

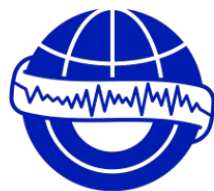
# Об устойчивости параметров сейсмического режима

Петрушов А.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

[petrushov.aal8@physics.msu.ru](mailto:petrushov.aal8@physics.msu.ru)



**ИФЗ·РАН**



# Сейсмический режим

- **Сейсмический режим** – совокупность землетрясений, рассматриваемая в пространстве и времени\*
- В процессе подготовки сильных землетрясений возникают характерные изменения сейсмического режима, которые отражаются на распределении землетрясений в пространственно-временной области и на их энергетическом спектре.
- Такие изменения называют **аномалиями**, их можно обнаруживать путем анализа параметров сейсмического режима, которые с разных сторон количественно описывают состояние геофизической среды.
- Для практически значимых задач (поиск аномалий, задачи прогноза) строятся пространственно-временные карты параметров сейсмического режима, на которых проводится поиск особенностей, приуроченных к крупным событиям.

# Анализ аномалий перед сильными землетрясениями

**Параметры сейсмического режима широко применяются для выявления аномалий перед сильными землетрясениями: как ретроспективно, так и в режиме реального времени**

**2024** Ommi S., Smirnov V.B. Seismicity patterns before the 2021 Fin (Iran) doublet earthquakes using the region-time-length and time-to-failure methods / Earthquake Science, vol.35 N4

**2024** Петрушов А.А., Смирнов В.Б., Михайлов В.О., Фомина С.А. Особенности проявления аномалий сейсмического режима перед сильными землетрясениями Калифорнии // Физика Земли. 2024. № 5

**2023** Смирнов В.Б., Петрушов А.А., Михайлов В.О. Об RTL-аномалии сейсмического режима перед землетрясением в Турции 06.02.2023 г // Физика Земли. 2023. № 6. с. 122–132.

**2023** V.B. Smirnov, A.A. Petrushov. Staging of Occurrence of Seismicity Anomalies before Earthquakes in Kamchatka, Japan and Iceland. Izvestiya, Physics of the Solid Earth, vol. 59, no. 5, pp. 717–732.

**2019** Proskura, P., Zaytsev, A., Braslavsky, I., Egorov, E., and Burnaev, E., Usage of Multiple RTL Features for Earthquakes Prediction, Proc. 19th Conf. “Computational Science and Its Applications. ICCSA 2019,” Part 1, Lecture Notes in Computer Science Ser., vol. 11619, St. Petersburg, 2019, Cham: Springer, 2019, pp. 556–565.

# Проблема устойчивости

- При этом у соответствующих этим параметрам алгоритмов расчета имеется вариативность в виде набора настроечных коэффициентов и различных методов получения оценок. Выбор конкретного набора значений коэффициентов может существенным образом влиять на расчетные результаты, которые отражают не только физическую природу формирования землетрясений, но и алгоритмические особенности.
- В настоящей работе представлены первые результаты исследования устойчивости параметров сейсмического режима RTL и b-value по отношению к значениям их настроечных коэффициентов. Исследование проведено на данных каталогов землетрясений Калифорнии и Камчатки.

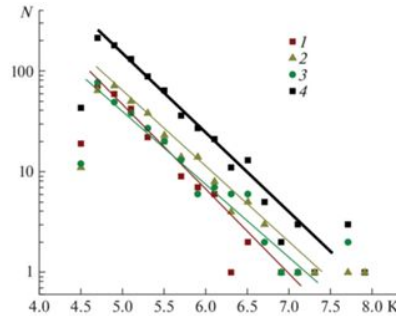
# Параметры сейсмического режима

## b-value

Параметр Гутенберга-Рихтера

- ❖ Закон Гутенберга-Рихтера

$$\log_{10} N = a - bM$$



## RTL

(Соболев Г. А. и др., 1996)

- ❖ Комплексный анализ состояния среды – сейсмическое затишье и форшоковая активизация

$$R(x, y, z, t) = \sum_i \exp\left(-\frac{r_i}{r_0}\right) - R_s,$$

$$T(x, y, z, t) = \sum_i \exp\left(-\frac{t_i}{t_0}\right) - T_s,$$

$$L(x, y, z, t) = \sum_i \left(\frac{l_i}{l_0}\right)^p - L_s.$$

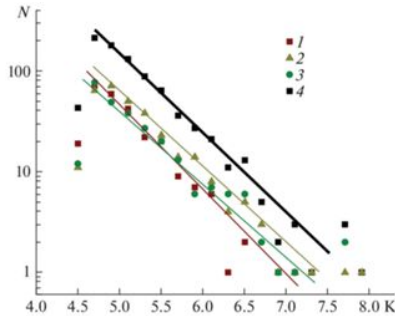
# Параметры сейсмического режима

## b-value

Параметр Гутенберга-Рихтера

- ❖ Закон Гутенберга-Рихтера

$$\log_{10} N = a - bM$$



### Исследуемые настройки алгоритма:

- Расчетное окно (в пространстве)
- Пороговая магнитуда фильтрации каталога

## RTL

(Соболев Г. А. и др., 1996)

