная изменчивость средних расстояний ( $D = \sqrt{(R_i - R_j)^2 + c^2(t_i - t_j)^2}$ , [Frohlich, Davis, 1990] and others) между главными событиями в случайных интервалах по 15 дней, аналогично получается для интервалов 30 и 60 дней.  
 Означает ли это, что более крупномасштабные пространственные режимы сейсмической активности преимущественно увеличиваются с увеличением сейсмической активности?

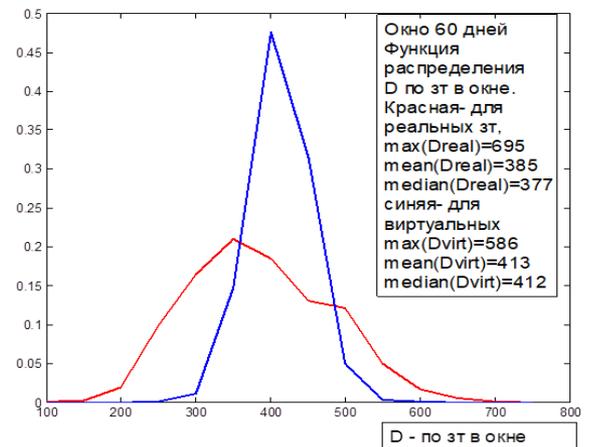
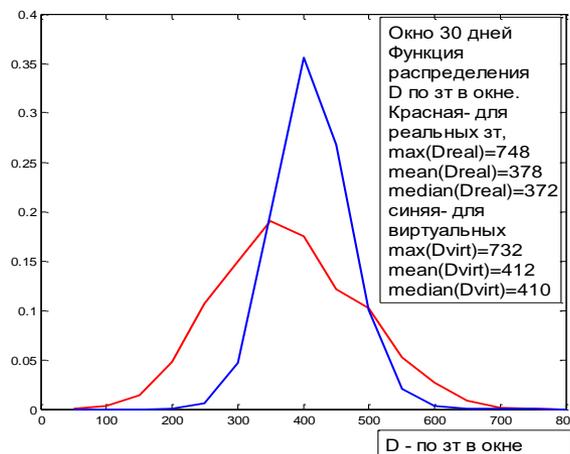
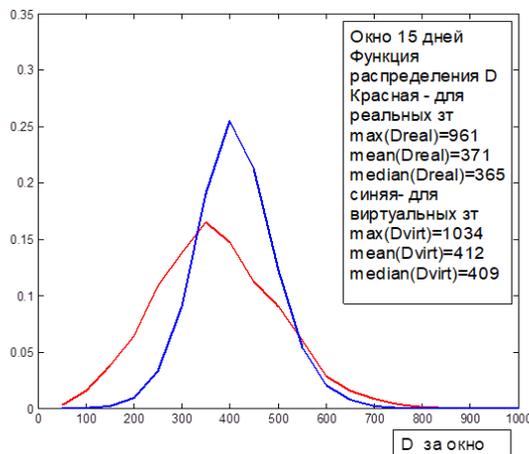
## Similar result in time domain?



An example of change in the amplitudes and frequency of the hidden oscillations in seismic regime prior the strong earthquake. The red areas correspond to higher amplitudes in hidden periodicities. The values of hidden periodicities are shown along y-axis.

