



Новый алгоритм прогноза землетрясений – подходы и вопросы

М.В. Родкин

¹ ИТПЗ РАН, Москва

² ИМГиГ ДВО РАН, Южно-Сахалинск,

Проблема получения эффективного прогноза землетрясений весьма далека от своего решения. Широко распространено даже мнение о принципиальной невозможности такого прогноза. Также распространено мнение, что проблема прогноза не будет решена, пока не будет создана адекватная физическая модель сейсмического процесса, заведомо существенно различного для разноглубинных землетрясений.

Обсуждается возможность создания и использования нового алгоритма прогноза землетрясений, где за основу берется набор предвестниковых эффектов, ранее надежно выявленных в обобщенной окрестности сильного землетрясения (ООСЗ). При этом принимается во внимание различие физических механизмов реализации разноглубинных землетрясений.

В ООСЗ существование целого набора длительных (~ 100 дней) прогнозных аномалий не вызывает сомнения, при этом характер этих средних аномалий может быть вполне определенно описан количественно: - амплитуда аномалий A растет к моменту ОСЗ как $A = a \cdot \log(dT, \text{дни}) + b$, а для числа событий N как $\log(N) = a \cdot \log(dT) + b$.

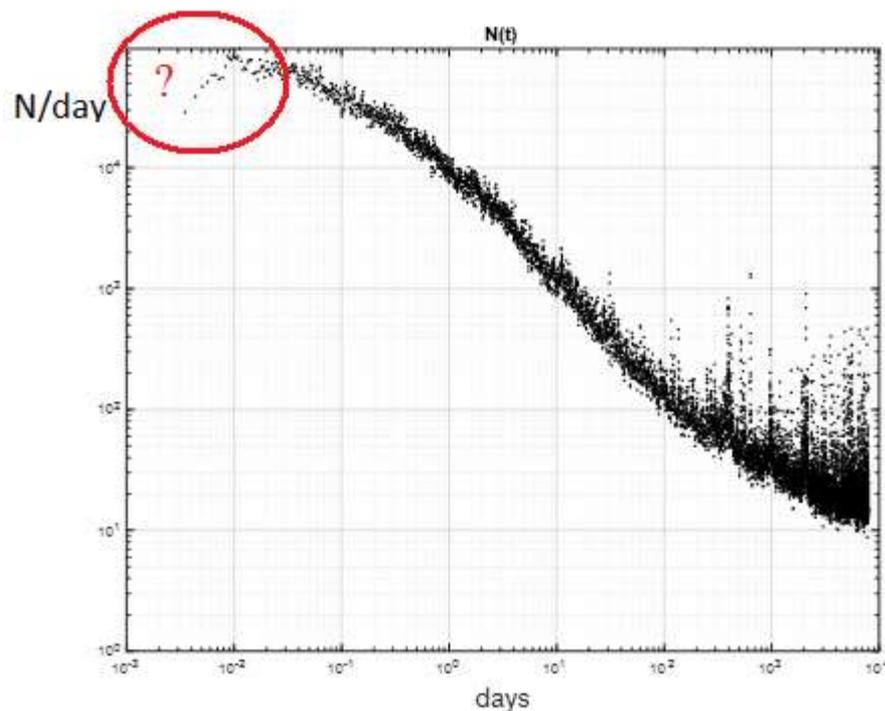
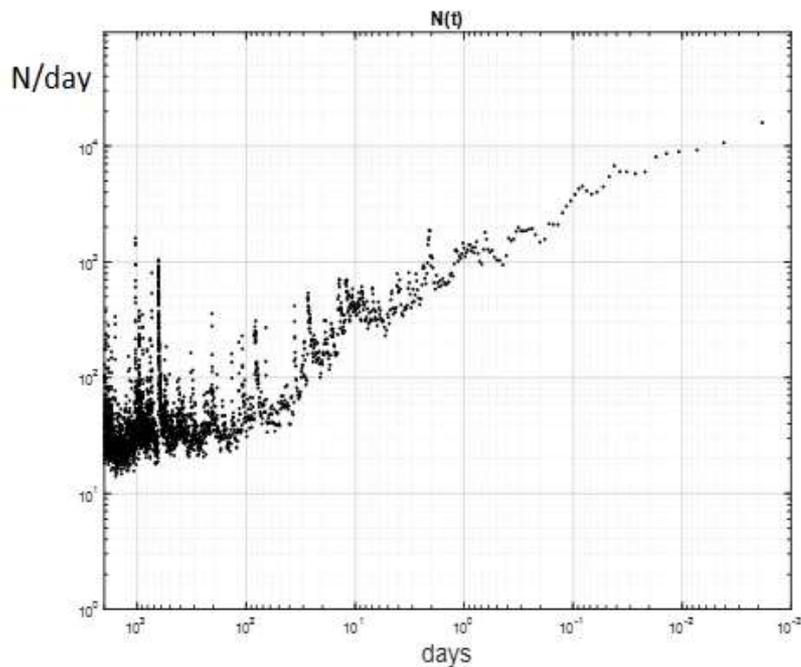
В зависимости от каталога число таких аномалий меняется от 3-х до 6 – 8.

Встают вопросы –

- 1) - является ли это вполне четко определяемое среднее поведение – средним на фоне случайного шума, или это также “среднее” от нескольких возможных сценариев?
- 2) - насколько регулярно такое среднее поведение может быть выявлено в очаговых областях отдельных сильных землетрясений?

Эти вопросы и обсуждаются ниже на основе данных мировых и региональных каталогов землетрясений.

