

# Закон продуктивности землетрясений

П.Н. Шебалин, С.В. Баранов, С. Narteau

*Институт теории прогноза землетрясений  
и математической геофизики РАН, Москва*

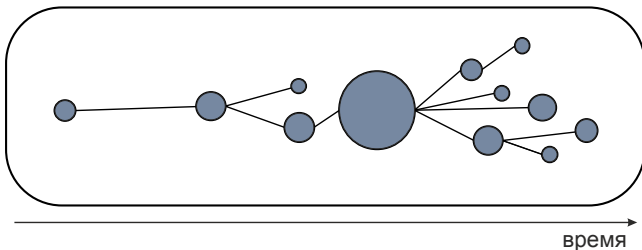
*Кольский филиал ФИЦ Единая геофизическая служба РАН, Апатиты  
Institut de Physique du Globe, Université de Paris*



Работа частично поддержана РФФИ, проекты 17-05-00749 и 19-05-00812

Триггерные эффекты в геосистемах, 4-7 июня 2019 г., Москва

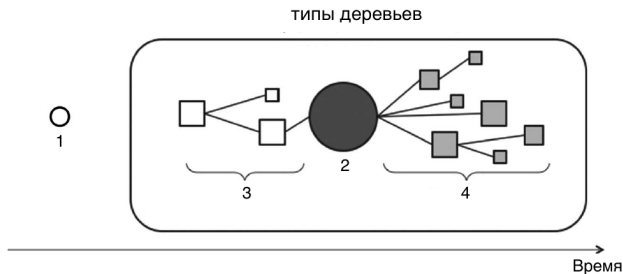
## Дерево ближайших соседей



Если определить в пространстве-времени-магнитуде меру связи между землетрясениями, то сейсмичность может быть представлена деревом связей между „ближайшими соседями“.

Сейсмичность региона - это одно „дерево“, в котором каждое событие имеет ровно одного „родителя“.

## „Лес“ связанных групп

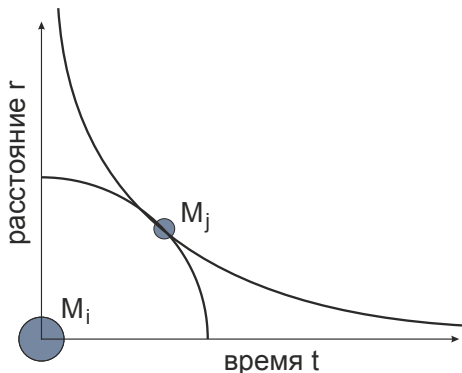


Если дополнительно ввести порог для этой меры, определяющий границу между связанными и независимыми землетрясениями, то дерево распадается на отдельные деревья связанных событий.

Каждое „дерево“ - кластер взаимосвязанных событий.

События, не имеющие „родителя“, - фоновые.

## Функция близости $\eta$



Время всегда направлено:  $\eta_{ij} = \infty$ , если  $t_i > t_j$   
Frohlich, Davis, 1990:  $\eta_{ij} = \sqrt{r^2 + Ct^2}$ ,  $C=1$  км/сут.  
Baiesi, Paczusky, 2004:  $\eta_{ij} = r^d t 10^{-bM_i}$

# Модель ETAS

## *Epidemic type earthquake sequense*

$$\text{Закон Омори-Утсу: } \lambda(t) = \frac{K}{(t+c)^p}$$

$$\text{Предположение Утсу: } K = K_0 10^{\alpha M}$$

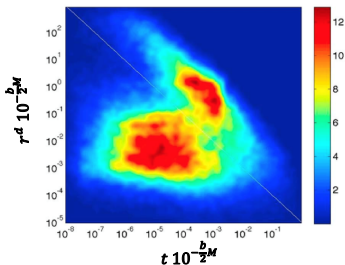
$$\text{Модель ETAS: } \lambda(t) = \mu + K_0 \sum_{i:t_i < t} \frac{10^{\alpha(M_i - M_c)}}{(t - t_i + c)^p}$$

$$\text{Изотропная модель ETAS: } \lambda(t, x, y) = \mu + K_0 \sum_{i:t_i < t} \frac{10^{\alpha(M_i - M_c)}}{(t - t_i + c)^p (x^2 + y^2 + d)^q}$$

