

Новый закон сейсмологии?

Родкин М.В.

ИТПЗ РАН, rodkin@wdcb.ru

ИМГиГ ДВО РАН

В Обобщенной окрестности сильного землетрясения (ООСЗ) вблизи момента обобщенного сильного землетрясения (ОСЗ) надежно выявлены два вида аномалий:

Одна отвечает степенному форшоковому каскаду и закону Омори-Утсу для афтершоков (характеризует динамику интенсивности потока событий).

Вторая проявляется для текущих средних значений магнитуды, b-value, разнице ($M_w - M_b$), согласованности ориентаций очагов с механизмом главного события, средней глубины очагов, ряда иных характеристик).

Величина этой аномалии Υ нарастает по мере уменьшения времени от момента обобщенного главного события Δt как $\Upsilon = a - b \log |\Delta t|$; $a, b > 0$ - параметры

Сейсмический режим может быть описан моделью мультипликативного каскада с памятью (ММК). Эта модель описывает тенденцию уменьшения b-value в окрестности сильного события, каскад Омори, форшоковую активизацию, тенденцию сейсмического цикла. Модель очень общая и потому надежная.

В ММК модели $b\text{-value} = -\log(p)/\log(k)$, где p - параметр «неустойчивости»; k – параметр «иерархичности среды».

Типичность аномалии $\Upsilon = a - \log |\Delta t|$ и согласие ее с формулой из модели ММК не дает ли основания задаться вопросом –

«не есть ли она новый закон сейсмологии»??

Кратко об Обобщенной окрестности сильного землетрясения (ООСЗ):

Проблема:

Изменения сейсмического режима в окрестности каждого отдельного сильного землетрясения индивидуальны.

Различные особенности режима могут появляться при одном землетрясении и отсутствовать при другом. Разнообразие режимов столь значительно, что иногда ставится под сомнение даже выполнение закона режима афтершоков Омори.

Что же действительно типично, а что случайно?

Отсюда задача построения Обобщенной окрестности сильного события: - выделить и интерпретировать общие (типовые) особенности фор- и афтершокового сейсмического режима.

Методика построения ООСЗ

1. Собираются данные по сейсмическому режиму в окрестности 100, 300, 500, 1000 сильнейших (по m_w , или как иначе) землетрясений.

2. Выбор пространственно-временной области:

Пространственный размер области выбирался по соотношению между характерным размером очага S или RL и его магнитудой:

$$S, \text{ км} = 10^{(0.5 \times M - 1.9)}.$$

$$RL, \text{ km} = 10^{(0.59m_w - 2.44)} \text{ (Wells \& Coppersmith, 1994)}$$

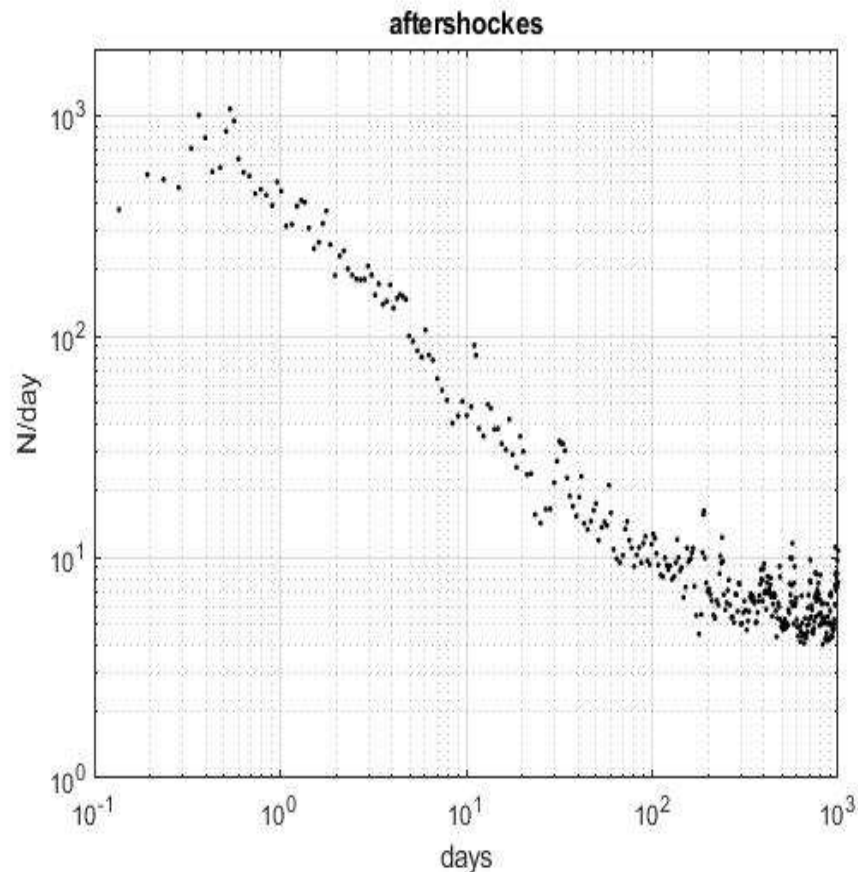
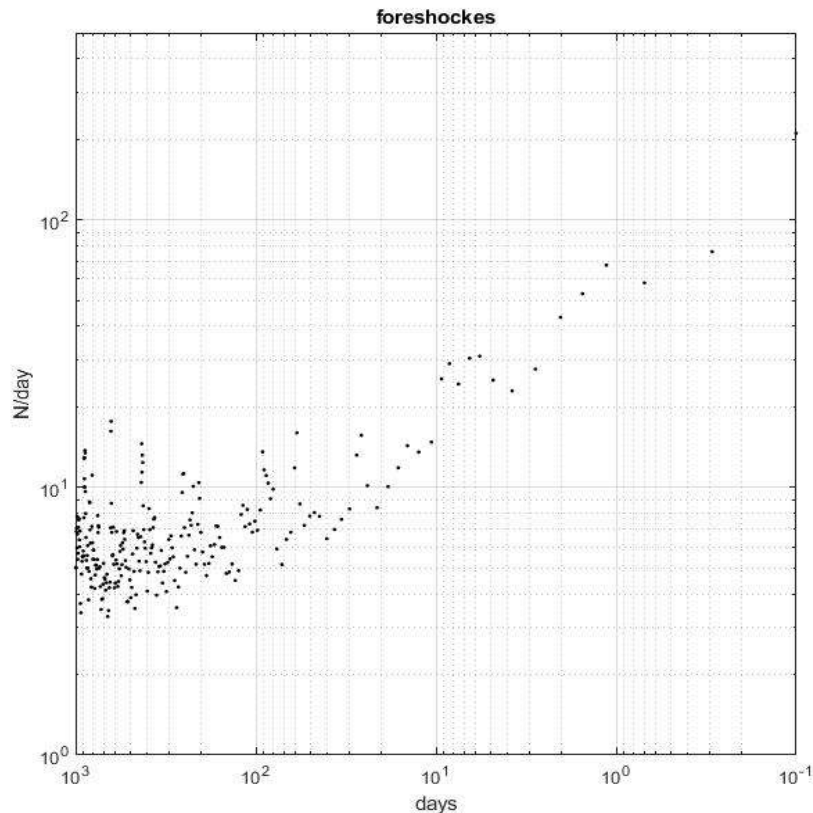
Временной масштаб - с учетом вывода (В.Б.Смирнов, 2003) о близкой длительности подготовки разномасштабных землетрясений - безо всякой нормировки, простым методом наложения эпох