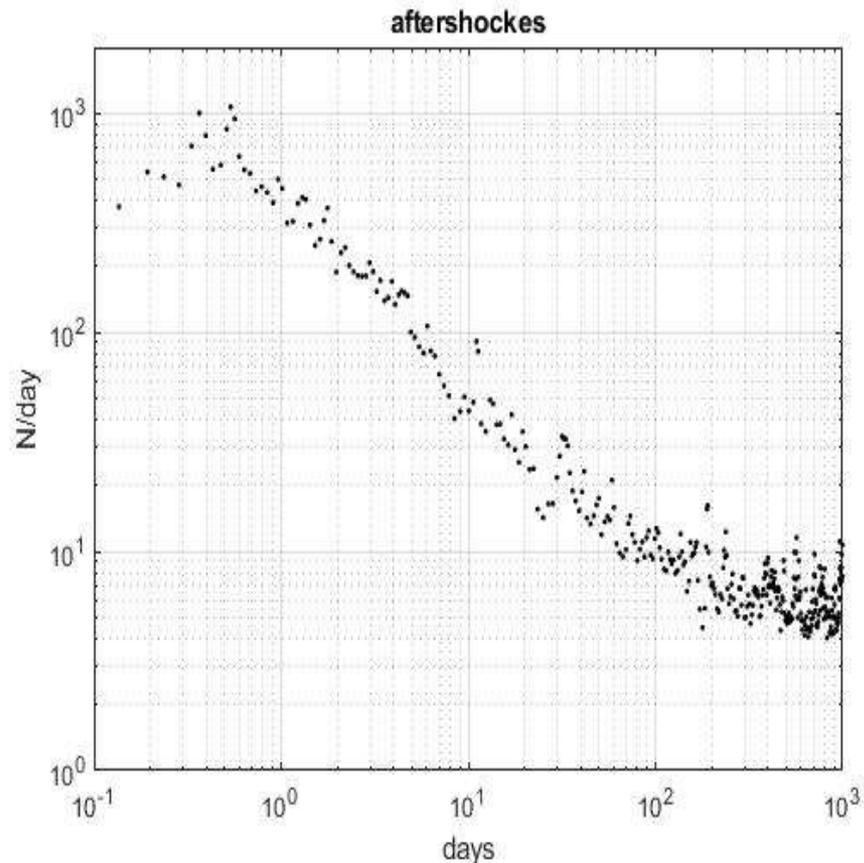
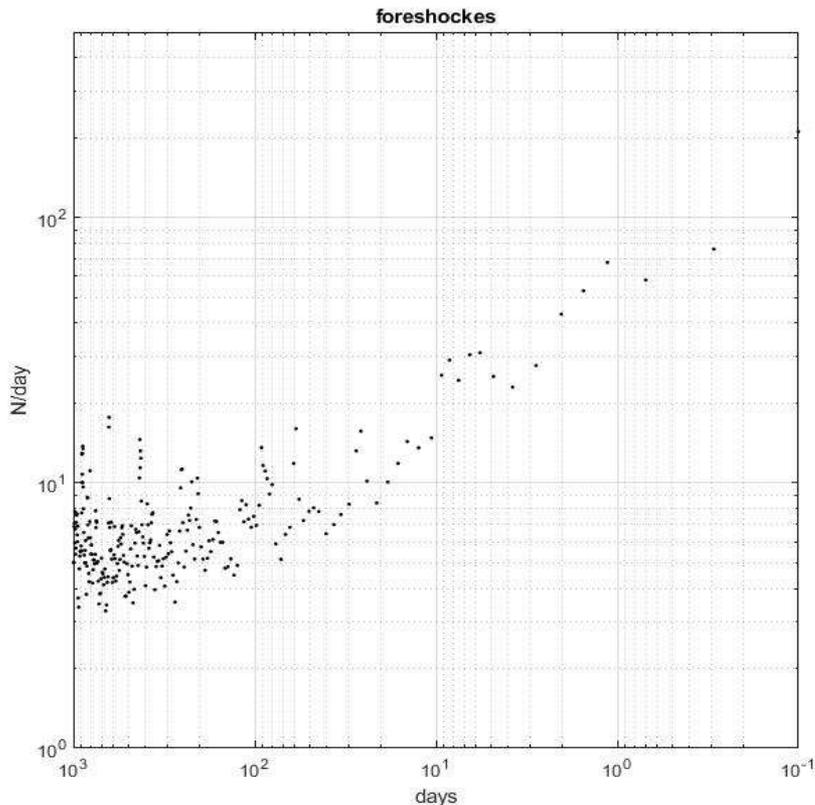
ООСЗ. Режим фор- и афтершоков по данным **ISC каталога, $M_b > 5.0$**
(качественно аналогично результатам по GCMТ 1977-2016, $M_w > 5.4$ и др. данным)



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

Многие ранние форшоки и некоторые слабые события заведомо пропущены, но на основные результаты далее это НЕ влияет

