

О прогнозе землетрясений на основе комплекса типичных предвестниковых аномалий, текущие результаты, трудности

М.В. Родкин^{1,2}

¹ ИТПЗ РАН, Москва

² ИФЗ РАН, Москва

Известно довольно много подходов к прогнозу землетрясений [Соболев, Kagan, Jackson, Завьялов, Jordan et al., Кособоков, Соловьев; Любушин и многие другие].

С другой стороны, были высказаны аргументы в пользу принципиальной невозможности прогноза [Geller et al., 1997].

Проверки в режиме реального времени показали, что лучшие прогнозы обеспечивают результат много лучше случайного угадывания - прогноз принципиально возможен.

Однако качество прогноза не удовлетворяет практическим требованиям.

Велико число как ложных тревог, так и пропусков цели.

Основными препятствиями на пути получения эффективного прогноза полагаются:

1. Сильная фоновая изменчивость сейсмического режима (на фоне которой трудно выявлять прогнозные признаки и даже трудно их четко описать)
2. Отсутствие достаточно развитой физической модели сейсмического процесса. Давно известно, что физический механизм сейсмической подвижки для разноглубинных землетрясений должен быть различен [Kasahara, 1981; Калинин и др., 1989; и др.]. Соответственно, можно ожидать, что будут различаться и некоторые их прогнозные признаки.
3. Недостаток фактических данных

1. Проблема фоновой изменчивости сейсмического режима

Методом построения и анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения (ООСЗ) удастся детально описать набор типовых (средних) прогнозных аномалий.

Прояснения:

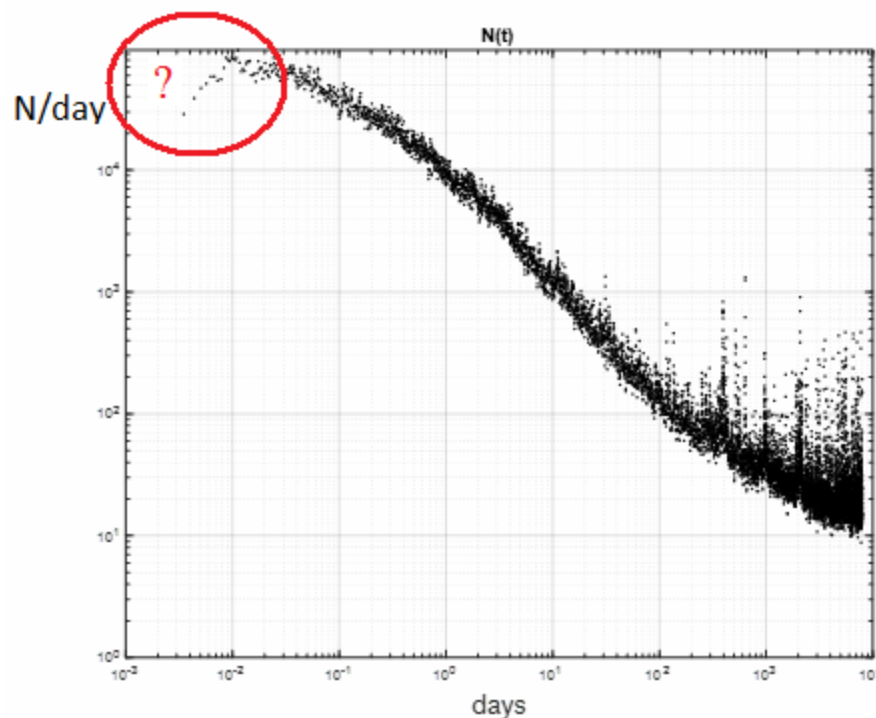
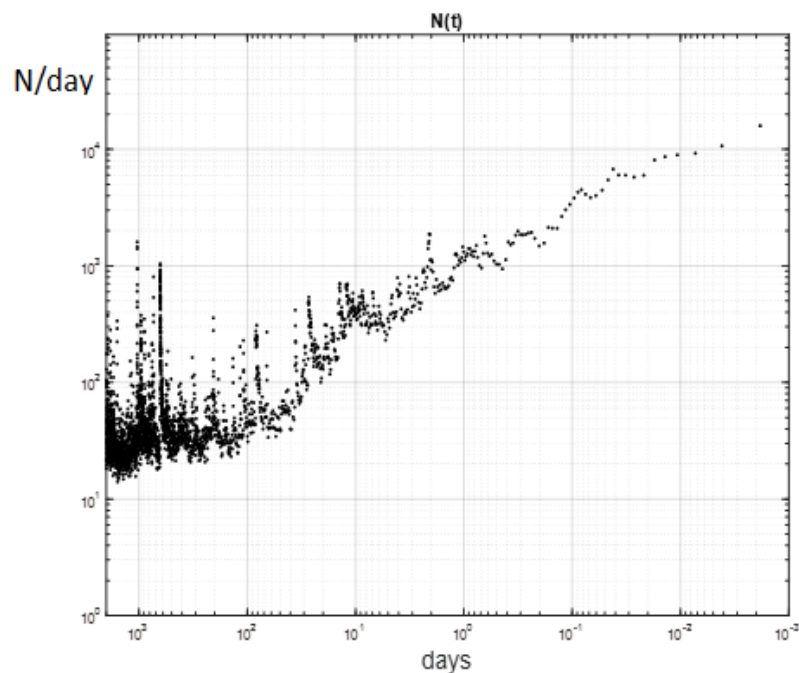
ООСЗ – совокупность (сумма) нормированных на размер очага данного главного события окрестностей большого числа (сотни, до 1000) отдельных сильных землетрясений.

В зависимости от каталога число ООСЗ аномалий меняется от 2-3-х до 6-8. Для типового каталога это аномалии форшокового каскада числа слабых событий, роста величин b -value, и изменений средней глубины.

Для каталогов сейсмических моментов есть и другие аномалии.

Время развития всех ООСЗ аномалий от фона до главного события ~ 100 дней.