3. Построение «окрестности обобщенного сильного землетрясения», ООСЗ

Все попавшие в нее землетрясения сортируются по времени относительно момента обобщенного сильного землетрясения (ОСЗ) и по расстоянию от очага соответствующего сильного события.

Анализируются временные ряды изменения средних параметров для групп последовательных фор- и афтершоковых (слабых) событий.

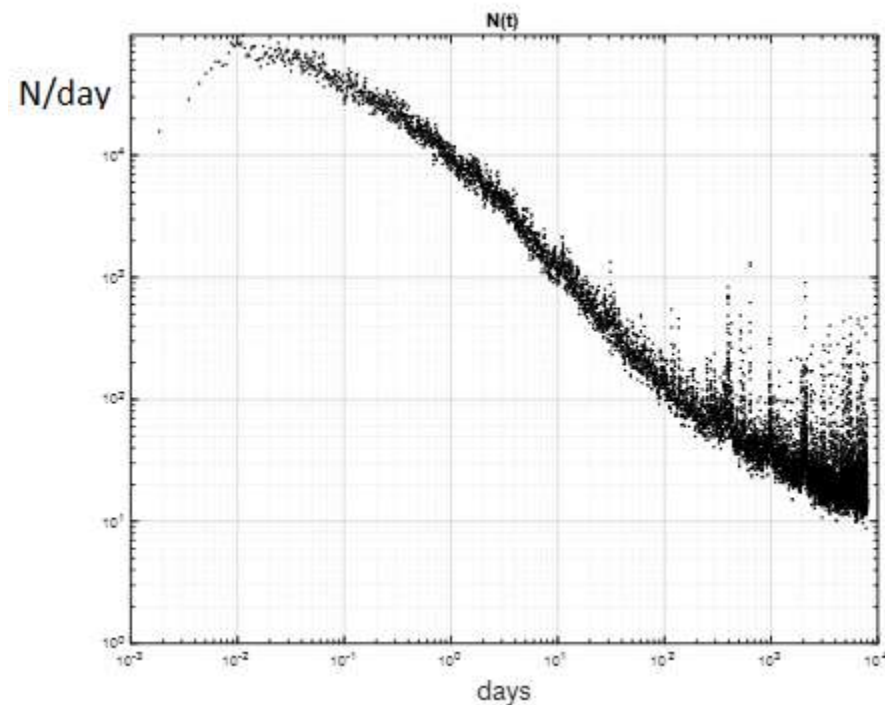
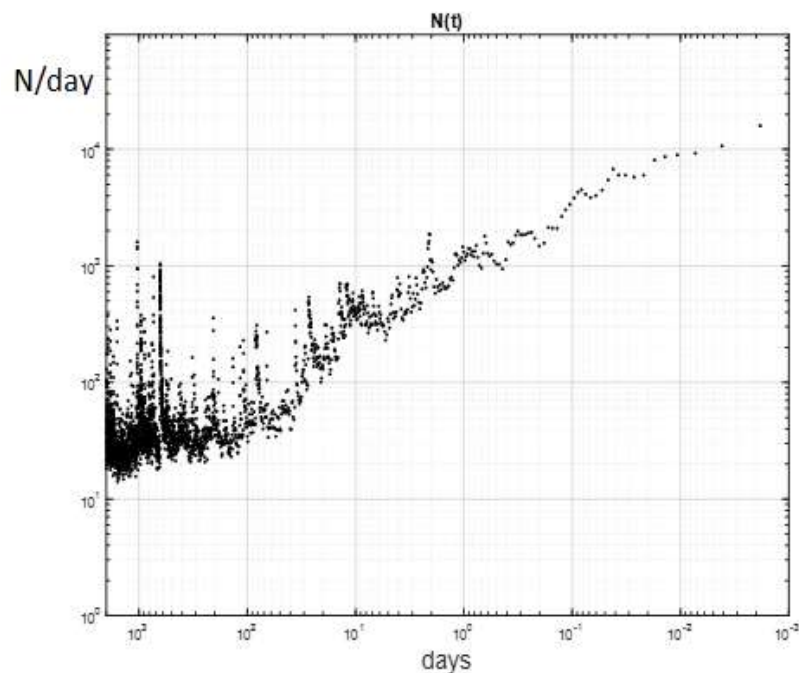
Примеры типовых аномалий а ООСЗ, **GCMТ** каталог.