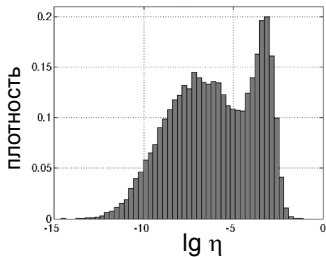
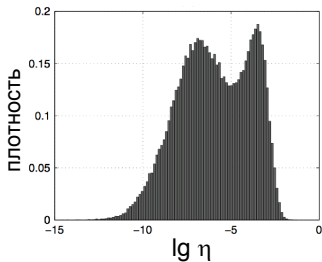
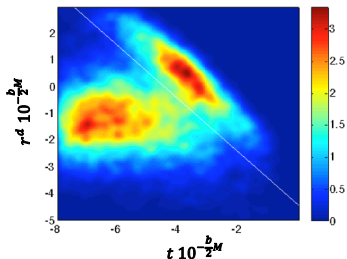
$$\text{Закон Гутенберга-Рихтера: } P(M_i < m) = 1 - 10^{-b(m - M_c)}$$

## Распределение функции $\eta$ ближайших соседей

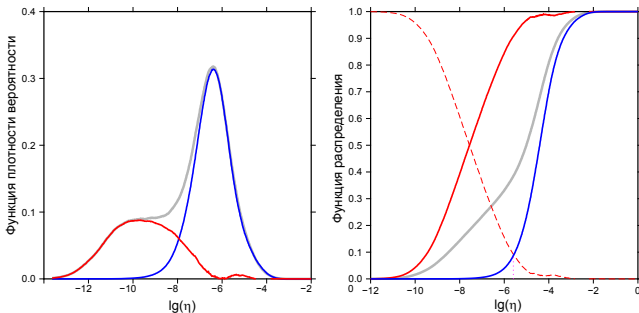
Калифорния,  $M \geq 2$



Модель ETAS



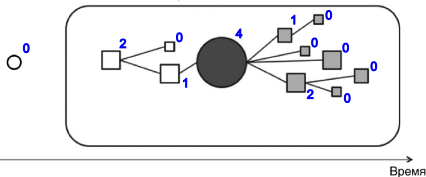
## Определение связанных событий



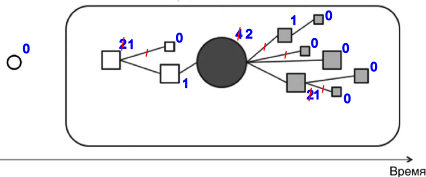
Для определения порога  $\eta_0$  мы перемешиваем времена в каталоге землетрясений предварительно грубо исключив афтершоки, и строим распределение расстояний до ближайшего соседа. Затем это распределение с подбираемым коэффициентом (синяя кривая) вычитается из оригинального распределения. Разность принимается за распределение для связанных событий (красная кривая). Порог  $\eta_0$  выбирается так, чтобы совпадали доли неверно определенных связанных и независимых событий.

# Дерево триггеров: продуктивность

Абсолютная продуктивность



Дельта-продуктивность



Продуктивностью землетрясения мы будем называть число событий, инициированных данным землетрясением, магнитуды  $M \geq M_c$ .

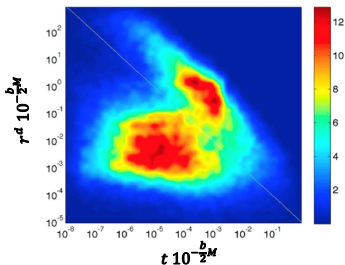
$\Delta M$ -продуктивность землетрясения - число событий, инициированных данным землетрясением, магнитуды  $M \geq M - \Delta M$ .

Везде далее имеется в виду  $\Delta M$ -продуктивность. Если не оговорено специально,  $\Delta M = 2$

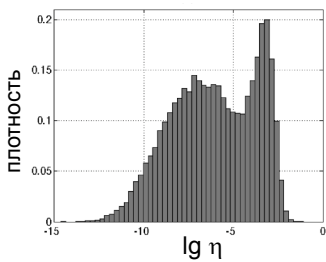
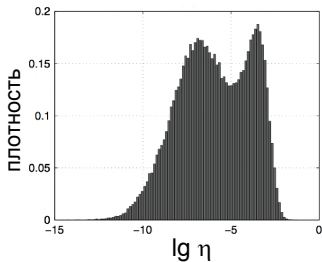
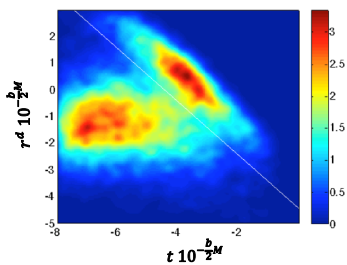