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



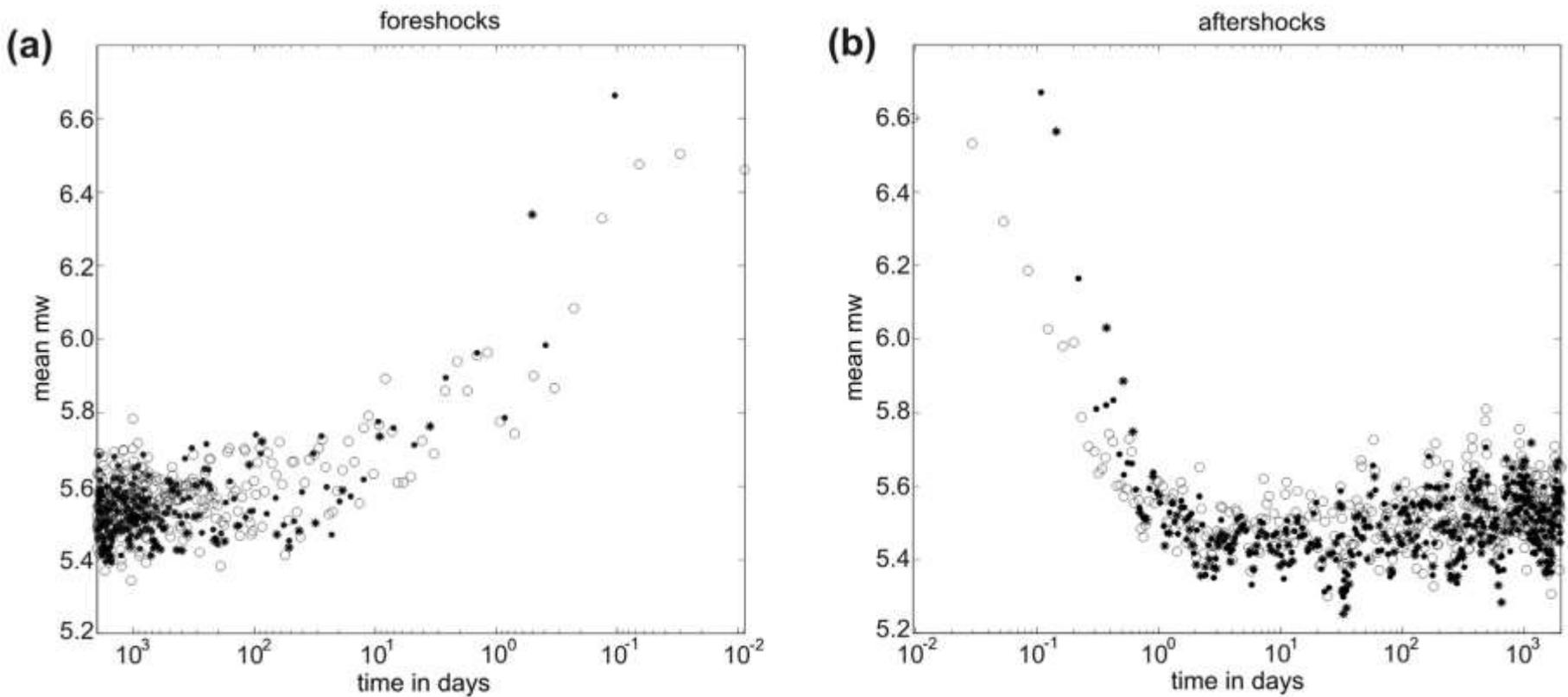
Динамика форшокового (а) и афтершокового (b) процесса в ООСЗ, GCMТ каталог. $M_w \geq 5.4$, формально каталог полог, Г-Р соблюдается.

Ранние форшоки видимо имеют пропуски

Пример аномалий в ООСЗ:

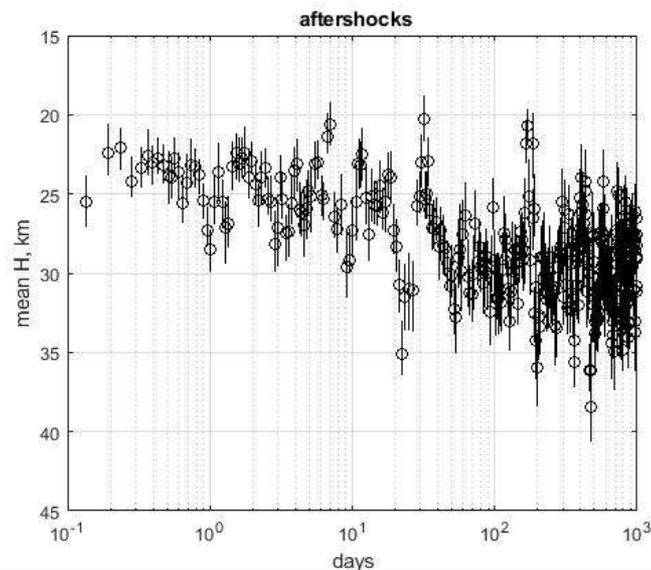
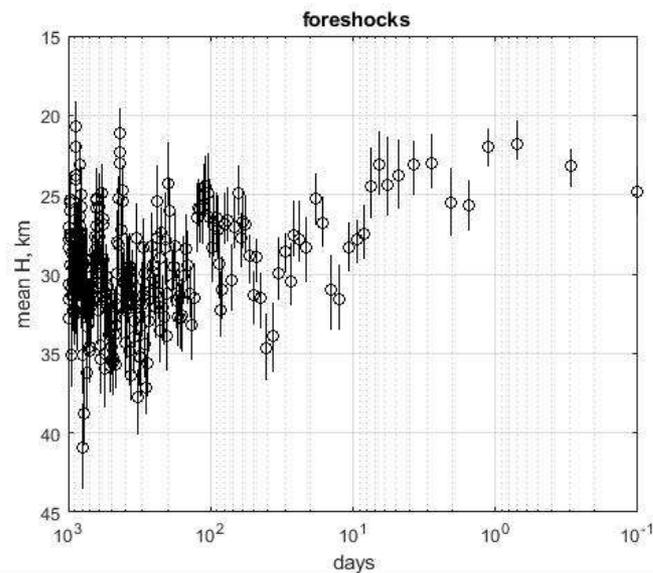
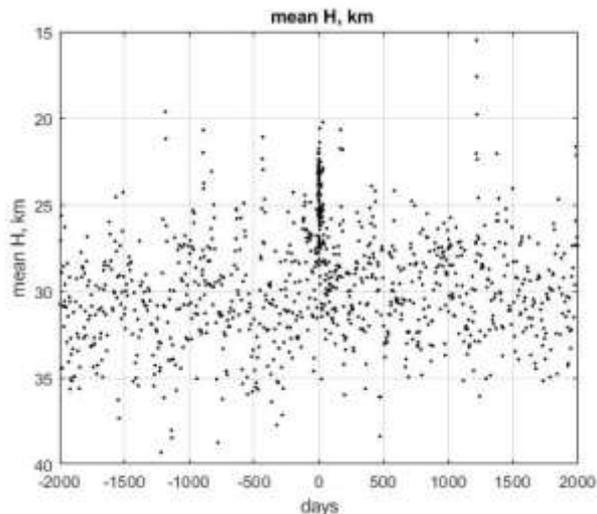
Изменение средних значений M_w (аналог аномалии уменьшение b -value) для каскадов форшоков (а) и афтершоков (б). Точки и кружки соответствуют окрестностям для 300 и 1000 крупнейших событий. Параметры ООСЗ: $R \leq 1 L$ (размер очага), $M_w \geq 5.2$; каталог GCMТ.