Первая ООСЗ аномалия. Режим фор- и афтершоков по данным ISC каталога, $M_b > 5.0$



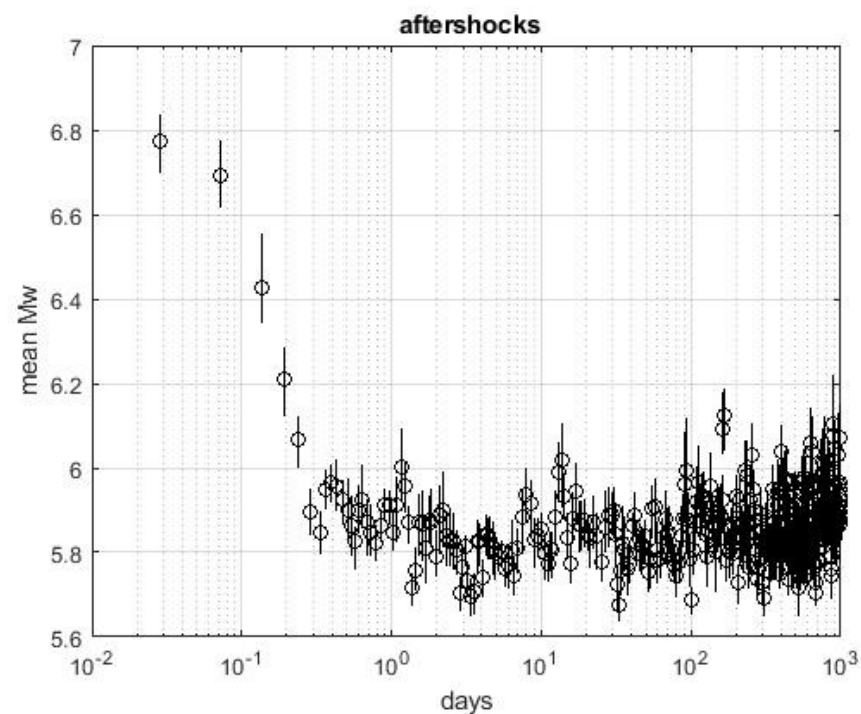
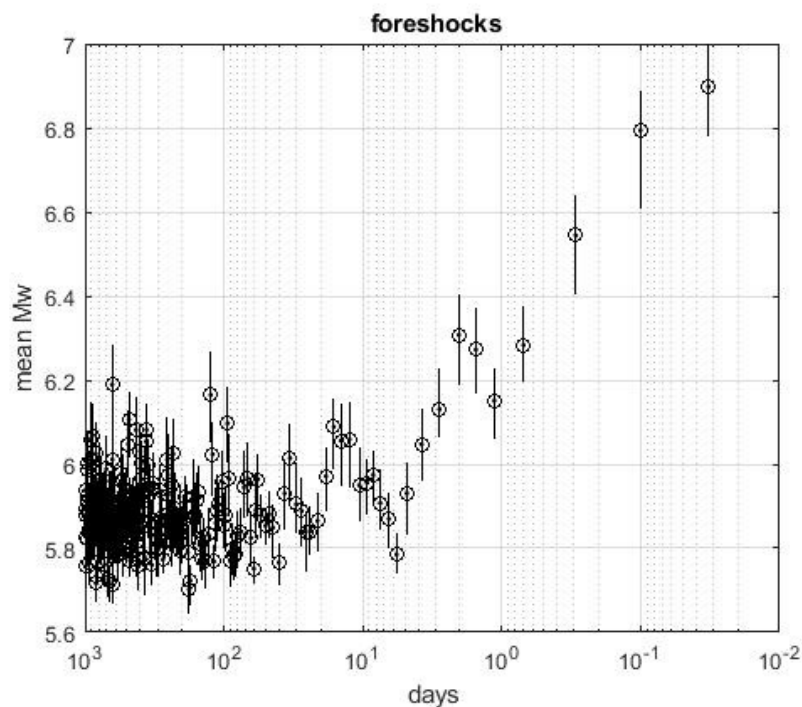
Динамика форшокового (а) и афтершокового (b) процесса в ООСЗ, ISC каталог, 1000 сильнейших событий.

Многие ранние форшоки пропущены, но на основные результаты далее это НЕ влияет

Изменение средних M_w , аналог аномалии b -value

Каскады форшоков (а) и афтершоков (б). GCMT с 1976 г. по 1.012016 г.

44603 события, $M_w \geq 5.4$, $H \leq 70$ км



Аномалии

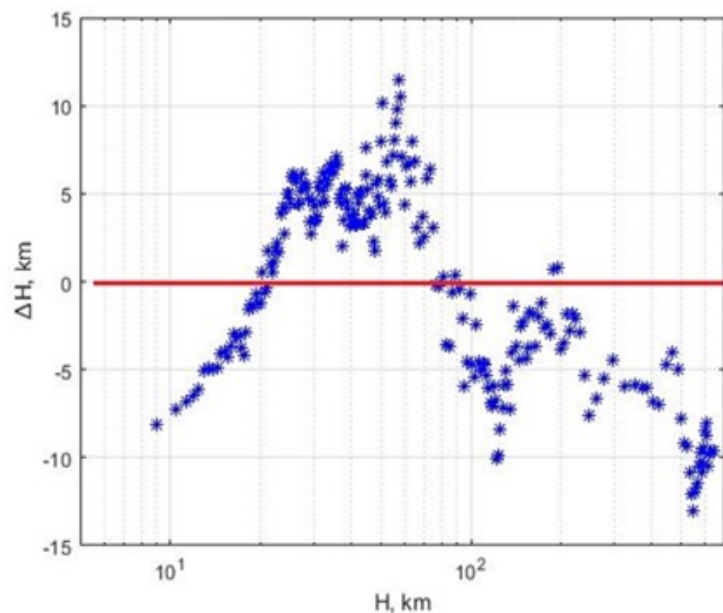
1. «форшоковый степенной каскад»
и
2. «уменьшение наклона графика повторяемости» == «рост средней магнитуды»

на качественном уровне почти тавтологии.

Первая аномалия - предвестником сильного землетрясения является рост числа землетрясений.

Вторая аномалия - предвестником события большой магнитуды является увеличение средней магнитуды землетрясений.

Проблема 2. Отсутствие достаточно развитой физической модели сейсмического процесса; физика сейсмического процесса, различие характера очага и предвестников разноглубинных землетрясений



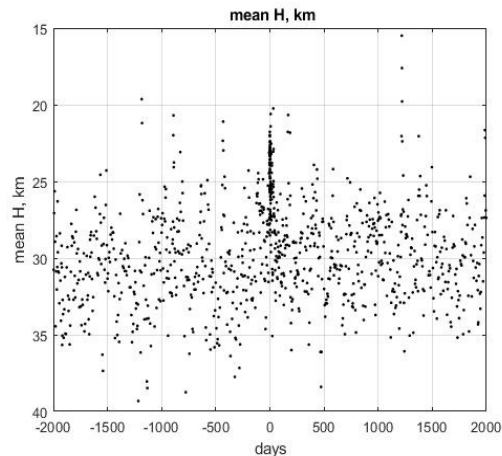
Теоретически землетрясения подразделялись обычно на обычные и неглубокие, на связанные с флюидным режимом, и на обусловленные фазовыми превращениями.

Но выявить эти различия в параметрах землетрясений удалось только недавно (2022).