Динамика форшокового (а) и афтершокового (b) процесса в ООСЗ, GCMТ каталог. $M_w \geq 5.4$.

Выход режима афтершоков на режим закона Омори заметно позже, чем по данным ISC каталога, $M_b \geq 5.0$.

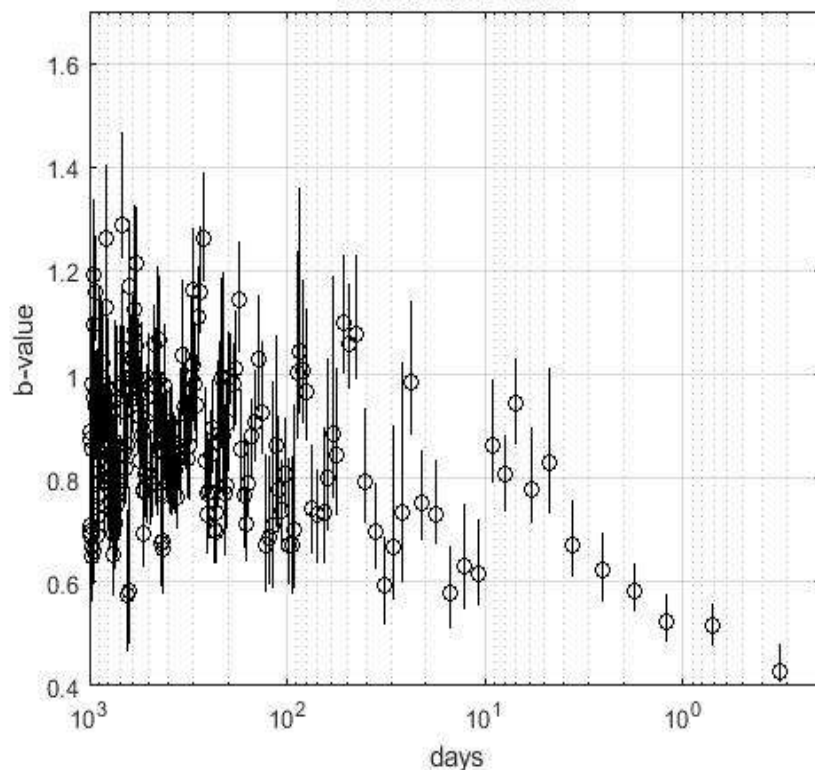
ООСЗ. Режим фор- и афтершоков по
данным **ISC каталога**, $M_b \geq 5.0$



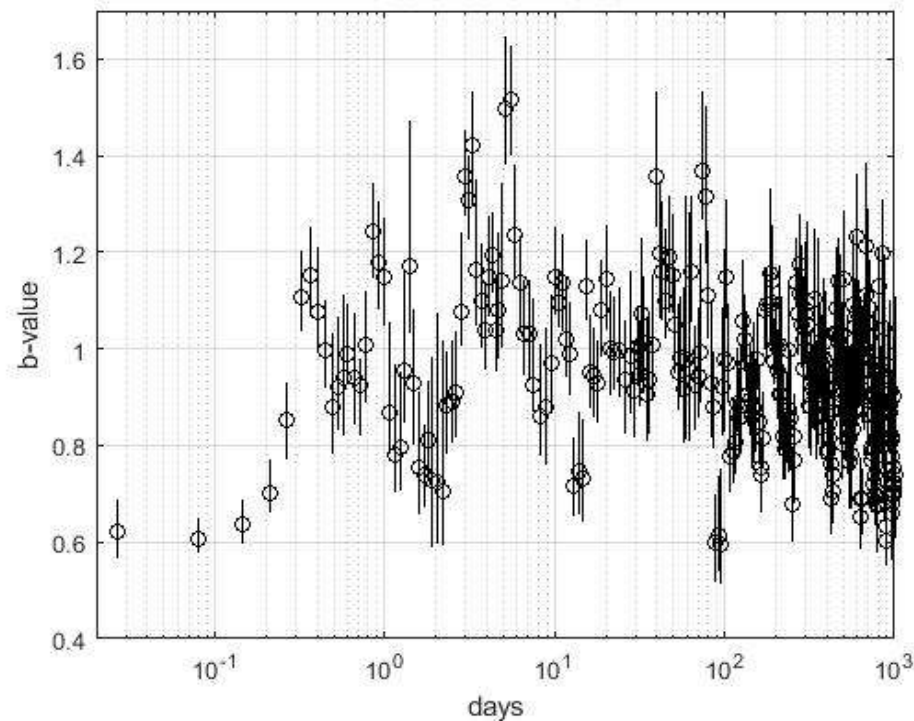
Динамика форшокового (а) и
афтершокового (b)
процесса в ООСЗ, ISC
каталог.