Для форшоков имеем регрессию: $M_w \sim -0.17 \log(dT, \text{дни}) + 6.0$



Примеры аномалий в ООСЗ, изменение средней глубины событий.

Изменения средней глубины событий в ООСЗ, каталог ISC.



Изменение средних значений глубины событий (вверху), и форшоков (слева) и афтершоков (справа) в логарифмическом масштабе времени от момента обобщенного сильного события.

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

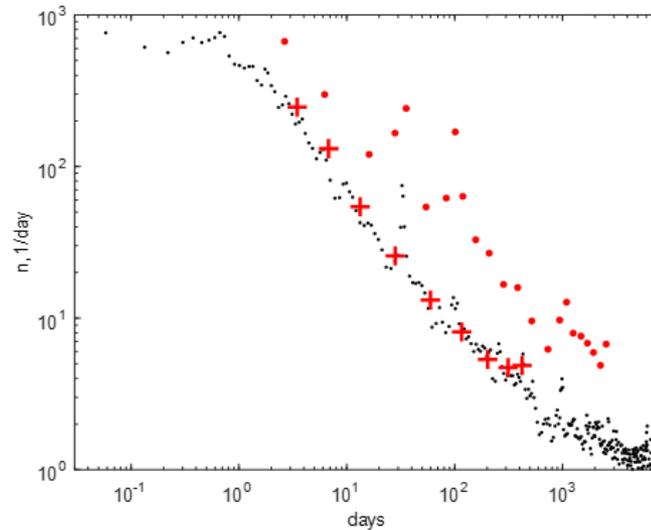
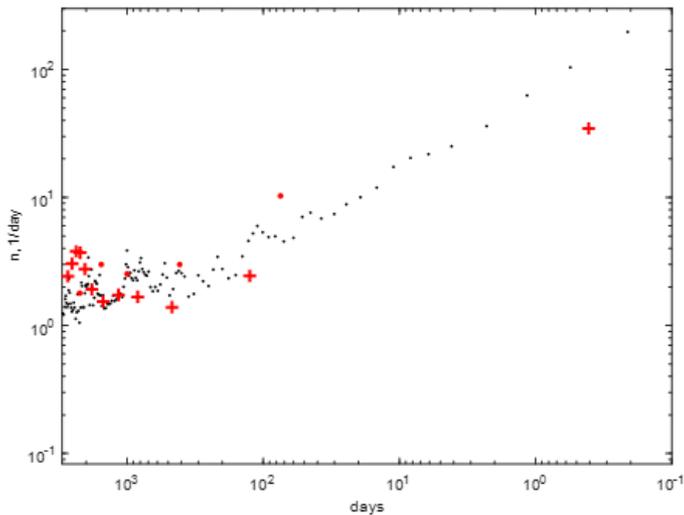
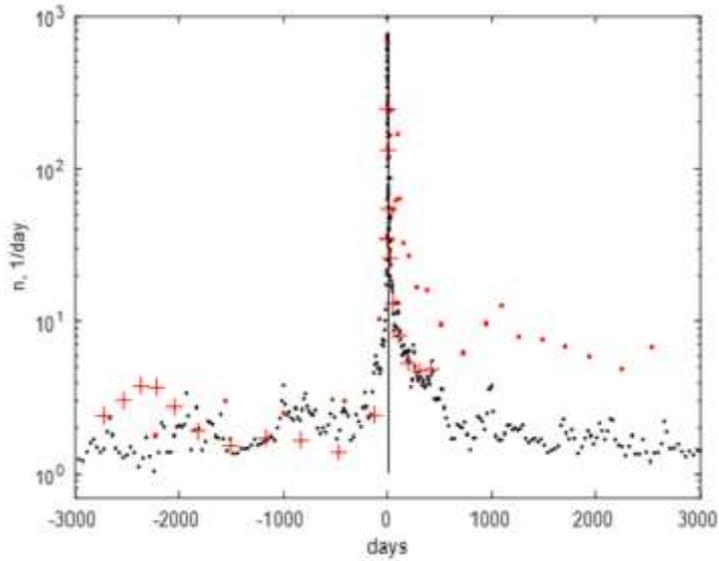
Существуют ли аналогичные аномалии в окрестности отдельных событий?

Аномалия в ООСЗ для мега-событий

По общемировым данным, форшоковая аномалия скорее угадывается, чем четко просматривается.

Аномалия потока событий:

GSMT с 1976 г. по 31 ноября 2012 г., $M < 70$ км.