Рис. Средние значения разницы глубин землетрясений по данным о положении гипоцентра и по решению сейсмического момента. Даны средние значения для групп из 120 событий с шагом 60 событий, GCMT каталог сейсмических моментов.

Именно это и ожидается, если в очаге землетрясения развит лёгкий флюид, прорывающийся в верхние горизонты при развитии трещиноватости в зоне очага.

По оси x глубина землетрясений; интервал глубин от 20 до 90 км отвечает развитию активных реакций дегидратации.

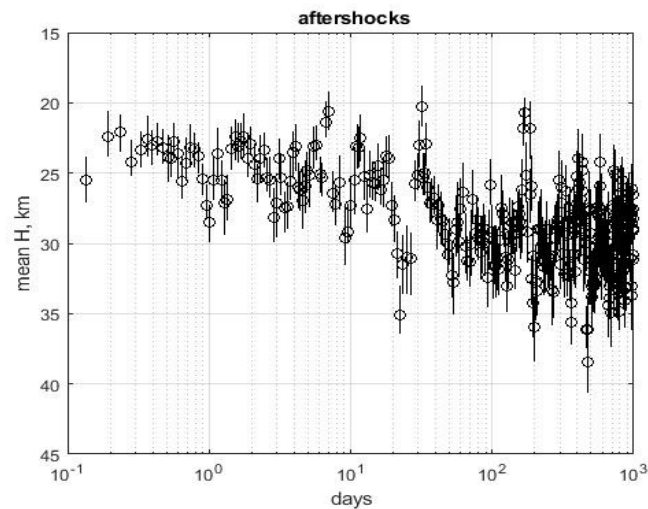
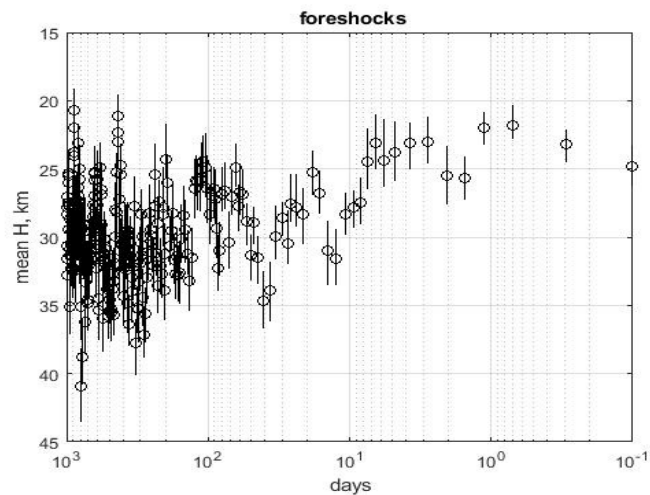


ООСЗ аномалия №3 - изменение средней глубины землетрясений.

Очаги фор- и афтершоков сильных событий (в интервале глубин H : ~ 10 -100 км) всплывают в окрестности главного события.

Эффект отвечает прорыву флюида малой плотности вверх при росте трещиноватости в очаге.

Диапазон глубин отвечает развитию в коре реакций дегидратации (глубины аномалии $\sim$ как на предыдущем слайде).



Имеем:

- 1) Учёт различия физики землетрясений разных глубины.
- 2) Еще одну ООСЗ аномалию – **изменение средней глубины землетрясений.**

Параметры ООСЗ: тысяча крупнейших событий, пространственных ($R \leq 1$ L, $M_w \geq 5,2$; каталог GCMT).
Для форшоков $H \sim 5 \lg(dT, \text{дни}) + 24$.

ИМЕЕМ:

Метод ООСЗ позволяет определить (параметризовать) характерный набор предвестниковых аномалий с требуемой детальностью

Выявлены также (ожидаемые) различия предвестниковых ООСЗ аномалий для разноглубинных землетрясений.

ВОПРОС:

Могут ли такие ООСЗ аномалии быть выделены в форшоковых областях отдельных сильных землетрясений и служить основой алгоритма прогноза ???

Перейдем к анализу форшоковых областей перед отдельными сильными событиями - насколько часто там будет наблюдаться хоть одна из искомых ООСЗ аномалий???

Область – (3-4) R размеров очага главного события (с учетом глубины).

Интервал времени до сильного события возьмем: 5, 10, 50, 100, 200 дней
(учитывая характерную продолжительность ООСЗ аномалий ~ 100 дней).

Будем учитывать прогнозную аномалию, если случайная реализация
наблюденной связи типа

$\log(N) = a + b \log(\Delta t)$ (для числа событий)

или

$A = a + b \log(\Delta t)$ (для других аномалий)

имеет вероятность менее 0.05.

Каталоги для проверки:

мировые ISC-GEM и GCMT;

региональные: Камчатка-Сев. Курилы, JMA (Япония);

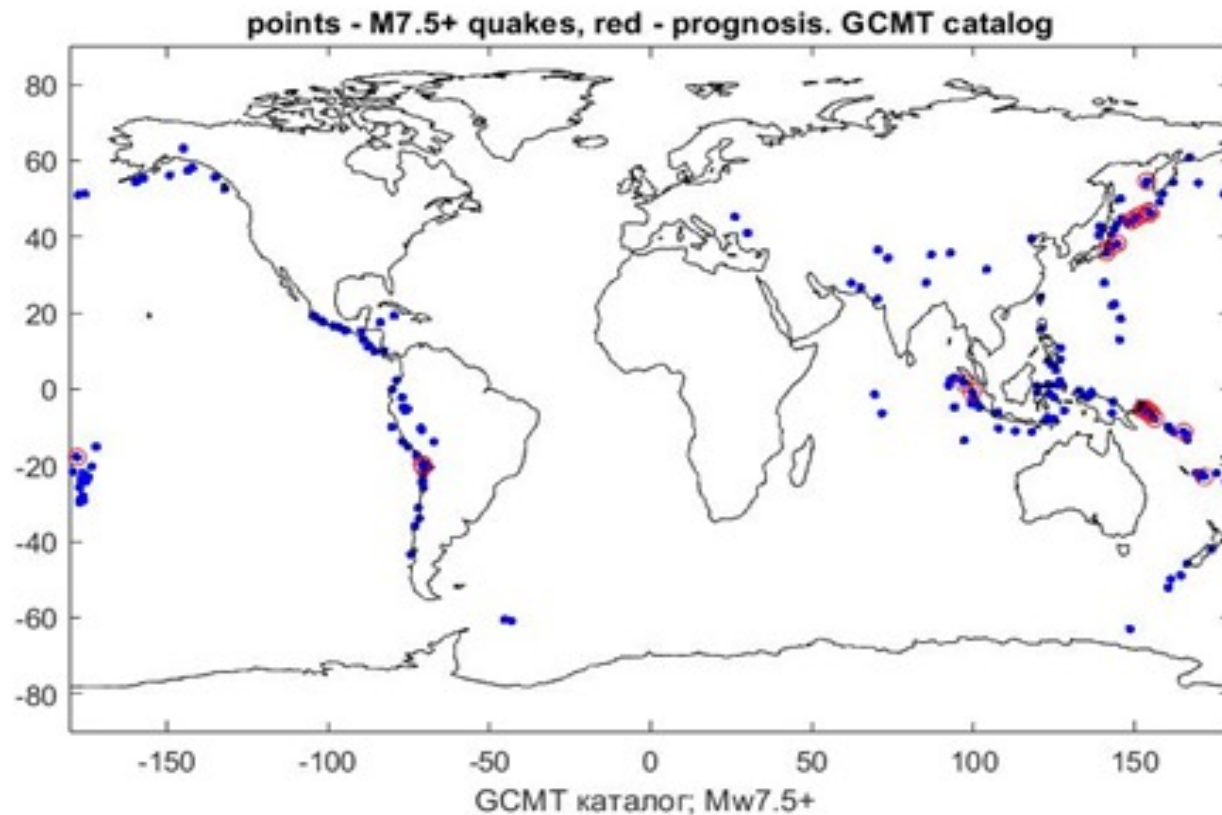
область дуплета Турецких землетрясений 2023 года;