GCMT каталог

foreshocks B-value

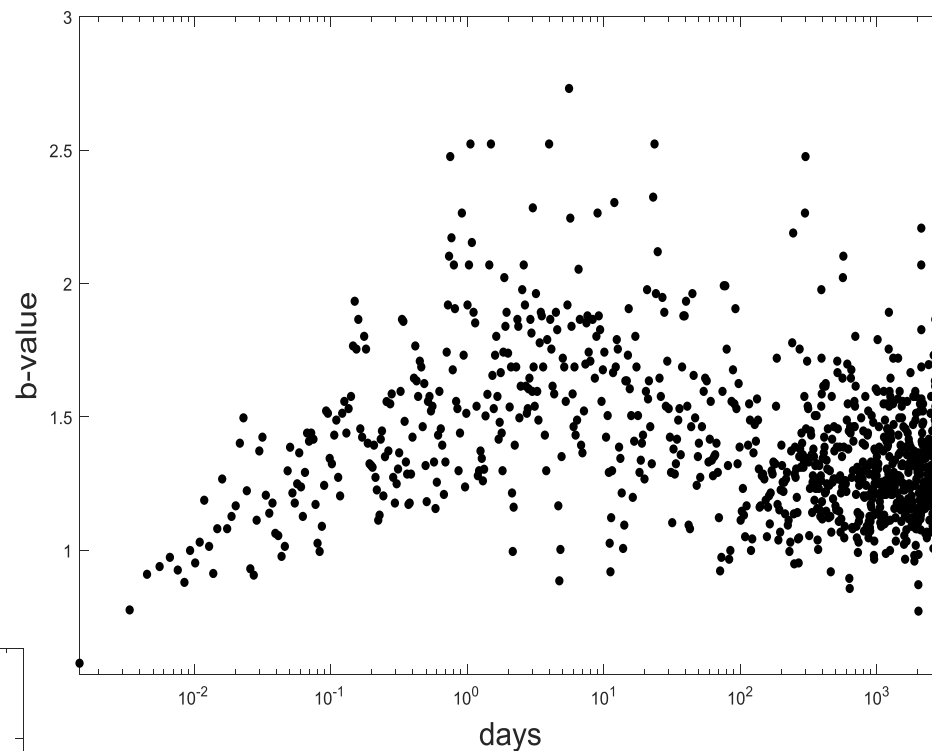
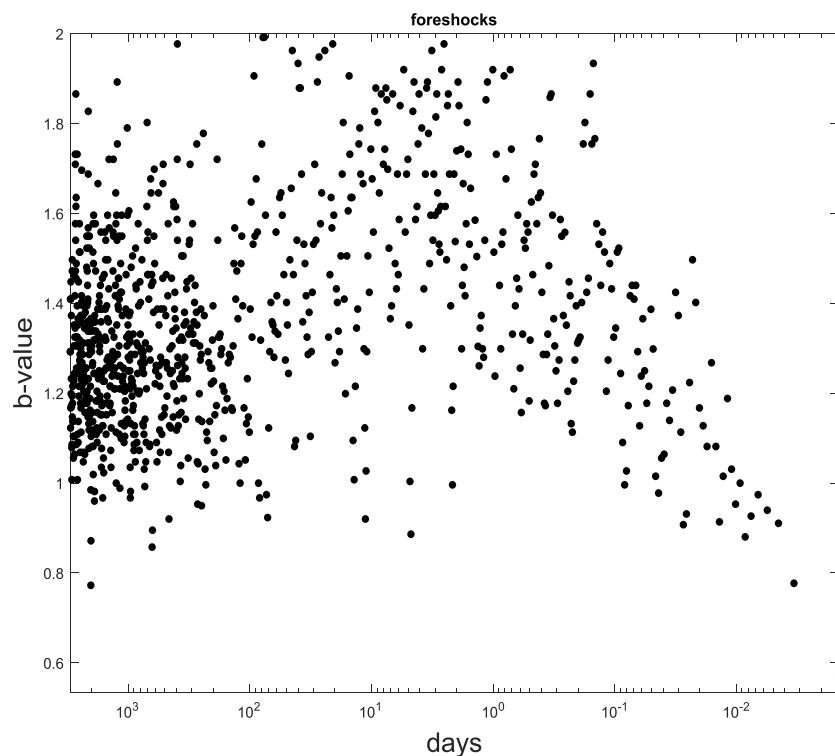


aftershocks B-value



Изменения текущих значений ***b-value*** в ООСЗ, форшоки (а) и афтершоки (б), GCMT каталог.

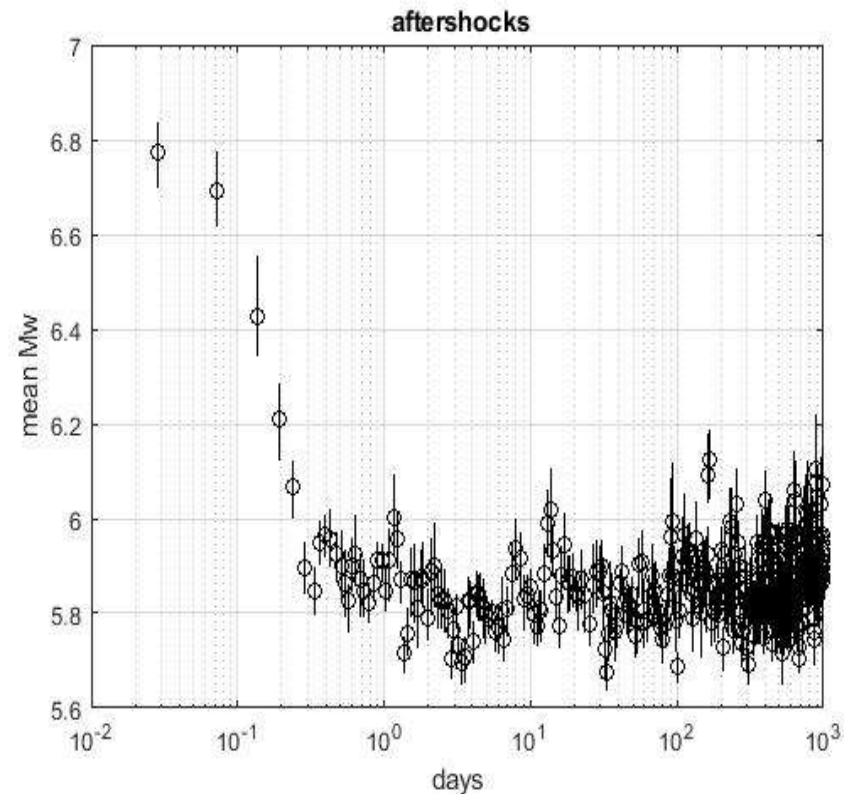
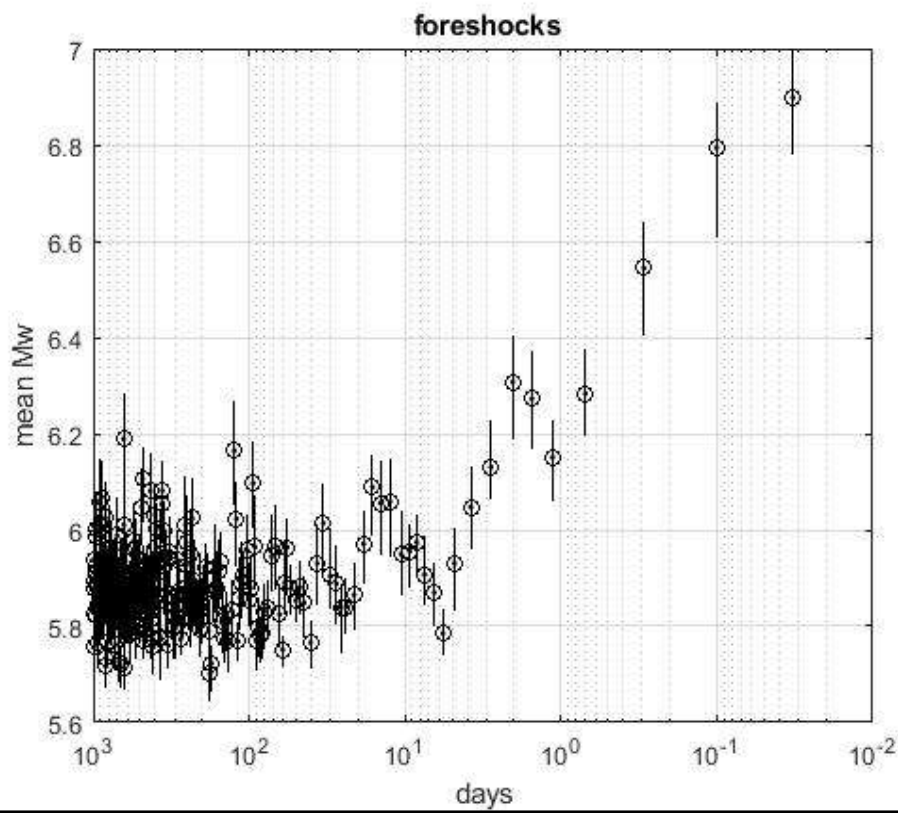
ISC каталог