## Распределение функции $\eta$ ближайших соседей

Калифорния,  $M \geq 2$

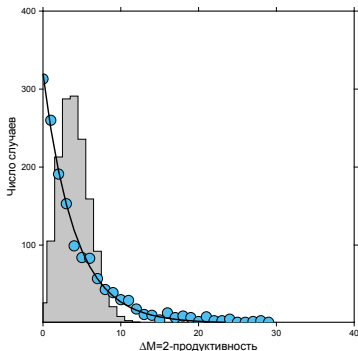


Модель ETAS

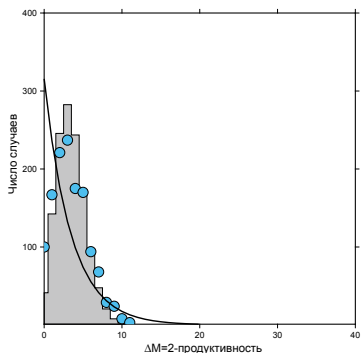


## Распределение продуктивности

Землетрясения мира,  $M \geq 6.5$



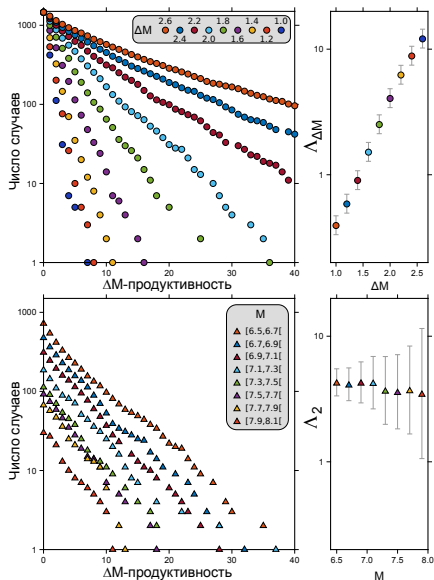
Синтетический каталог по изотропной ETAS



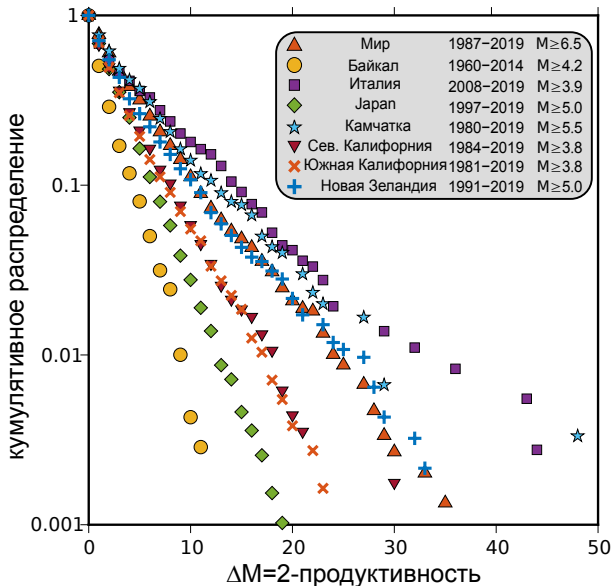
Модель ETAS неверна: продуктивность не параметр, зависящий от магнитуды триггера, а случайная величина, имеющая экспоненциальное распределение с наиболее вероятным значением 0!!! Поэтому прогноз по ETAS дает завышенные оценки опасности.

Но модель можно исправить. Оценки параметров можно делать с помощью реконструкции дерева связей между событиями. При прогноз вперед с помощью датчика случайных чисел генерировать продуктивность событий.

# Каталог ComCat ANSS, $M \geq 6.5$

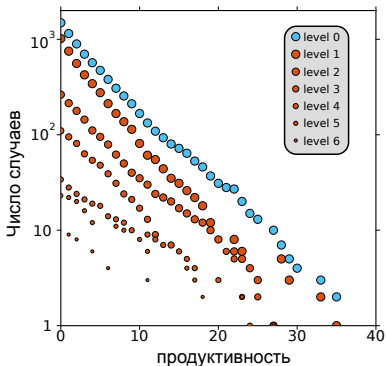
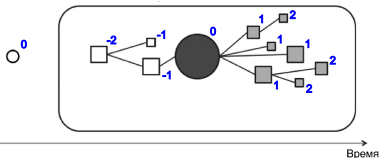


## Продуктивность в разных регионах



# Разные уровни иерархии триггеров

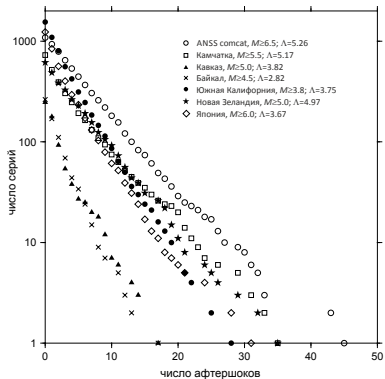
Уровни иерархии



# Распределение количества афтершоков

Гипотеза С.Л. и О.Н. Соловьевых (1962): число афтершоков

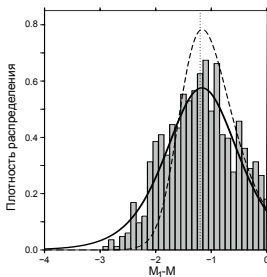
распределено экспоненциально и в среднем убывает с глубиной.