область мега-землетрясений: Тохоку и Андаманского;

область сильнейшего Камчатского землетрясения 2025 года.

Самый многочисленный ISC-GEM каталог (целевые события M7.5+).

Нет связи между географическим положением, временем или глубиной землетрясений, где наблюдается (часто неоднократно у одного и того же землетрясения) ожидаемая по ООСЗ аномалия.

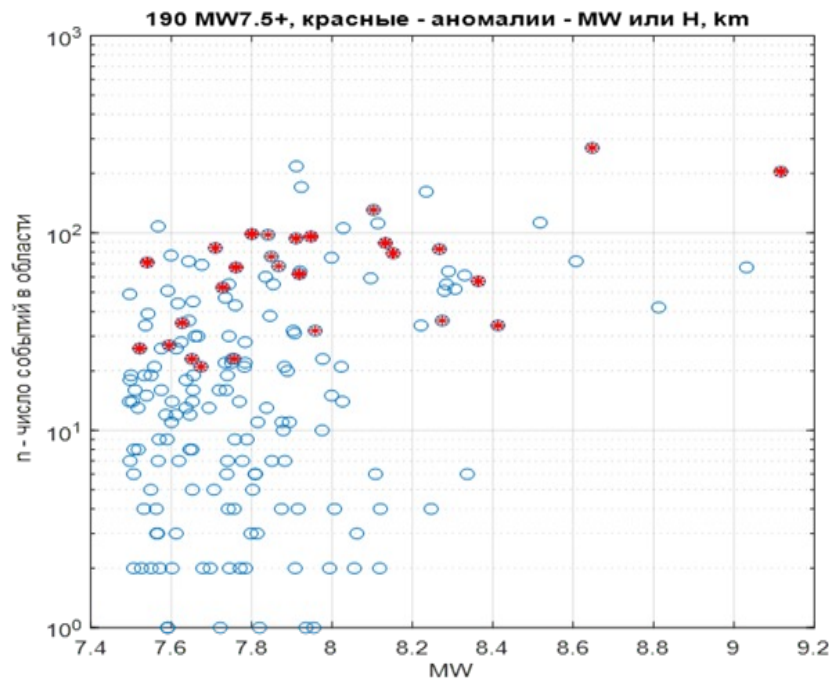


Пример. Нет связи расположения спрогнозированных событий с географическим положением, разве таких аномалий больше в Японии

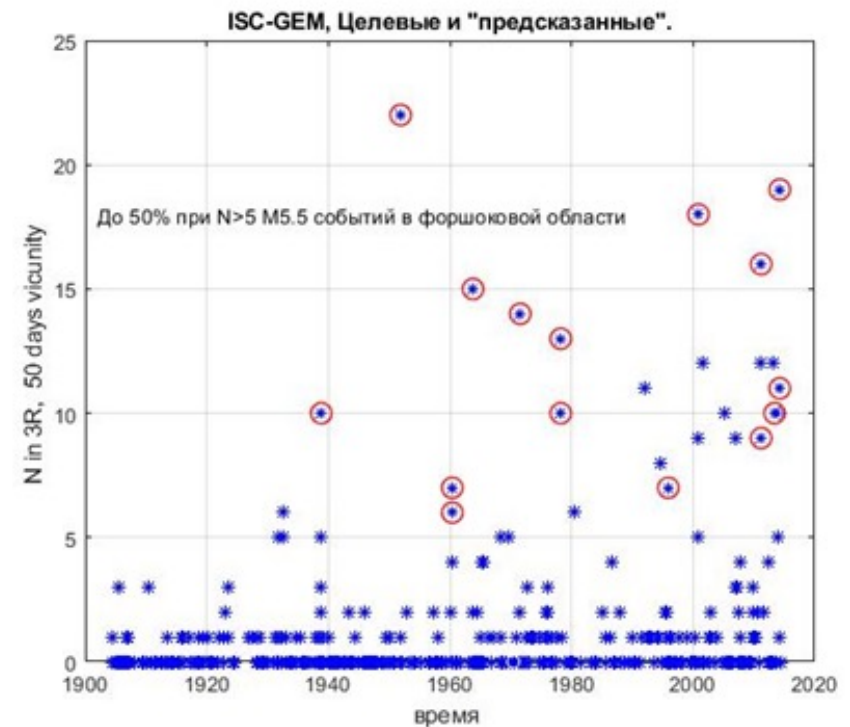
ISC-GEM каталог, продолжение:

целевые (M7.5+) и из них ретроспективно спрогнозированные.