- ❖ Комплексный анализ состояния среды – сейсмическое затишье и форшоковая активизация

$$R(x, y, z, t) = \sum_i \exp\left(-\frac{r_i}{r_0}\right) - R_s,$$

$$T(x, y, z, t) = \sum_i \exp\left(-\frac{t_i}{t_0}\right) - T_s,$$

$$L(x, y, z, t) = \sum_i \left(\frac{l_i}{l_0}\right)^p - L_s.$$

- Расчетное окно (в пространстве)
- Пороговая магнитуда фильтрации каталога
- Эмпирический коэф.  $r_0$
- Эмпирический коэф.  $t_0$

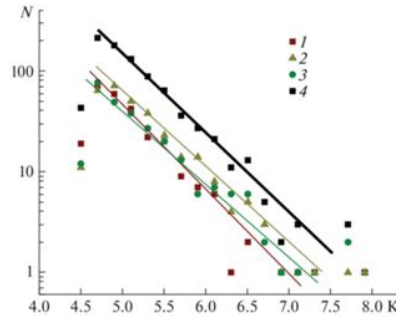
# Параметры сейсмического режима

## b-value

Параметр Гутенберга-Рихтера

- ❖ Закон Гутенберга-Рихтера

$$\log_{10} N = a - bM$$



## RTL

(Соболев Г. А. и др., 1996)

- ❖ Комплексный анализ состояния среды – сейсмическое затишье и форшоковая активизация

$$R(x, y, z, t) = \sum_i \exp\left(-\frac{r_i}{r_0}\right) - R_s,$$

$$T(x, y, z, t) = \sum_i \exp\left(-\frac{t_i}{t_0}\right) - T_s,$$

$$L(x, y, z, t) = \sum_i \left(\frac{l_i}{l_0}\right)^p - L_s.$$

Мало работ, в которых исследуется зависимость результатов от вариаций настроек алгоритмов

# Цель и задачи исследования

**Цель работы:** разработка методики для проведения анализа устойчивости параметров сейсмического режима относительно настроек расчетных алгоритмов. Проведение пилотной оценки степени влияния настроек алгоритмов на расчетные результаты для параметров RTL и b-value

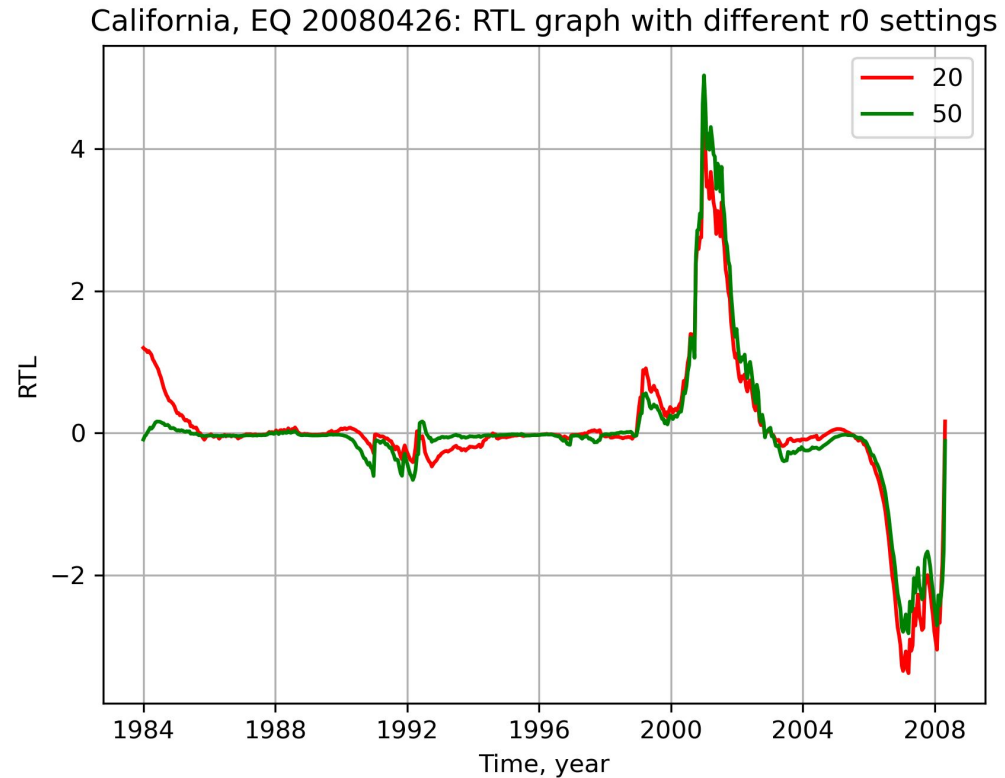
## Задачи:

1. Выбор и подготовка каталогов землетрясений, отбор событий для расчета
2. Построение процедуры оценки чувствительности и степени влияния
3. Проведение многовариантных расчетов параметров сейсмического режима с различными настройками алгоритмов
4. Пилотная оценка настроек алгоритмов по степени значимости, выявление областей устойчивости и неустойчивости
5. Вывод о сильных и слабых сторонах предложенной методики оценки