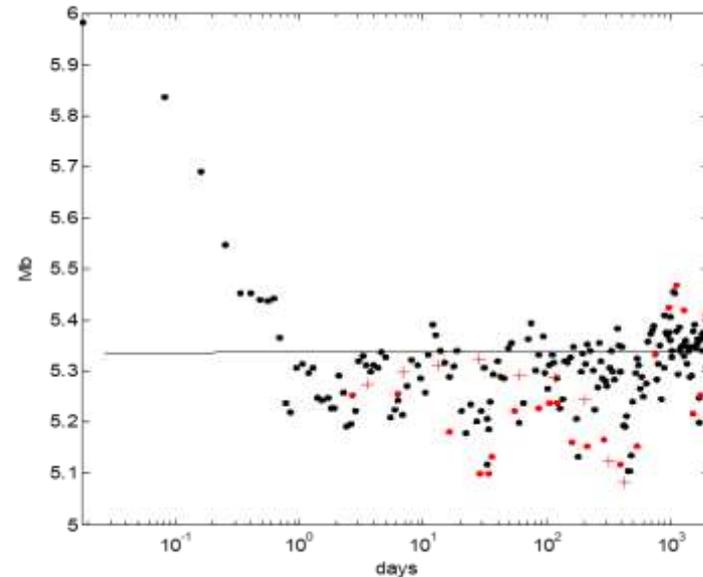
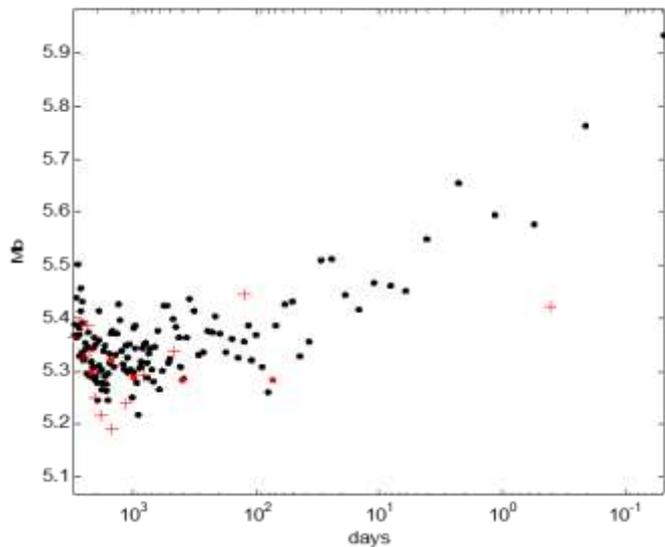
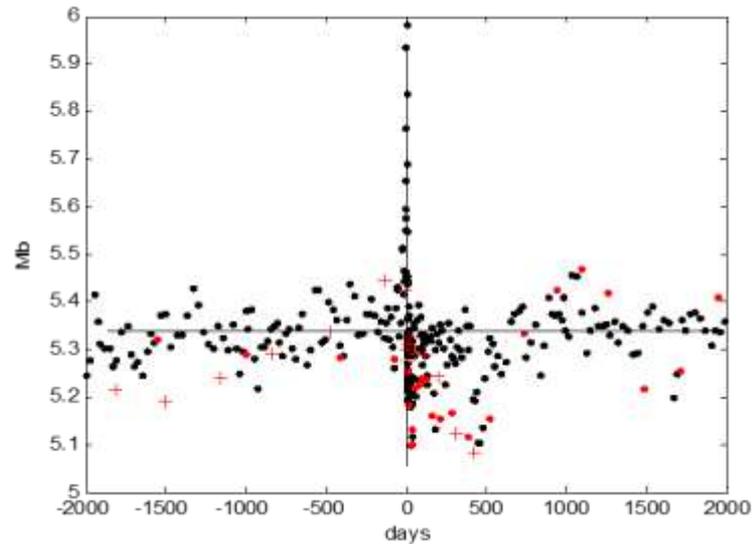
Частота событий в ООСЗ (маленькие черные точки) и в окрестностях Андаманского, 2004 г. (красные точки) и Тохоку, 2011 г. (красные плюсы) мега-землетрясений $M9+$. Время указано в линейной шкале (а) и в логарифмической шкале времени для форшоковой (слева, внизу) и афтершоковой (справа) последовательностей соответственно.

Аномалия в ООСЗ для мега-событий.

По общемировым данным, аномалия «средняя магнитуда» **фактически не просматривается.**

Однако аналог этой аномалии – b-value уменьшение – достаточно уверенно просматривается по региональному ЖМА каталогу

GSMT с 1976 г. по 31 ноября 2012 г., $H < 70$ км.



Изменения средних значений магнитуды M_b в ООСЗ для последовательных групп землетрясений (черные точки) в сравнении с данными Андаманского, 2004 г. (красные точки) и Тохоку, 2011 г. (красные плюсы) мега-землетрясений $M9+$ (а), и аналогичные данные в полулогарифмическом масштабе для форшоковой (слева внизу) и афтершоковой последовательности (справа). На панели справа линией дано среднее значение.

Таким образом, даже для мега-землетрясений с предположительно большим числом фор- и афтершоков уверенно просматриваемые в ООСЗ аномалии видны довольно плохо.

Что же можно сказать по отдельным, скажем M7.5+ ?

Рассмотрим режим в окрестности отдельных Mw7.5+ землетрясений по мировым ISC-GEM и GCMT каталогам.

Рассматриваются аномалии в окрестности Mw7.5+ землетрясений за 100 (и 50, и 200 дней) до момента сильного события. Возникает ли статистически значимая регрессия типа:

$$A = a \cdot \log(dT) + b, \quad \text{или (для числа событий } N) \quad \log(N) = a \cdot \log(dT) + b.$$

В GCMT каталоге (1976 – 2022) 190 таких событий.