«Спрогнозированных» событий мало, но наблюдается связь с магнитудой события и – сильнее – с числом событий, записанных в форшоковой области данного сильного землетрясения



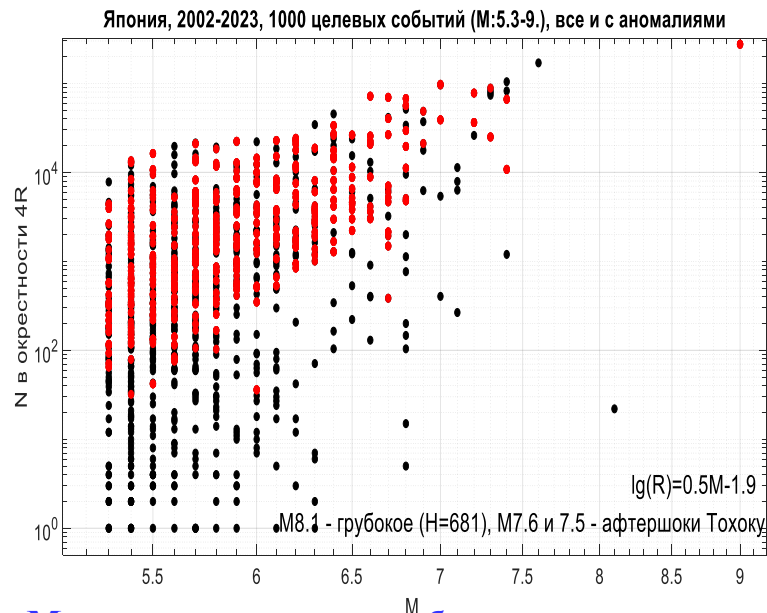
Магнитуды главного события и число слабых предшествующих событий в 3R окрестности главного очага за весь период каталога



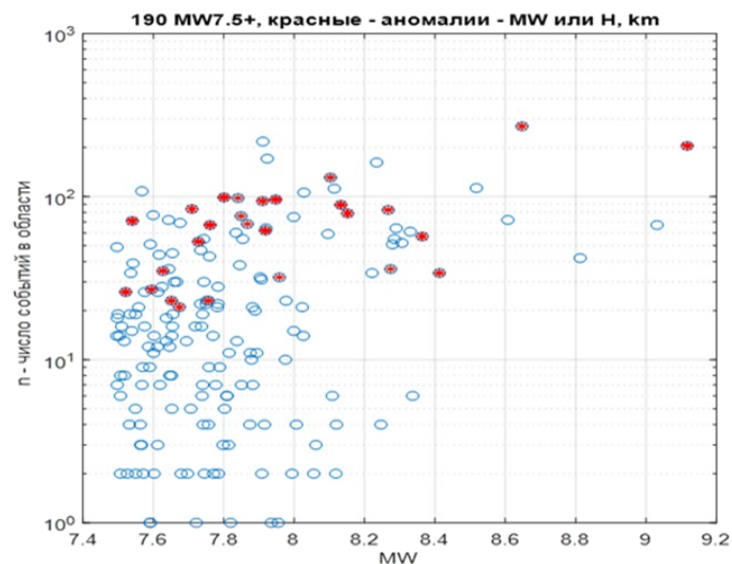
Время главного события и число слабых очагов в 3R окрестности за 50 дней до главного события

Целевые и из них **ретроспективно спрогнозированные.**

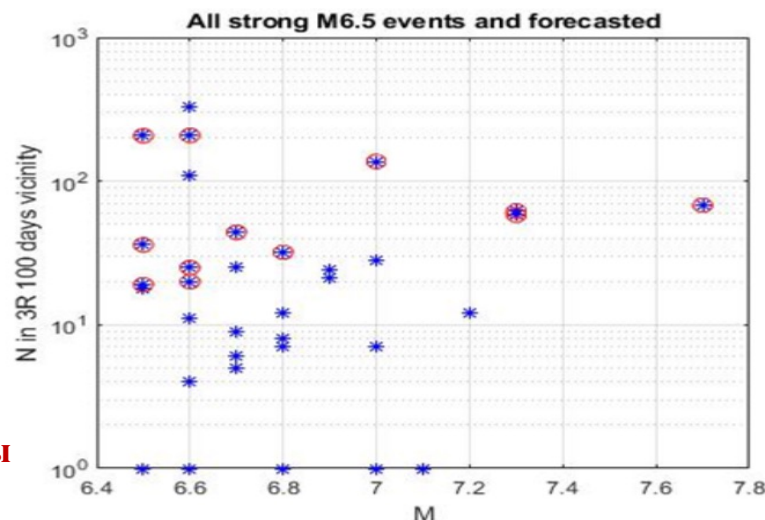
Связь с числом событий, записанных в очаговой области.



Магнитуды главного события и число слабых предшествующих событий в 4R окрестности главного очага за весь период каталога (JMA, Япония).



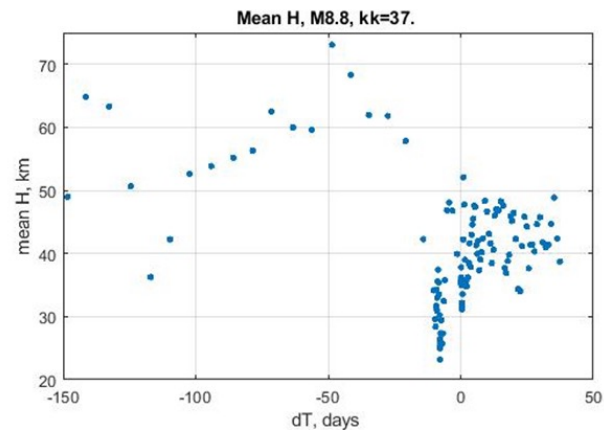
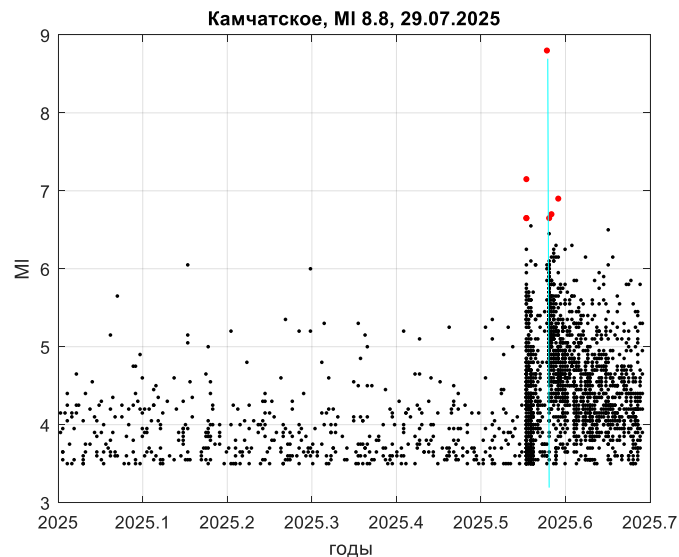
Каталог GCMT.