[Шебалин, Баранов, Дзедоев, ДАН, 2018]

Афтершоки выделены методом Молчана-Дмитриевой

## Форма закона Бота



Распределение разности  $M1-M$  хорошо объясняется комбинацией формулы Вере-Джонса  $F(M1 - M < m) = Ce^{-\Lambda e^{-\beta(M1-M-m)}}$  и экспоненциального распределения продуктивности.

Это дает распределение логистического типа, близкого по форме к нормальному:

$$F(M1 < m) = C \frac{1}{1 + \Lambda_2 10^{-b(m-M+2)}}$$

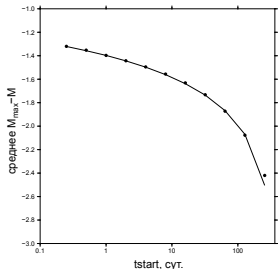
# Динамический закон Бота

Формула

$$F(M1 < m) = C \frac{1}{1 + \Lambda_2 10^{-b(m-M+2)}}$$

дает возможность построить распределение магнитуды афтершока, сильнеешего на любом интервале времени.

Для этого достаточно оценить ожидаемое число афтершоков в этой интервале и подставить в формулу.

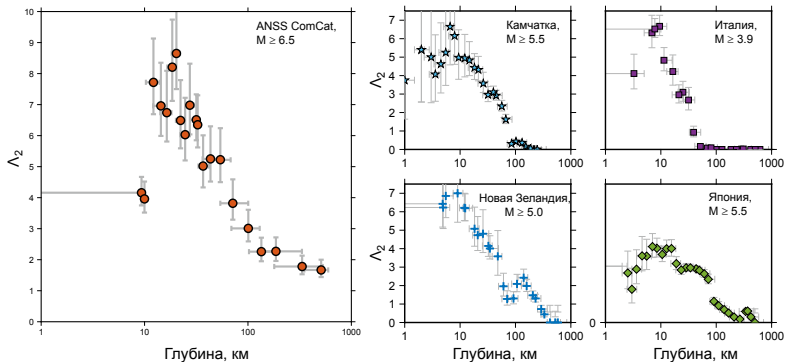


(Баранов, Шибарин, Физика Земли, 2018)

Теоретические оценки хорошо совпали с наблюдением.

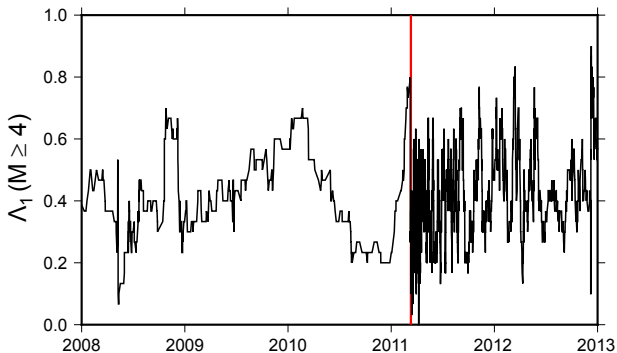


## Зависимость средней продуктивности от глубины



Независимость распределения *дельта*-продуктивности от магнитуды триггеров позволяет усреднять эту величину по всем магнитудам

## Рост $\Lambda_2$ перед землетрясением Тохоку 11.04.2011, $M=9.1$



В данной задаче продуктивность подсчитывалась в окне 10 сут.  
Средняя дельта-продуктивность определялась в скользящем окне 30 землетрясений магнитуды  $M \geq 4$  и значением  $\Delta M = 1.0$

## ВЫВОДЫ

- Каждому землетрясению соответствует „продуктивность“ – число иницированных им событий магнитуды выше порога, определяемого относительно магнитуды землетрясения.
- Продуктивность землетрясений, аналогично магнитуде, имеет экспоненциальное распределение.
- Полученные результаты опровергают один из постулатов модели ETAS о том, что продуктивность - параметр модели. Стало ясно, почему прогнозы по ETAS часто завышены. Ясно как модель исправить.
- Экспоненциальное распределение продуктивности дает объяснение форме закона Бота и дает теоретическое обоснование динамическому закону Бота.
- Средняя продуктивность, детально определяемая по слабым землетрясениям, может давать важную информацию о состоянии среды.