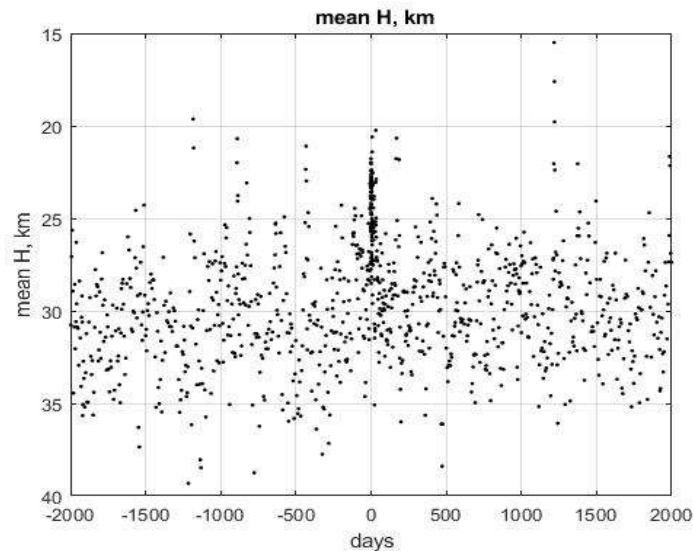
Изменения текущих значений
b-value в ООСЗ, форшоки (а)
и афтершоки (б), ISC
каталог.

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

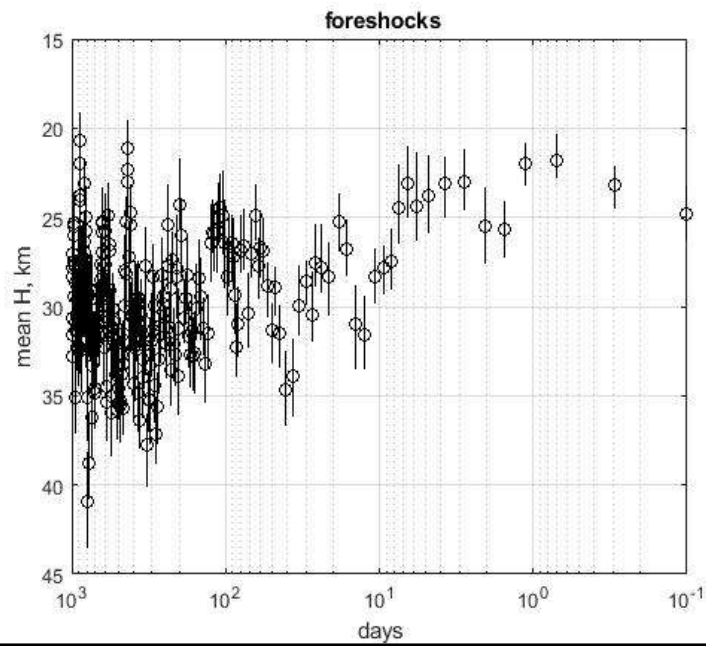
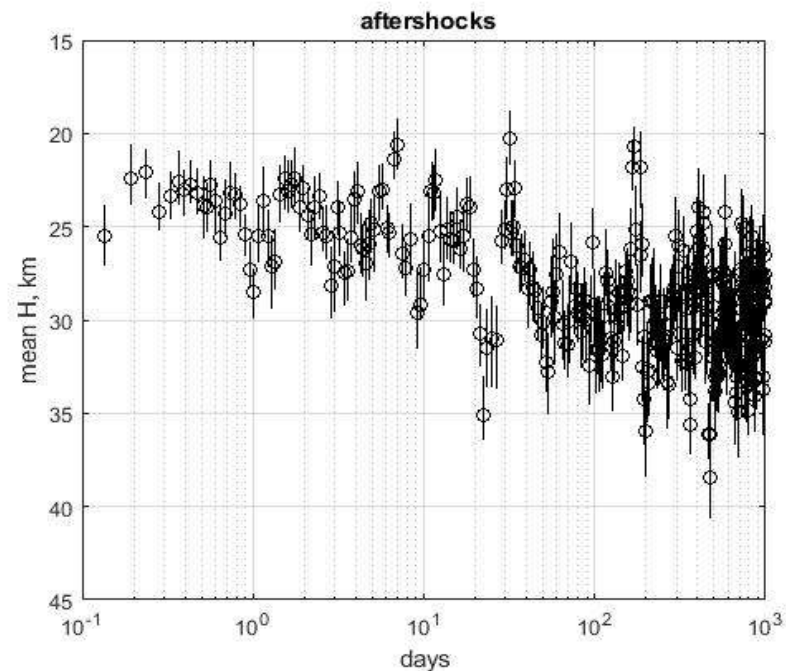
**Первичная аномалия - рост
среднего значения магнитуды M ?**