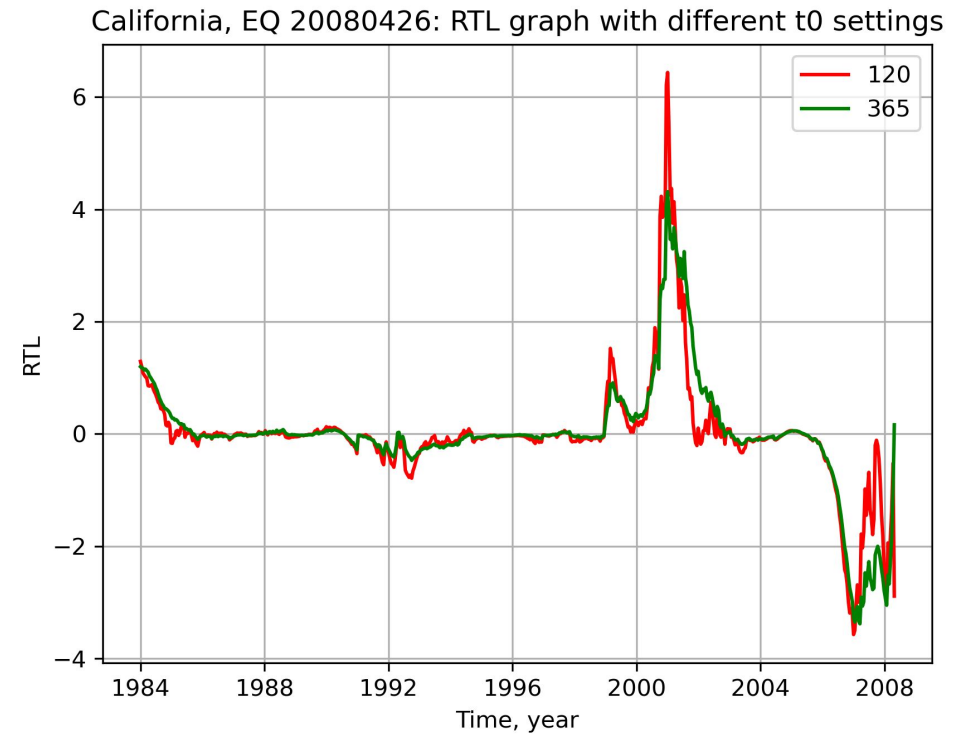


# Пример различия расчетов при варьировании коэффициентов $r_0$ , $t_0$

## Вариация коэффициента $r_0$



## Вариация коэффициента $t_0$



# Методика оценки устойчивости

- Изменение значений настроечных коэффициентов алгоритмов влечет за собой изменения фактических расчетных значений параметров сейсмического режима. Для количественного определения меры изменчивости значений параметра сейсмического режима необходимо ввести метрики, которые характеризуют степень различия расчетных значений.
- Пусть имеется переменный параметр алгоритма  $s$ , принимающий значения из множества  $\{s_1, s_2, \dots, s_k, \dots, s_M\}$ . Для каждого значения  $s_i$  можно рассчитать временной ряд значений параметра сейсмического режима  $p(t)$ , соответствующий настройке алгоритма с коэффициентом  $s_i$ :

$$p(t, s_k) = p^k(t) = \{p_1^k, p_2^k, \dots, p_N^k\}, p_i^k = p^k(t_i)$$

- В качестве интегральной меры различия полученных временных разверток можно рассчитать значение среднеквадратичной ошибки между ними и временной разверткой, соответствующей какому-либо фиксированному значению коэффициента  $s$

$$MSE(k) = MSE(p^k(t), p^M(t)) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i^k - p_i^M)^2$$

# Методика оценки устойчивости

- Полученный график  $MSE(k)$  будет характеризовать среднеквадратичное отклонение  $k$ -го расчета (для значения  $s_k$ ) от базового временного ряда, выбор которого может быть неоднозначным.
- Для тех областей значений коэффициента  $s$ , в которых  $MSE(k)$  меняется сильно, можно говорить о высокой чувствительности к этому коэффициенту. И наоборот, если  $MSE(k)$  меняется меньшим образом - в соответствующий области значений коэффициента  $s$  имеет место меньшая чувствительность.
- Этим свойством функции  $MSE(k)$  можно воспользоваться для построения функции чувствительности  $f(k)$ , обобщив степень изменчивости среднеквадратичной ошибки её производной:

$$f(k) = \left| \frac{\partial MSE(k)}{\partial k} \right|$$

- Вспомним, что мы изначально выбрали базовый расчет произвольным образом. Чтобы нивелировать влияние этого эффекта, будем рассчитывать функции чувствительности последовательно выбирая в качестве базового расчета каждый из полученных. А затем полученные функции чувствительности усредним между собой

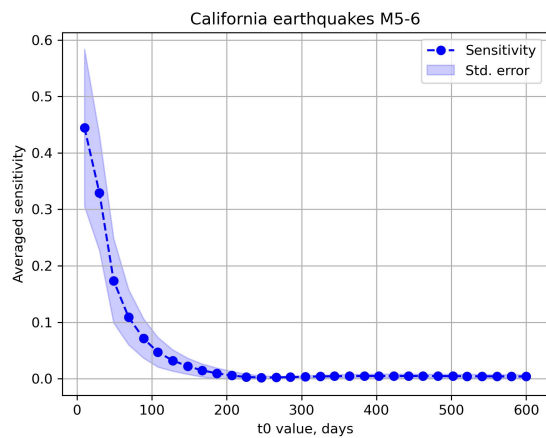
# Северная Калифорния, M5-6

События, разнесенные во времени на 2+ года, и удаленные друг от друга на 60+ км

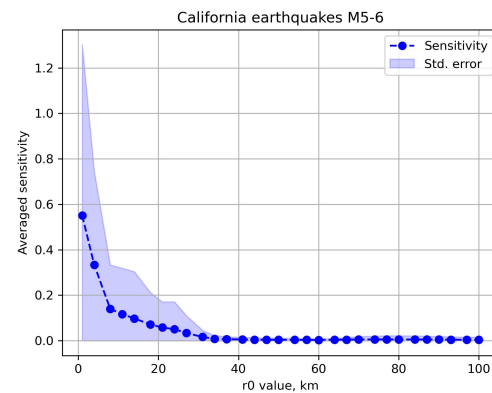
Всего найдено **35** таких землетрясений (с 1984 года)  
Из них отобраны **33** с достаточной расчетной статистикой