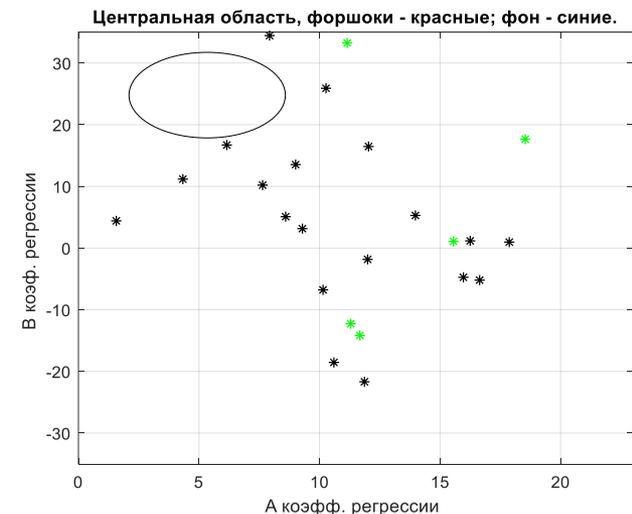
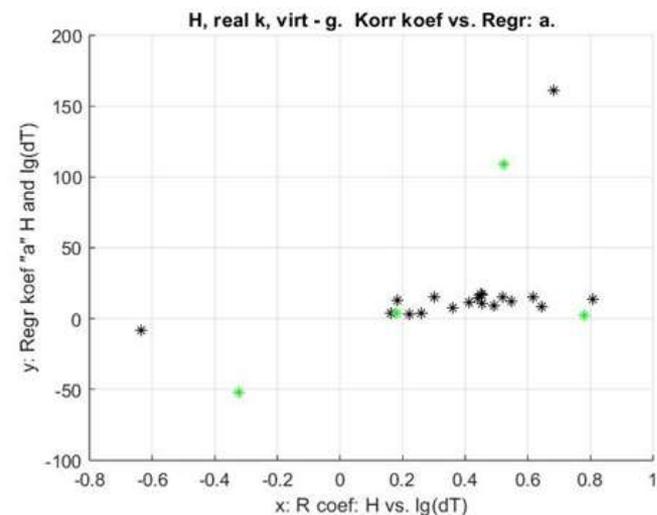
В ISC-GEM каталоге (1904 - 2014) - 414.

В качестве статистически значимых рассматривались регрессии для областей в 3 размера очага и $N \geq 10$, и $r \cdot \sqrt{N} \geq 2.0$.

Результаты сравнивались со случайными по времени.

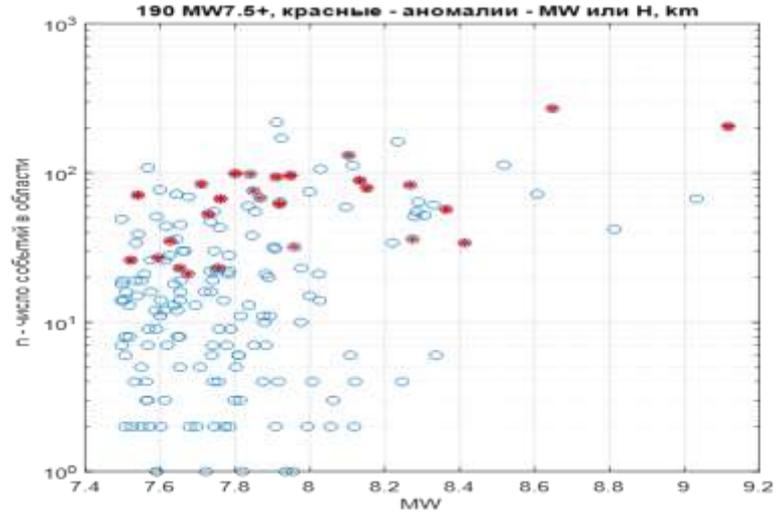
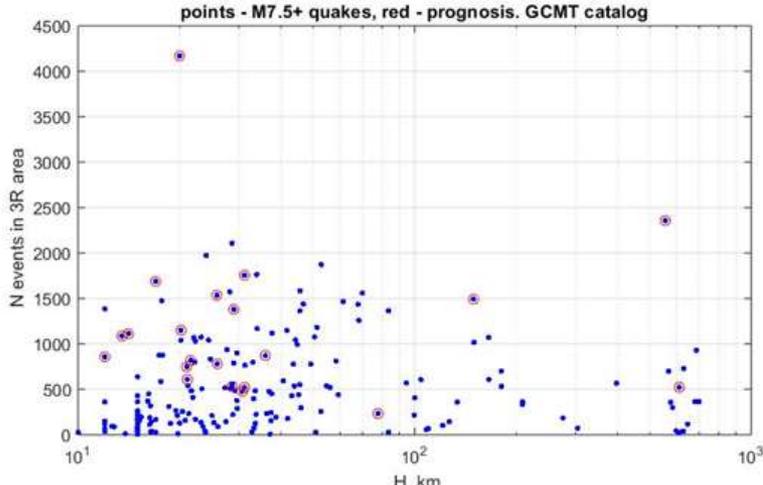
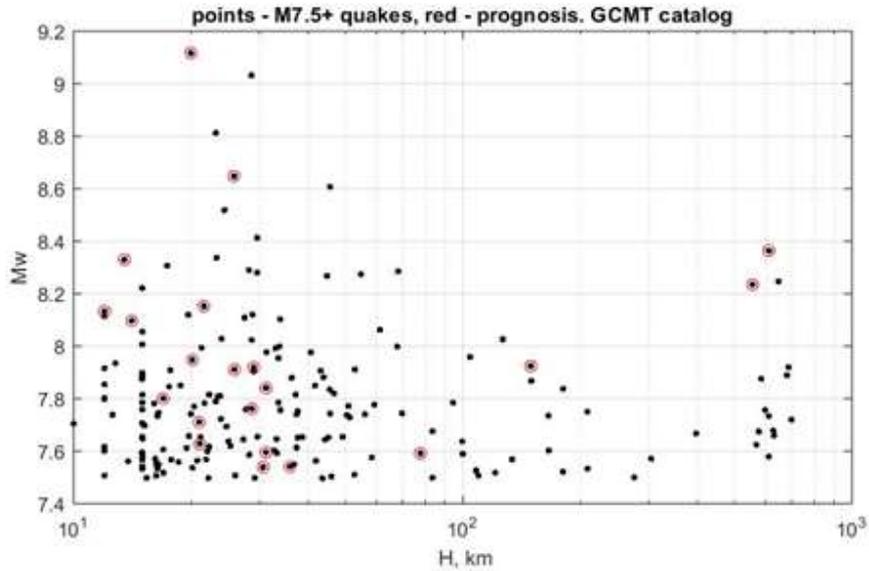
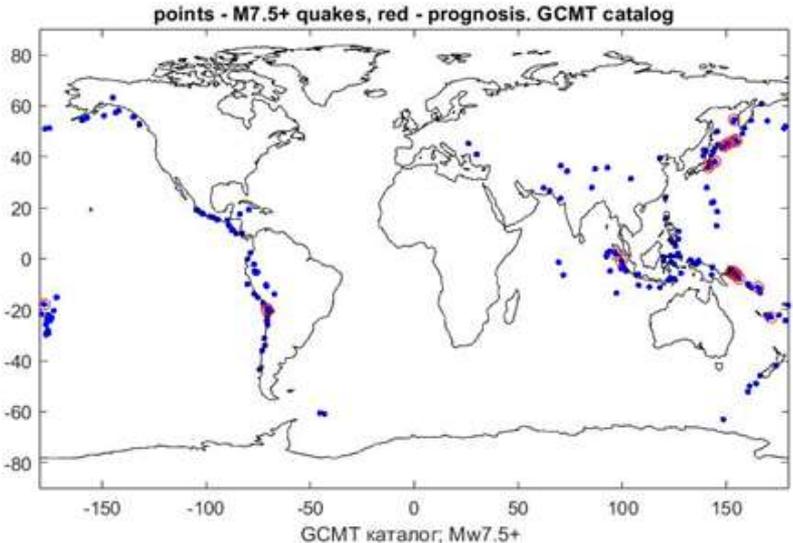
Ниже пример соотношения значений коэффициентов r – корреляции и a – регрессии для соотношения N vs. $\lg(dT)$. Значения коэффициента регрессии «а» близки к средним для ООСЗ ($a=5$, $b=24$); слева – ISC-GEM, справа - GCMT.