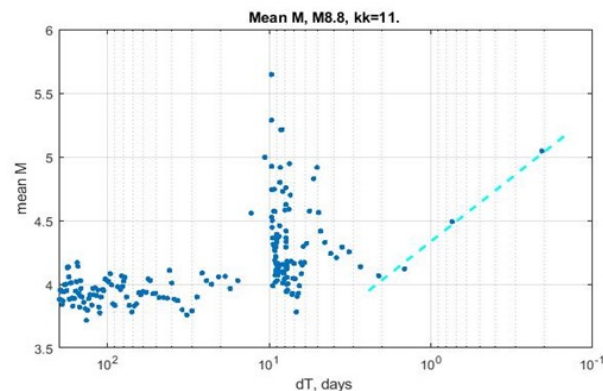
Каталог Камчатка-Курилы

Камчатское землетрясение 29.07.2025 г., MW = 8.8

Форшок и основное событие (ООСЗ область 3R).

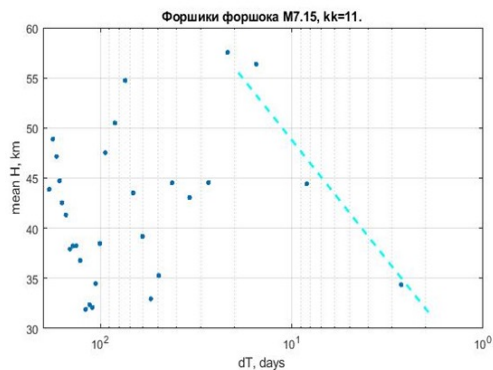


Аномалия Н, км; ООСЗ аномалии нет.

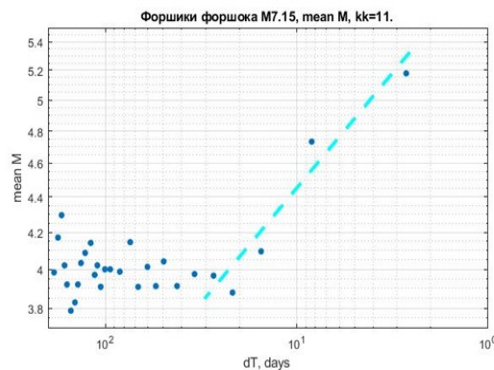


ООСЗ аномалия М

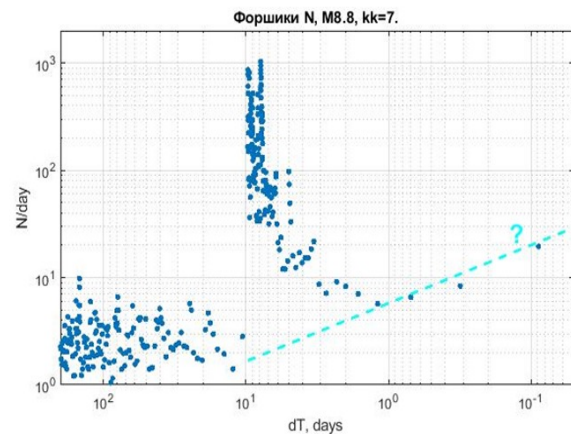
Форшок М7.15



ООСЗ аномалия Н, км



ООСЗ аномалия М



ООСЗ аномалия потока событий

Статистика случаев ретроспективного прогноза землетрясений по мировым и региональному каталогам, и по отдельным случаям:

Каталоги	Число событий	Число выявленных аномалий	Число целевых событий с аномалиями	Доля “предсказанных” землетрясений
Мировые	M7.5+			
ISC-GEM (1904–2014)	414	75	23	4%
GCMT (1976–2023)	117	40	14	12%
Камчатка–Северные Курилы (1962–2020)	M6.5+			
	49	59	13	27%
Южная Турция, (2015–2023)	M7.5+			
	2	4	2	100%
Япония, JMA (2002-2023)	M5.3+			
	1000	1780	~500	~50
Мега-землетрясения: Тохоку, Андаманское	M9.0+			
	2	4	2	100%
Камчатские, 2025	M 8.8, 7.2			
	1(2)	4	2	100%

РЕЗЮМЕ

Ранее проведенные работы по построению и анализу обобщенной окрестности сильного землетрясения (ООСЗ) на основе суммирования информации по большому числу (сотни, до тысячи) окрестностей отдельных сильных землетрясений позволяют получать детальные модели типовых предвестниковых ООСЗ аномалий, при этом с учетом различия некоторых прогнозных признаков для разноглубинных землетрясений.

Совокупность ООСЗ аномалий использована для ретроспективного «прогноза» землетрясений. На основе мировых ISC-GEM и GCMT каталогов, региональных каталогов КФ ГС РАН и JMA (Япония), и отдельных важных случаев рассмотрен вопрос, насколько часто типовые ООСЗ аномалии надежно фиксируются в областях подготовки отдельных сильных землетрясений.

Наблюдается сильная тенденция роста доли ретроспективно спрогнозированных целевых M_0 событий с улучшением (относительной) полноты каталога.

При хорошем объеме данных (полнота каталога: $M_s = M_0 - (4-5)$), вероятность наблюдения одной и более ООСЗ аномалий приближается к 100%.

Проблемы:

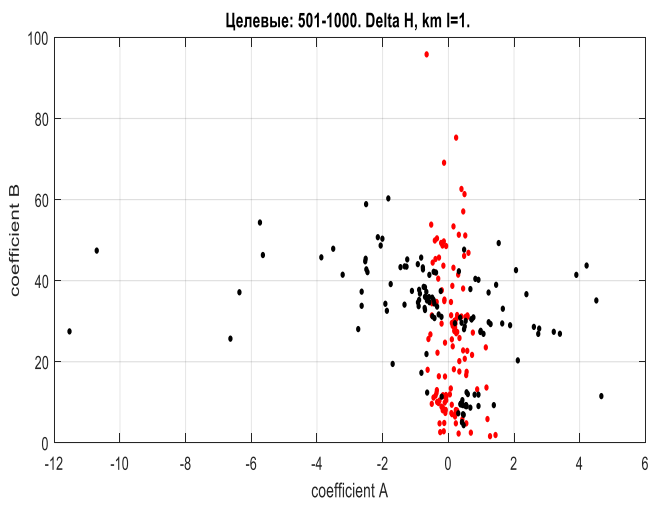
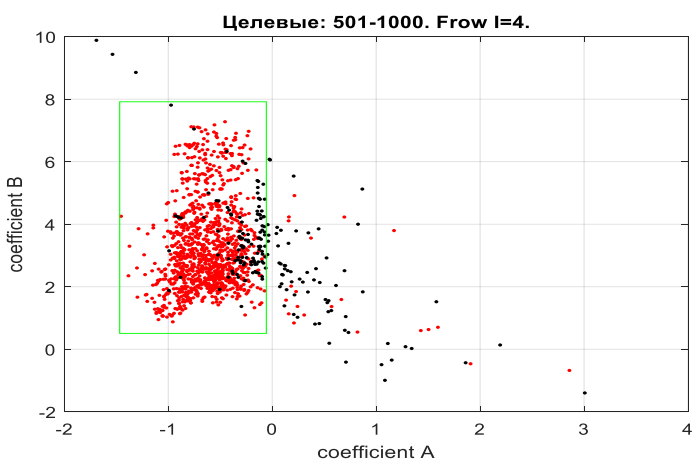
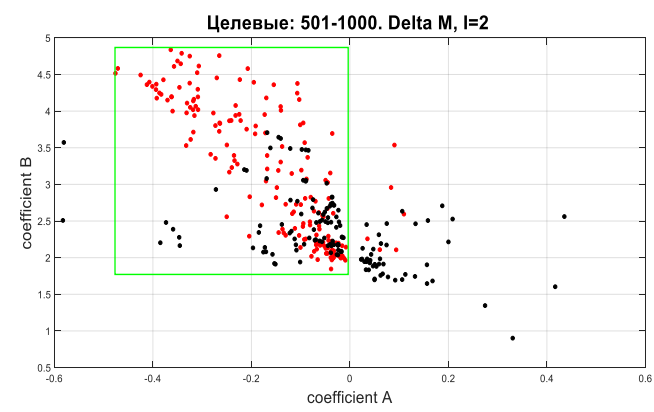
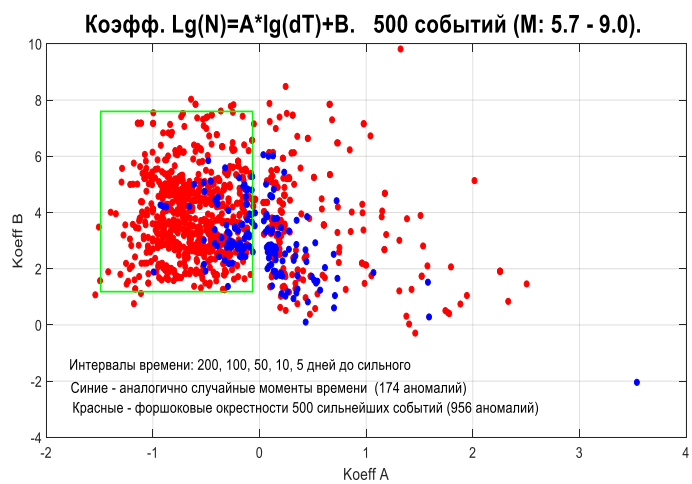
Маскировка сильным форшоком.

На настоящем этапе метод дает большое число ложных тревог.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

Целевые реальные (красные) и случайные события (JMA каталог, Япония).

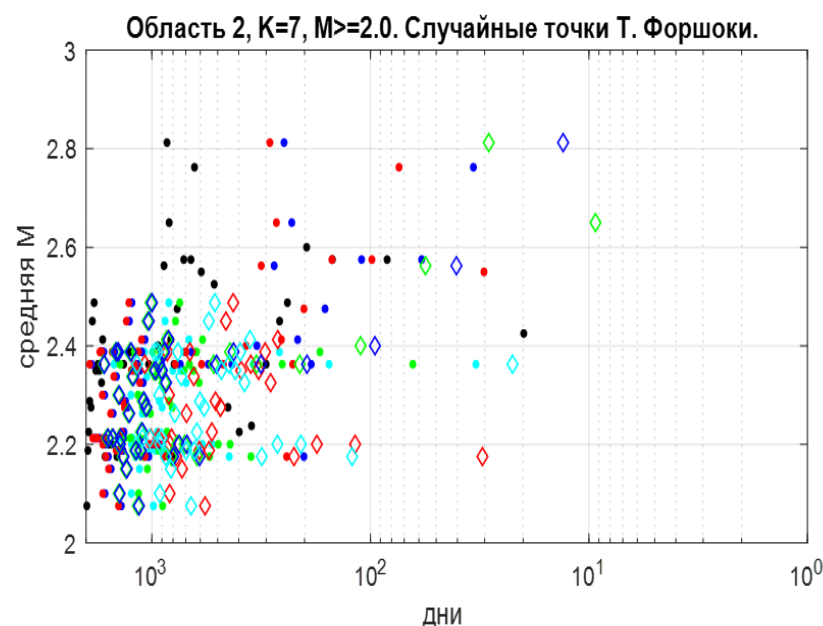
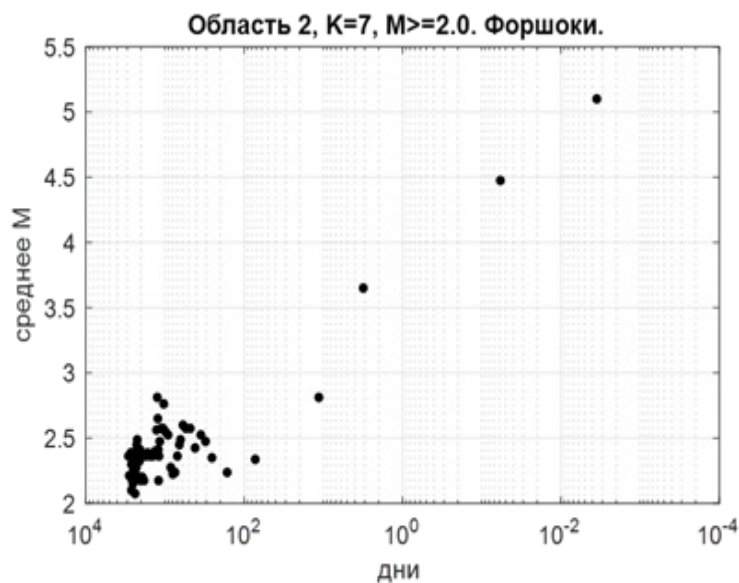
Значения коэффициентов регрессии “А”, “В”. Разные аномалии.



**Возможны ложные аномалии, аналогичные по характеру
искомым ООСЗ аномалиям.**

Насколько часто ООСЗ аномалия возникает в случайный момент времени??

Случай дуплета Турецких землетрясений 2023,
аномалия типа «средняя магнитуда».