# RTL: функция чувствительности

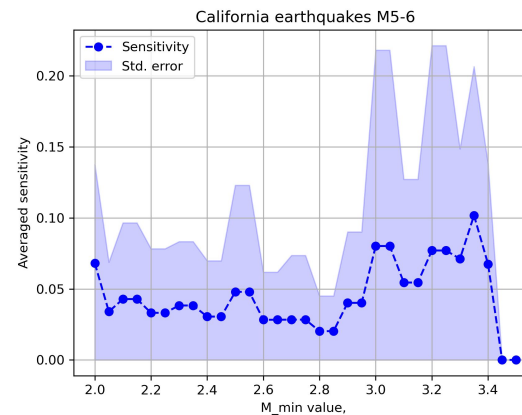
**t0**  
**[10 – 600] дней**



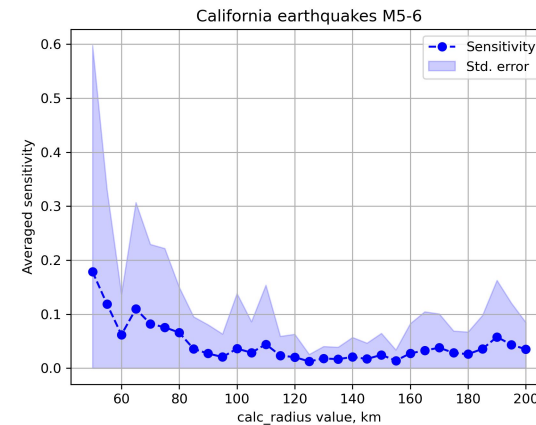
**r0**  
**[1 – 100] км**



**M\_MIN**  
**[2 – 3.5]**

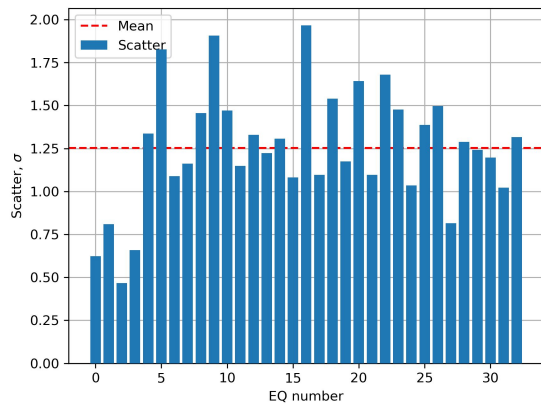


**Расчетный радиус**  
**[50 – 200] км**

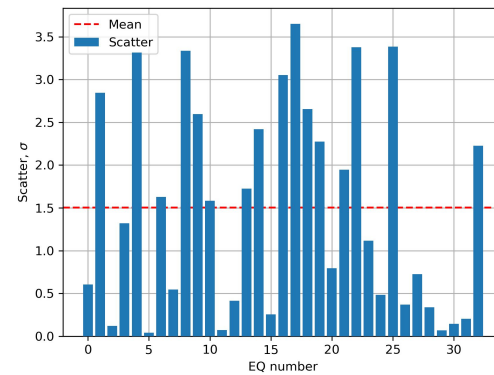


# RTL: разброс между кривыми при изменении параметров

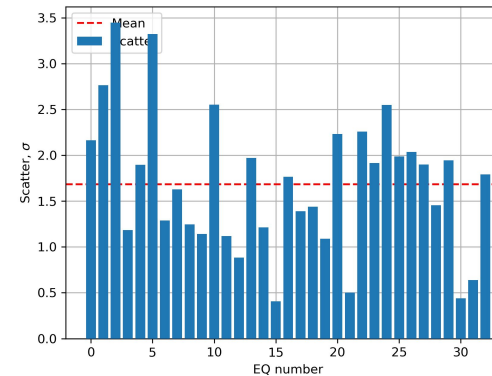
**t0**  
**[10 – 600] дней**



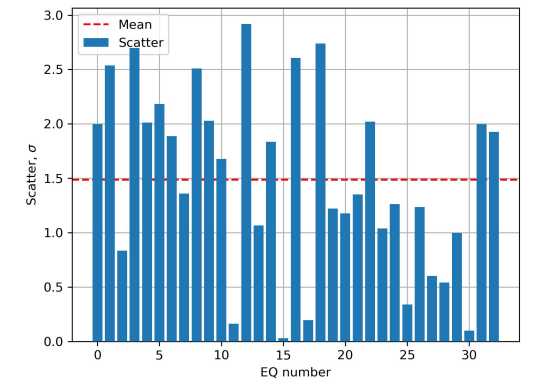