Форшоковые области – черные, случайные по времени – зеленые.



Не прослеживается связей между географическим положением или глубиной землетрясений, где наблюдается (часто неоднократно) ожидаемая по ООСЗ аномалия (вверху), ISC-GEM каталог.

Но лучше «прогнозируемы» события большой магнитуды и – особенно – с большим числом событий в форшоковой области (нижняя панель).



Статистика случаев «прогноза» землетрясений M7.5+ по мировым каталогам по отдельным аномалиям:

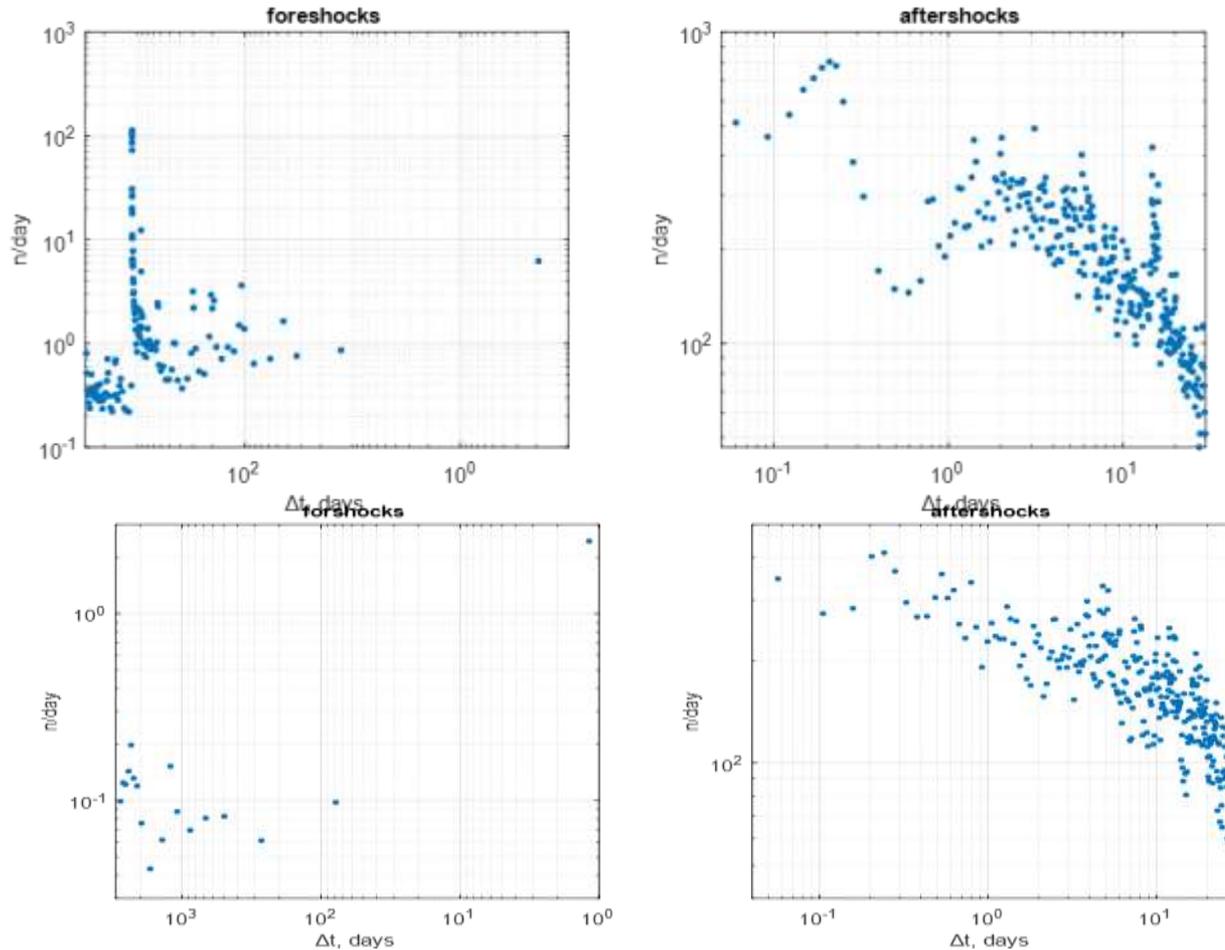
каталог	Число M7.5+ событий	Число выявленных аномалий, $R \cdot \sqrt{N} > 2.0$ $N > 10$	Число событий с аномалиями	доля «предсказанных» землетрясений
ISC-GEM	414	45	23	< 10%
GCMT	190	171	56	~ 25%

Прогнозом назвать нельзя, доля выявленных событий слишком мала, но видна БОльшая доля выявленных аномалий для случая более подробного каталога (GCMT).