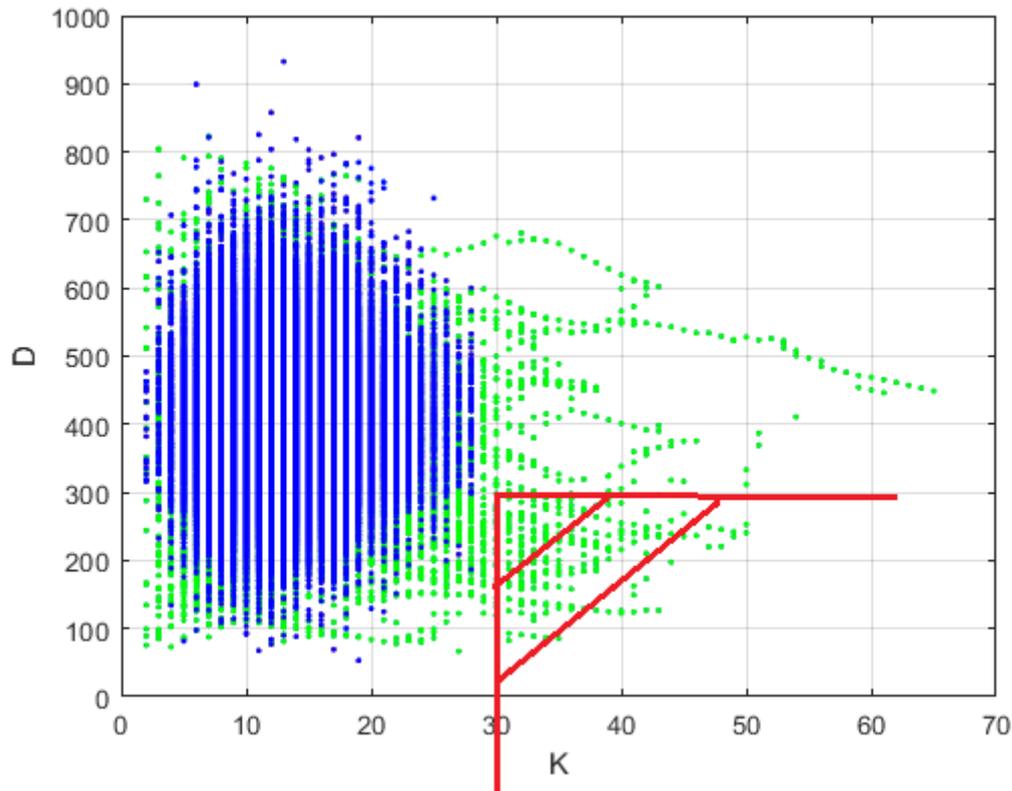


Сравнение плотностей распределения **числа N реальных (красная линия) и модельных (синяя) основных событий**, попадающих в интервалы 15 (а), 30 (б) и 60 (в) дней.

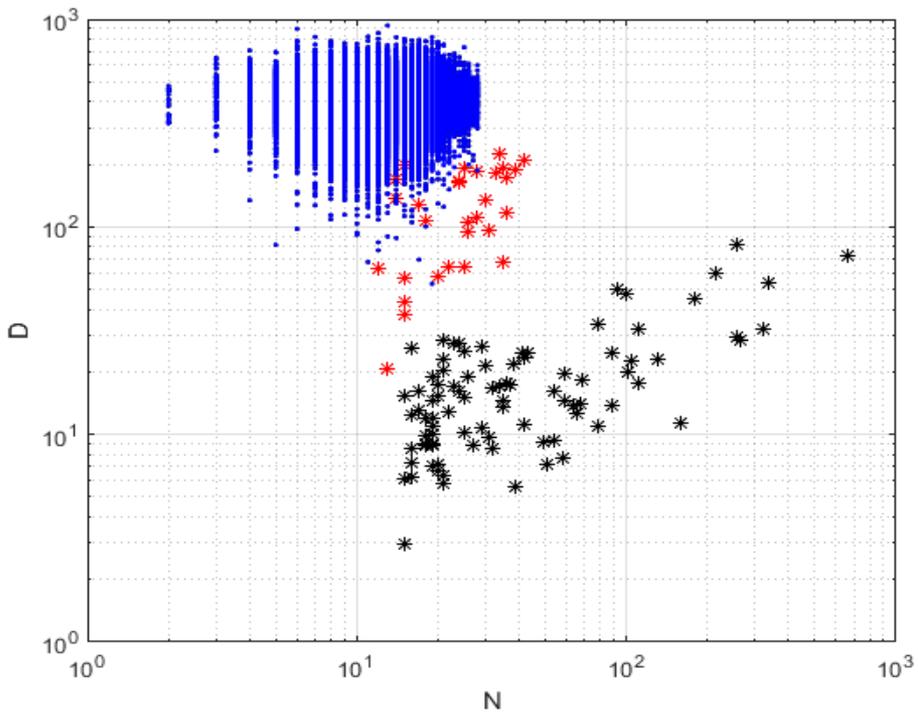


Сравнение плотностей распределения **средних условных расстояний D для реальных (красная линия) и модельных (синяя) основных событий**, попадающих в интервалы 15 (а), 30 (б) и 60 (с) дней.

**Последовательность основные событий НЕ независима, существуют кластеры**



Сравнение количества событий в кластерах продолжительностью 15 дней (K) со средним расстоянием между событиями в кластерах (D),  
для эмпирического набора основных событий (зеленые точки)  
и для модели независимых событий (синие) .  
Область сравниваемых далее кластеров показана красными линиями.



Связь между количеством событий  $N$  в данной последовательности событий и средним расстоянием  $D$  для этих событий.

Последовательности афтершоков (черные звездочки),

кластеры основных событий, продолжительность 15 дней (красный)

модельные пуассоновские последовательности для аналогичного количества событий и продолжительности (синие точки).

Отличается ли механизм кластеризации основных событий от афтершоков? Можно было предположить, что скопления подобны последовательностям афтершоков, и одним из событий скопления является сильное «тихое» землетрясение, но характерные расстояния разные

## *Резюме*

**Построение обобщенной окрестности сильного землетрясения с использованием мировых данных позволяет существенно детализировать средние типичные особенности процесса подготовки и реализации сильного землетрясения. Но мировые данные сильно сглаживают результаты.**

**Сравнение ООСС для землетрясений, горных ударов и эпизодов АЭ выявляет различие этих режимов.**

**Использование региональных каталогов позволяет выявить новые особенности режима сейсмической активности.**

**Помимо известного эффекта активации афтершоков, выделяются пространственно-временные кластеры роста числа основных событий.**

Гм, ... эта особенность режима развития бифуркаций может быть присуща не только сейсмическим явлениям. Возьмем для примера арабскую весну 2010 года, когда аналогичные волны массовых протестов прокатились по разным странам. Очевидно, это были не афтершоки, а скорее аналог кластера основных землетрясений.

*Спасибо за внимание*