**r0**  
**[1 – 100] км**



**M\_MIN**  
**[2 – 3.5]**



**Расчетный радиус**  
**[50 – 200] км**



**Среднемаксимальный разброс MSE:**

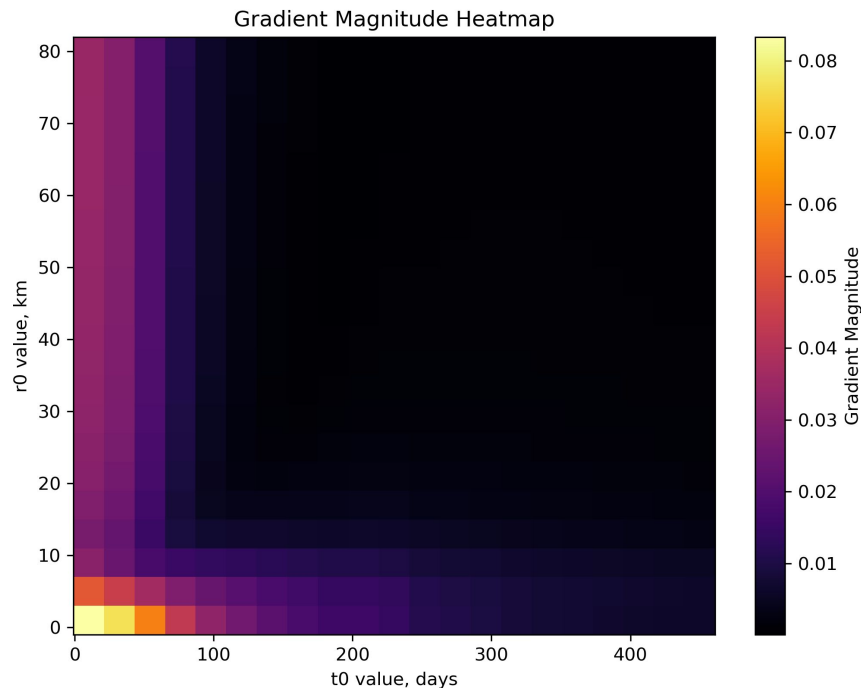
**1.25**

**1.50**

**1.68**

**1.49**

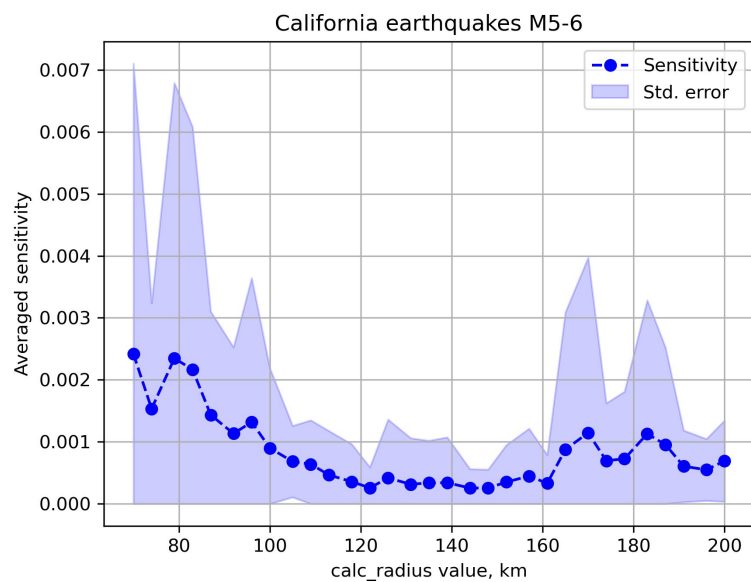
# RTL: карта функции чувствительности $|\text{grad MSE}(r_0, t_0)|$



- Функцию чувствительности можно обобщать на многомерный случай, считая не производную, а градиент среднеквадратичной ошибки по настроечным параметрам
- Темные области отражают относительно малые значения величины градиента. Светлые - относительно большие