В качестве дополнительных критериев можно использовать не только знак аномалии, но и степень близости к средним значениям из ООСЗ

А что при региональных системах регистрации?

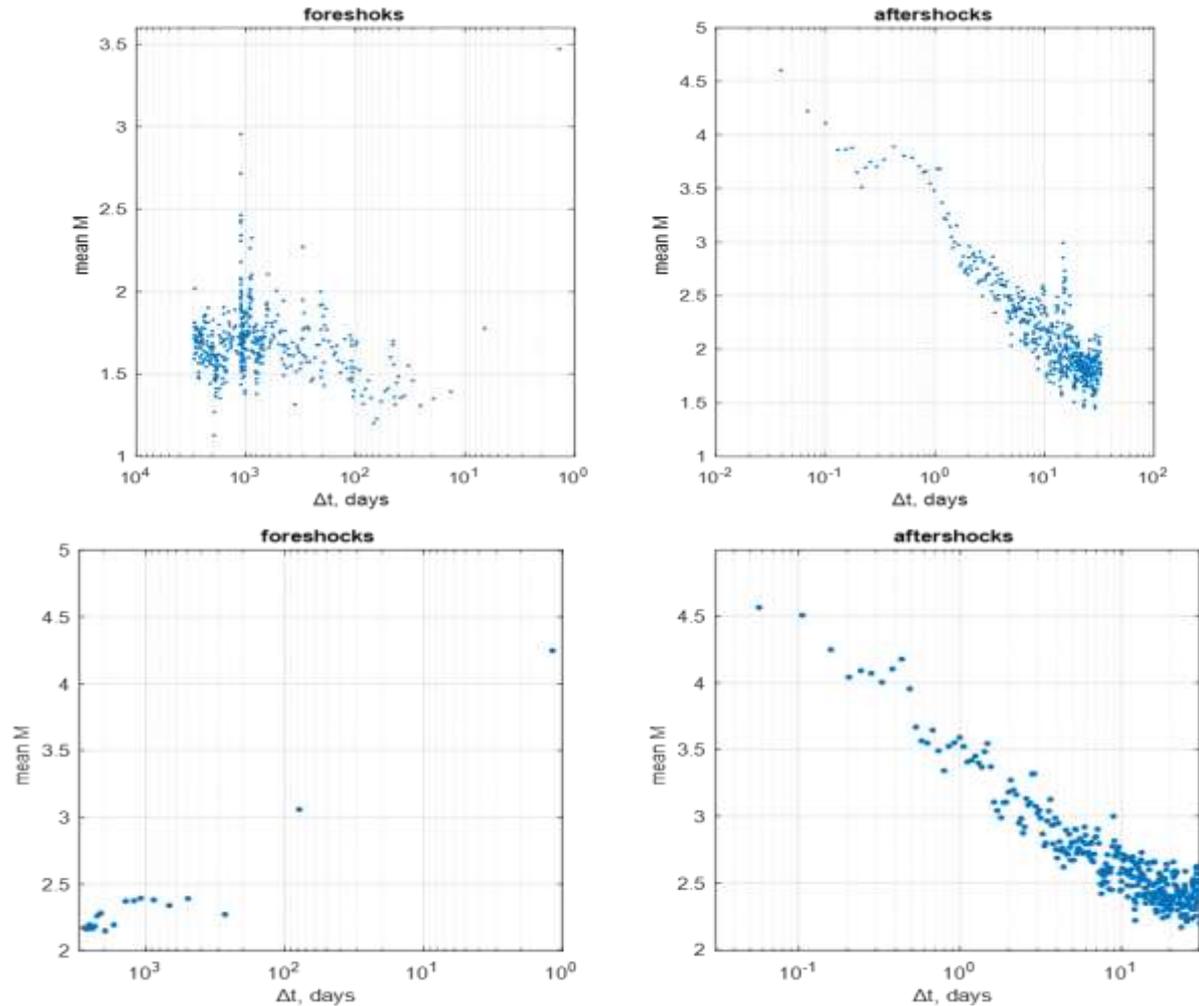
Случай дуплета Турецких землетрясений 2023 года; фор- афтершоковый каскады.



Плотность потока форшоков (левые панели) и афтершоков (правые) для фокальных областей 1-го (вверху) и 2-го сильного события.

Данные детальнее, и рост форшокового каскада предположительно просматривается

А что при региональных системах регистрации? Случай Турецких землетрясений 2023, аномалия «средняя магнитуда»



Средние значения магнитуды для последовательности форшоков (левые панели) и афтершоков (правые) для фокальных областей для первого (вверху) и второго сильного события (внизу).

Региональные данные детальнее, и аномалия «средняя магнитуда» просматривается

Выводы

Аномалии, ранее выявленные в ООСЗ присущи и отдельным очаговым зонам М7.5+ землетрясений. Иных систематически проявляющихся сценариев развития сейсмического процесса НЕ выявлено.

Особенности присущие ООСЗ выявляются (редко, но довольно регулярно) и вне связи с сильными событиями. Отвечает ли это ситуациям не реализовавшихся сильных событий?

Вероятность выявления свойственных ООСЗ аномалий в очагах отдельных землетрясений довольно мала. Это вероятность возрастает с ростом числа событий в данной очаговой зоне; т.е., вероятность получения прогноза растет с улучшением системы регистрации, в частности, по региональным данным она выше, чем по мировым.

Для увеличения вероятности выявления аномалий представляется перспективным перейти от анализа отдельных аномалий к их совокупному анализу, мониторингу степени близости текущего сейсмического режима к идеальному многокомпонентному поведению сейсмического режима в ООСЗ.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