**Средняя магнитуда
землетрясений ($M_w \geq 5.4$) в
ООСЗ, форшоки (а) и
афтершоки (б),
GSMT каталог**



Изменения средней глубины событий
каталог ISC

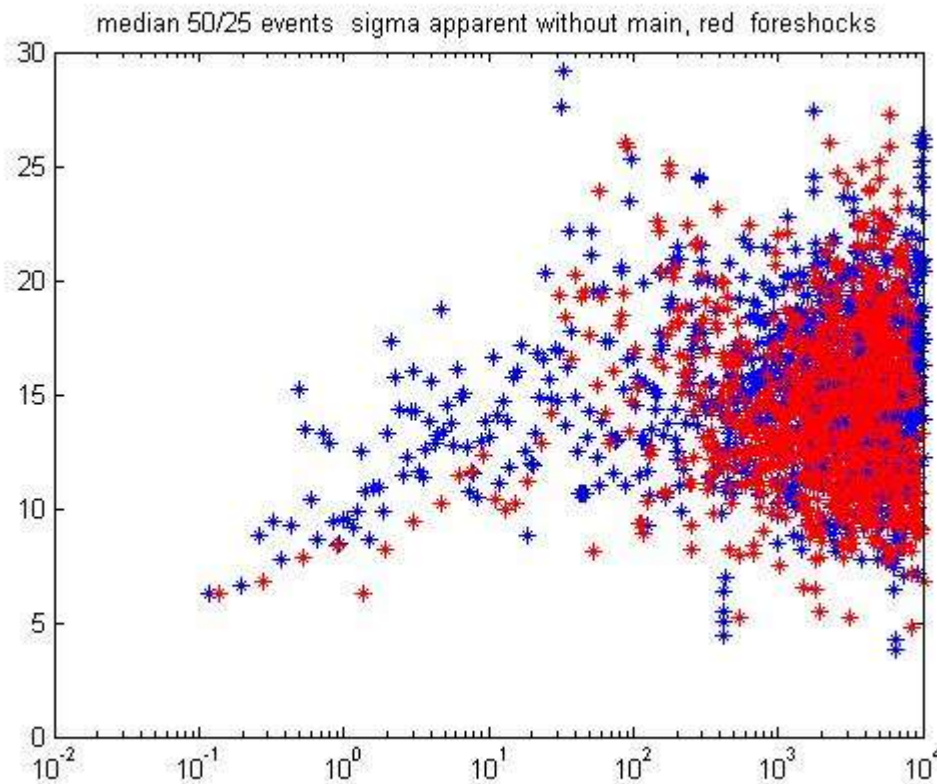


**Изменения средней глубины
событий в ООСЗ в
логарифмической шкале по оси
времени для форшоков (а) и
афтершоков (б), каталог GСMT.**

**Следствие развития трещиноватости,
роста проницаемости и прорыва
флюида вверх?**

Изменение медианы для 50 последующих событий (шаг 25) величин кажущихся напряжений, σ_a (Sigma apparent), форшоки даны красным, афтершоки – синим (1976-2007).