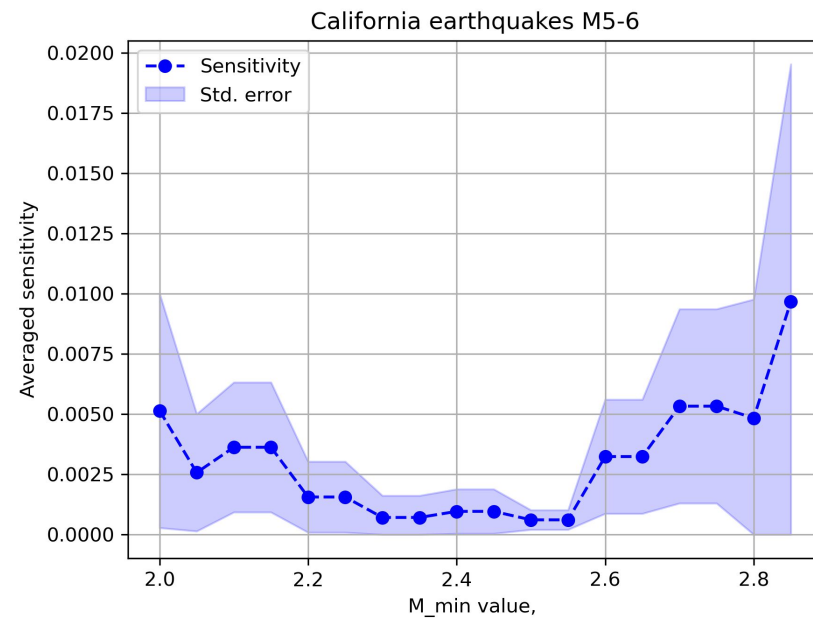
# GR b-value: функция чувствительности

**Расчетный радиус  
[50 – 200] км**



25 событий

**M\_MIN  
[2 – 2.8]**

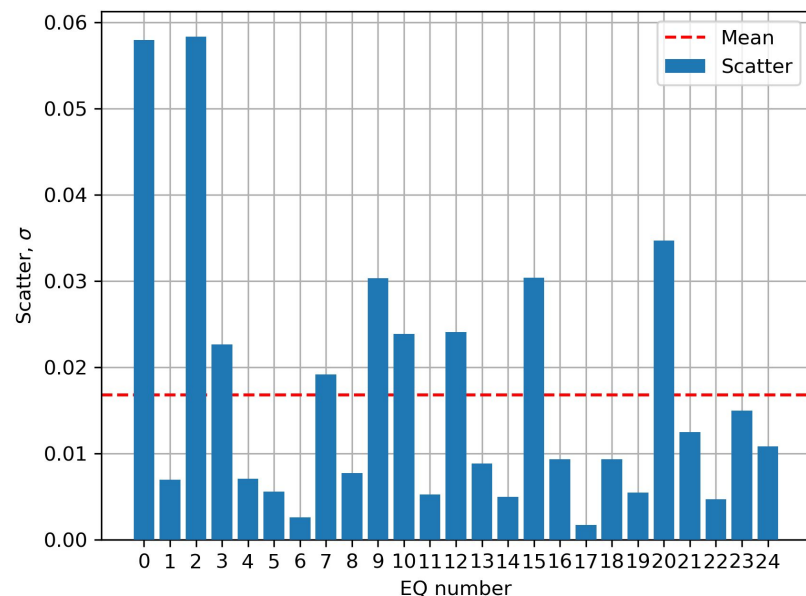


19 событий



# GR b-value: разброс между кривыми при изменении параметров

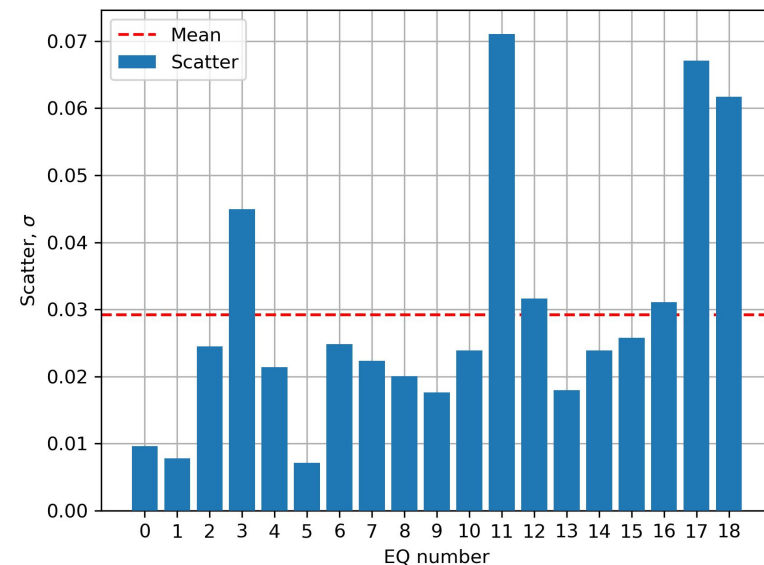
Расчетный радиус  
[50 – 200] км



25 событий

Средний разброс MSE:  
**0.017**

M\_MIN  
2 – 2.8



19 событий

Средний разброс MSE:  
**0.029**

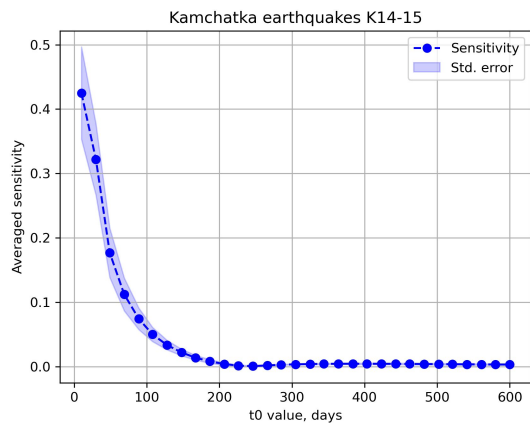
# Камчатка, К14-15

События, разнесенные во времени на 2+ года, и удаленные друг от друга на 60+ км

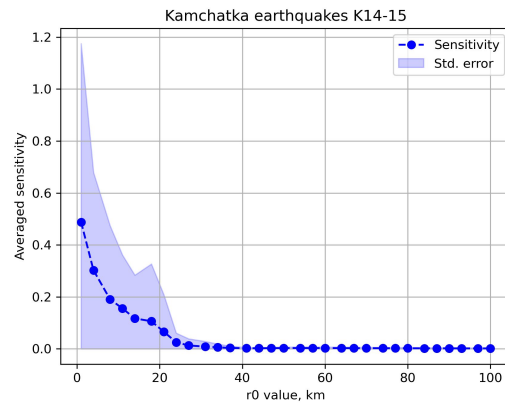
Всего найдено **40** таких землетрясений (с 1987 года).  
Из них отобраны **34** с достаточной расчетной статистикой