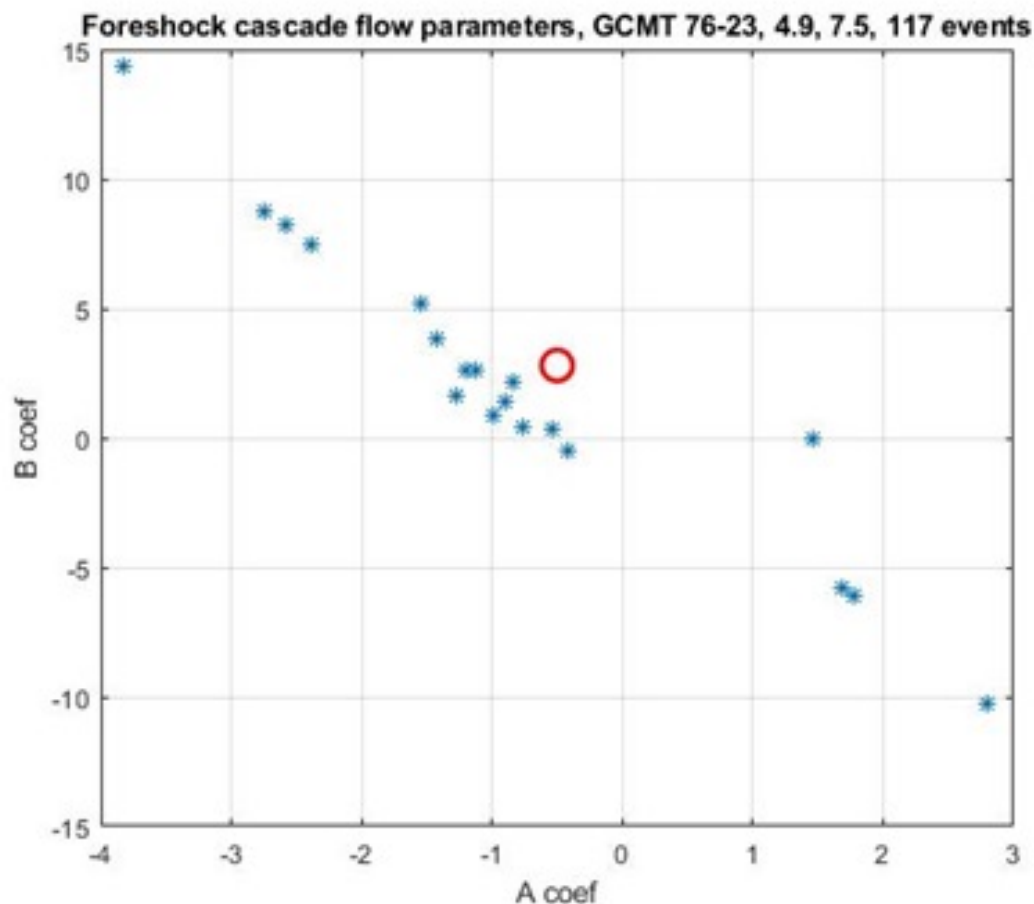


Средние значения магнитуды для реальной последовательности форшоков (левая панель) и для случайных моментов времени (справа).

В данном (хорошем) случае вероятностью случайной аномалии аналогичной искомой форшоковой ООСЗ аномалии менее 1%.

Но чаще ложных аномалий довольно много.

Пример разброса коэффициентов регрессии “А”, “В” для отдельных форшоковых последовательностей (* звездочки) в сравнении со средним значением этих коэффициентов для всей совокупности сильных событий (красный круг).

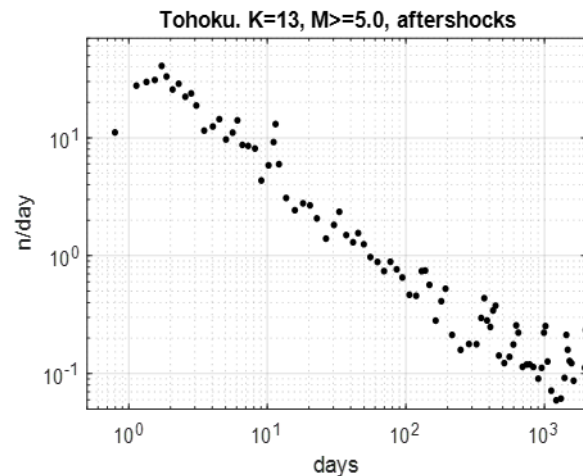
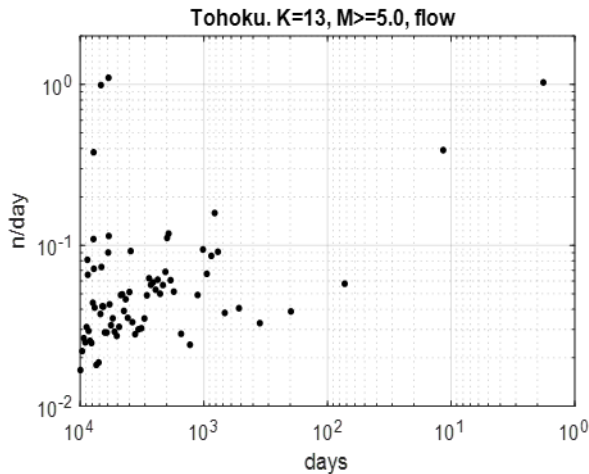
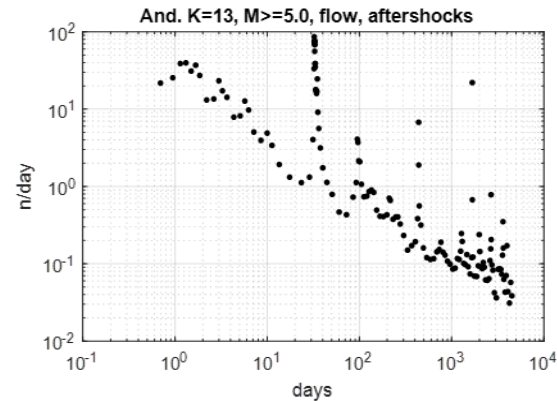
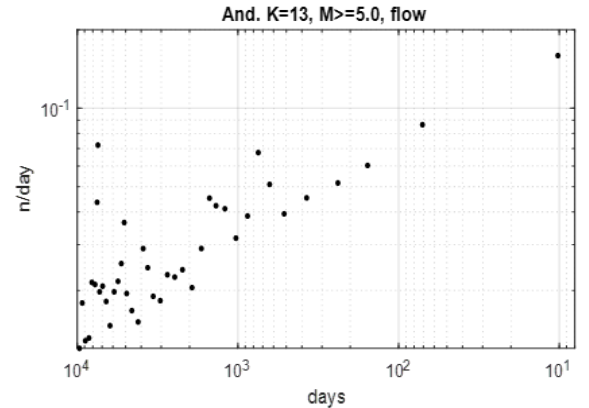


Форшоки, каталог GCMT

Особенно много форшоков в огромных зонах подготовки Mw9.0+ мега-землетрясений.

Видны ли для них типовые форшоковые ООСЗ аномалии?

Пример аномалии роста числа событий



Режим фор- и афтершоков Андаманского (верхняя панель) землетрясения и землетрясения Тохоку (нижняя); поток событий.

Виден степенной рост потока событий к моменту главного землетрясения.