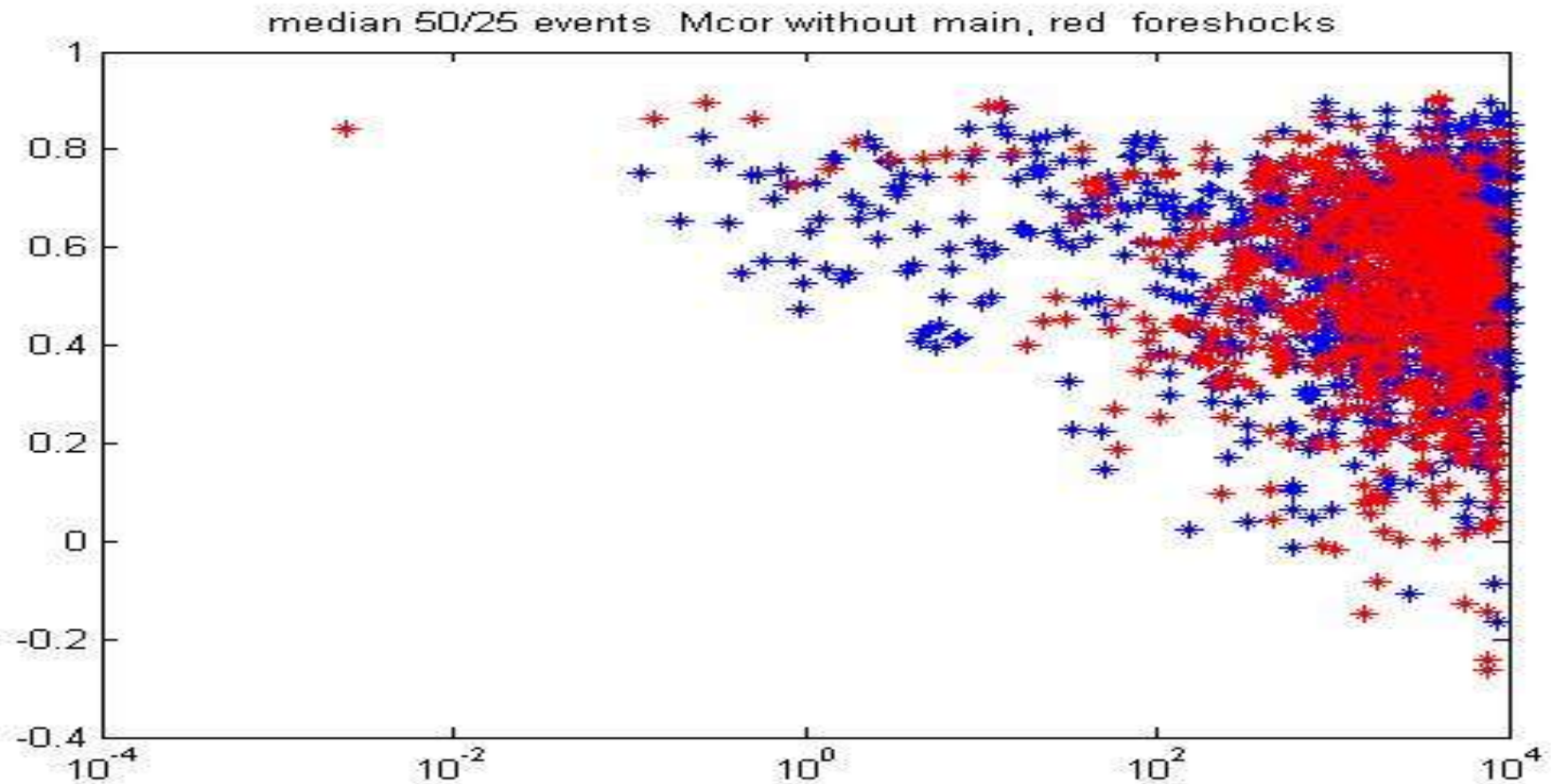
GСMT каталог



Тенденция уменьшения средних величин σ_a по мере приближения момента ОСЗ.

Эффект разупрочнения вещества?

Изменение медианы средней согласованности ориентации очага текущего и главного события K для 50 (шаг 25) событий $K = Mo_{ij} * M_{ij} / \{ || Mo_{ij} || \times || M_{ij} || \}$ форшоки даны красным. **GСМТ каталог**



Эффект роста когерентности напряженно-деформируемого состояния в критической области.

Эффект ожидаем из теоретических соображений

Кратко о модели ММК:

Пусть событие случайной величиной X в некий момент i может либо продолжить свое развитие с вероятностью p , либо затухнуть с вероятностью $(1-p)$. При продолжении развития, положим, что событие переходит на следующий масштабный уровень

$X_{i+1} = k X_i$, где k случайная величина, $k > 1$.

Параметр k назовем параметром иерархичности среды (и положим $k \sim 3$, по Садовскому),

p назовем параметром метастабильности.

процесс может с равной вероятностью прерваться в любой момент времени.

В результате реализации множества эпизодов лавинообразной релаксации будем иметь на выходе набор величин $\{X\}$, где значения $\{X\}$, аналогичны энергии (сейсмическому моменту) землетрясений и распределены по степенному закону с наклоном графика повторяемости:

$$b = \ln(1/p) / \ln(k).$$

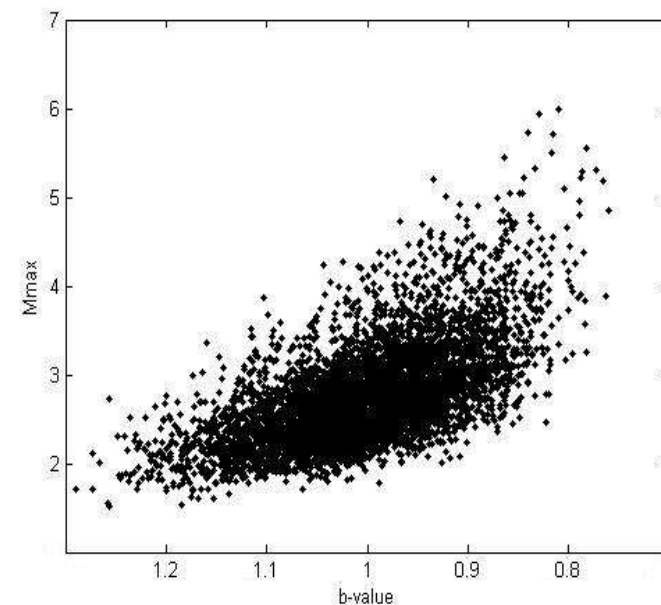
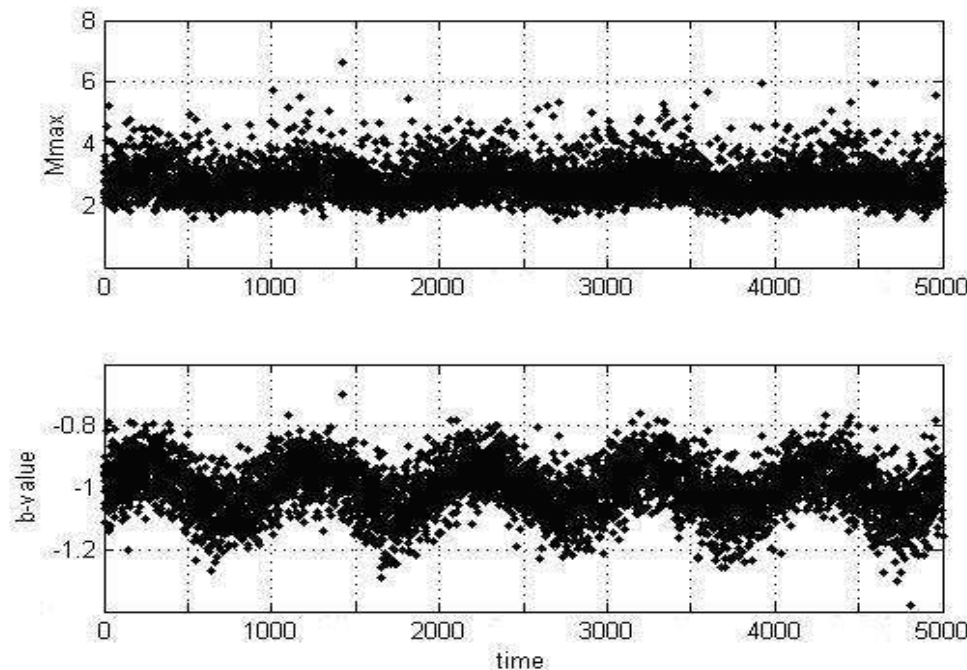
Что дает ММК, пример. Приняв разумные параметры модели $\{p, k\}$ и полагая некое среднее в единицу времени (Пуассоновский процесс) число событий N смоделируем «временную» реализацию «сейсмического режима».