# RTL: функция чувствительности

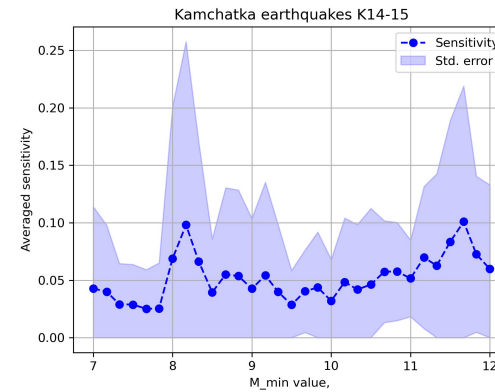
**t0**  
**[10 – 600] дней**



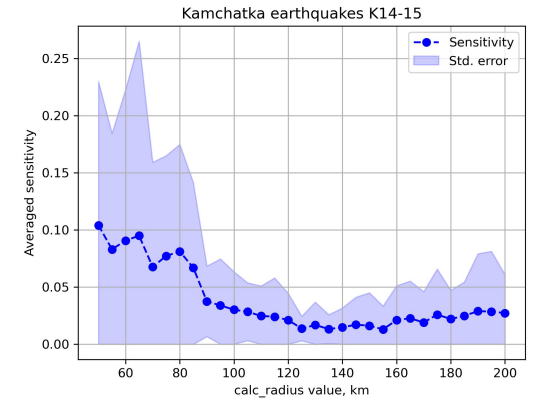
**r0**  
**[1 – 100] км**



**K\_MIN**  
**[7 – 12]**

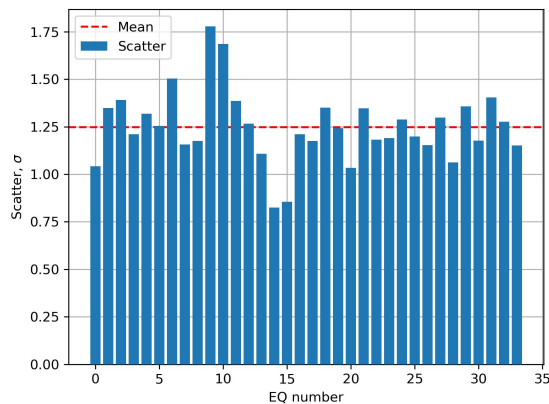


**Расчетный радиус**  
**[50 – 200] км**

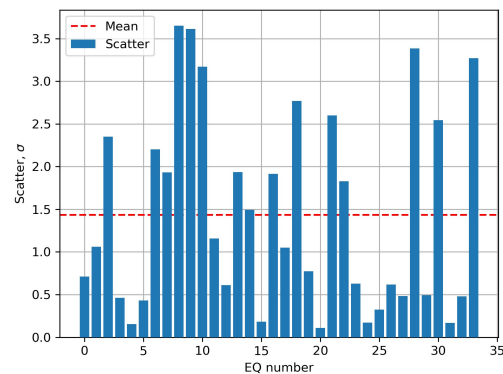


# RTL: разброс между кривыми при изменении параметров

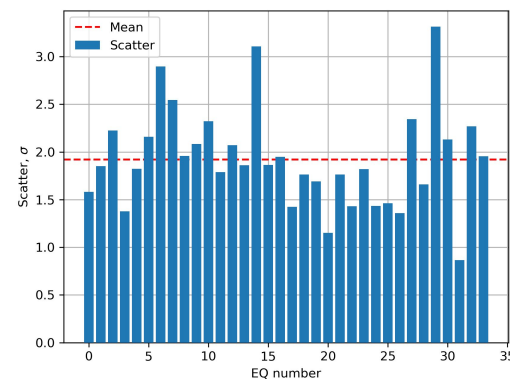
**t0**  
**[10 – 600] дней**



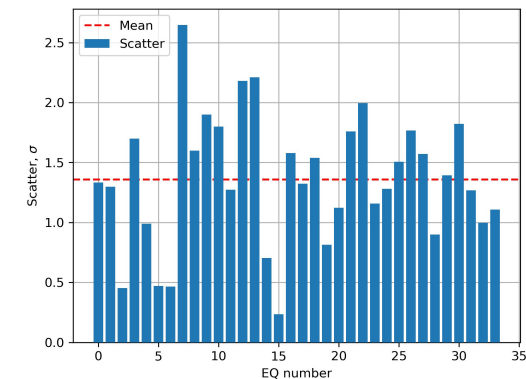
**r0**  
**[1 – 100] км**



**K\_MIN**  
**[7 – 12]**



**Расчетный радиус**  
**[50 – 200] км**



**Среднемаксимальный разброс MSE:**

**1.25**

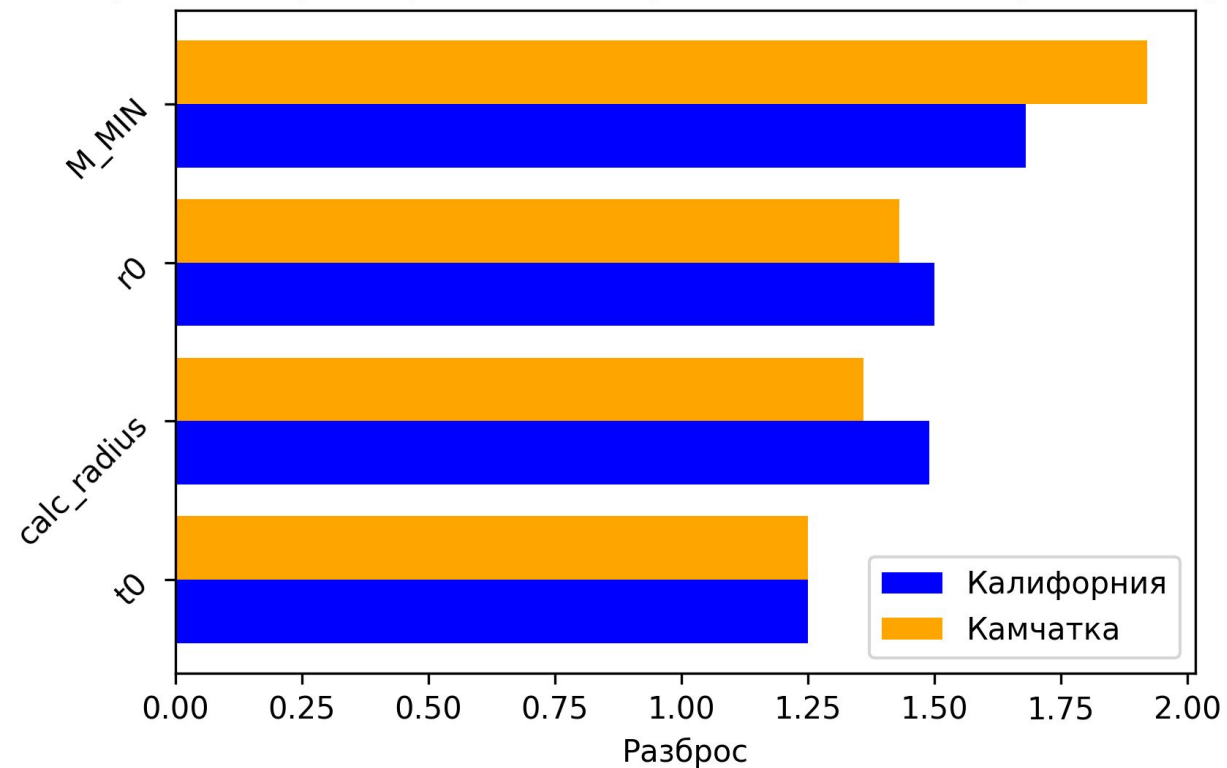