Зададим p со слабой гармонической компонентой.

Пример реализации такой стохастической модели сейсмического режима для 5000 единиц времени:

(а) максимальные значения магнитуд $M_{\max}(t)$ { магнитуда = $a + c \lg(X)$ }

(б) значения наклона графика повторяемости $b(t)$.



**Имеем прогнозный признак -
наклон графика повторяемости
статистически уменьшается перед
сильным землетрясением**

Связь аномалий в ООСЗ с моделями сейсмического режима

Типовая (минус логарифм времени до момента события) аномалия в ООСЗ
Имеет вид: $\Upsilon = a - b \lg(|\Delta t|)$ (1)

Для модели ММК имеем: $b = \ln(1/p)/\ln(k)$.

Имеем: $\Upsilon = \Delta\beta = a - b \log(|\Delta t|)$

Зависимость однотипная: при приближении момента главного события вероятность продолжения разрушения растет,

При $(1-\alpha) = p \rightarrow 1, \alpha \rightarrow 0, \Delta t \rightarrow 0$

рост «параметра неравновесности» p - вероятность продолжения развития сейсмического события $p \rightarrow 1$; Δt - время до разрушения, $\Delta t \rightarrow 0$

Связь аномалий в ООСЗ с моделями сейсмического режима

Типовая (минус логарифм времени до момента события) аномалия в ООСЗ

Имеет вид: $\Upsilon = a - b \log(|\Delta t|)$ (1)

А для критических явлений имеем аномалию

$$\Upsilon = \alpha (\Delta T)^\gamma \quad (2)$$

На соотношение (1) не похоже

Вероятность макроразрушения образца твердого тела по модели Журкова имеем вид:

$$P = P_0 \exp(\gamma \sigma / RT), \quad (3)$$

где P – вероятность разрушения при данном уровне напряжений σ и температуре T ; P_0 , γ – коэффициенты. Логарифмируя соотношение (3) и вводя коэффициенты s и d ,

получаем

$$\log(P) = s + d \sigma. \quad (4)$$

Похоже на соотношение (1) и на формулу из модели ММК

Основные публикации по теме

По теме Обобщенной окрестности

Родкин М.В. Сейсмический режим в обобщенной окрестности сильного землетрясения. Вулканология и сейсмология, 2008, 66-77, №6.

Rodkin, M.V. (2012), Patterns of seismicity found in the generalized vicinity of a strong earthquake: Agreement with common scenarios of instability development, in *Extreme Events and Natural Hazards: The Complexity Perspective*, Geophys. Monogr. Ser., vol. 196, edited by A. S. Sharma et al. 27–39, AGU, Washington, D. C., doi:10.1029/2011GM001060.

M.V. Rodkin, I.N. Tikhonov. The typical seismic behavior in the vicinity of a large earthquake. Physics and Chemistry of the Earth, 2016, v.95, 73-84.

По теме Модель мультипликативного каскада

Родкин М.В. Модель сейсмического режима как совокупности эпизодов лавинообразной релаксации, возникающих на множестве метастабильных состояний. Физика Земли, 2011, № 10, с. 18–26.

Rodkin M.V. and I. N. Tikhonov. The New Avalanche-Like Stochastic Model for Parameterization of Seismicity and Its Application to the South Sakhalin Island Seismicity. International Journal of Geophysics. Volume 2012 (2012), Article ID 364318, 12 pages, doi:10.1155/2012/364318.

Rodkin M.V., P. Mandal. A possible physical mechanism for the unusually long sequence of seismic activity following the 2001 Bhuj Mw7.7 earthquake, Gujarat, India. Tectonophysics, 2012, [Volumes 536–537](#), 16 April 2012, 101–109.

Выводы:

1. Модель сейсмического режима как последовательности эпизодов реализации метастабильных состояний (подсистем) - модель ММК - позволяет описать все надежно установленные эмпирические закономерности сейсмического режима. **Модель чрезвычайно общая, поэтому, видимо, устойчивая.**
2. Эмпирика в ООСЗ **уверенно** дает комплекс типовых признаков сейсмического режима в фор- и афтершоковой области.
3. Модели ООСЗ и ММК задают единообразный характер роста аномалии перед сильным событием – как минус логарифм времени до момента сильного события.
4. Не является ли аномалия типа $\Upsilon = a - b \lg (|\Delta t|)$ **новым законом сейсмологии ??**

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

Поведение прогностического признака - **уменьшение** **наклона графика** повторяемости **b:**