**1.43**

**1.92**

**1.36**

# Разброс между кривыми: Tornado-plot

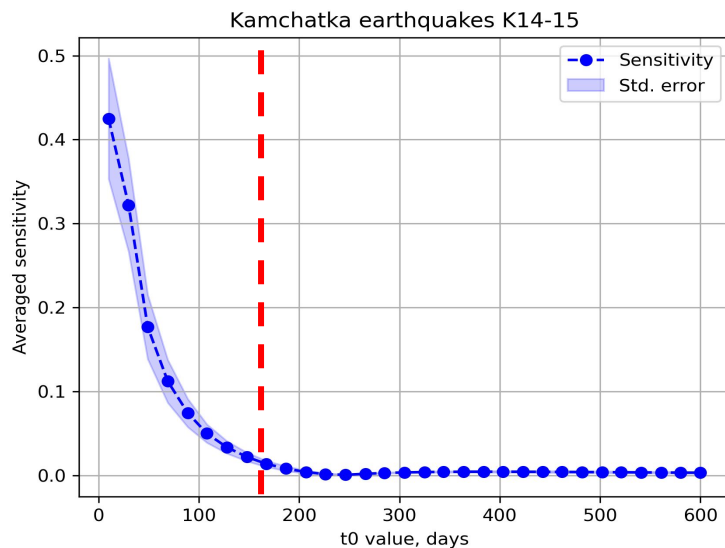
Разброс между RTL расчетами при изменении настроек алгоритма



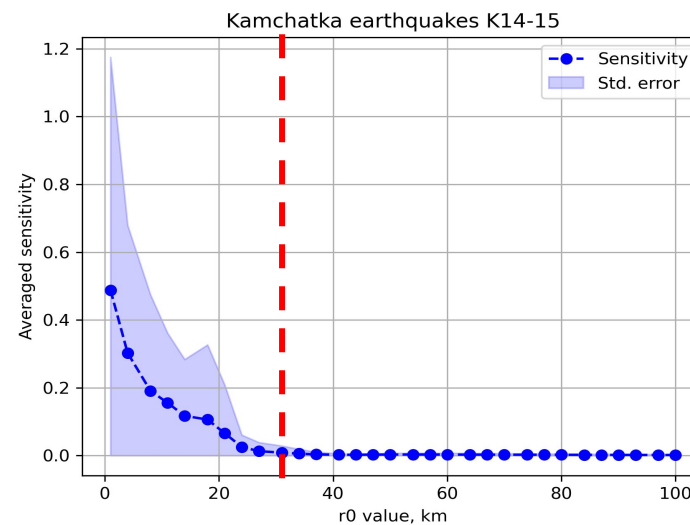
# Обсуждение результатов

1. Функция чувствительности для  $r_0$  и  $t_0$  имеет характерный вид: в области малых значений расчетные результаты стремительно перестают быть устойчивыми. А начиная с некоторых пороговых значений  $r_0'$  и  $t_0'$  расчетные результаты меняются слабо.

**$t_0$**   
**[10 – 600] дней**

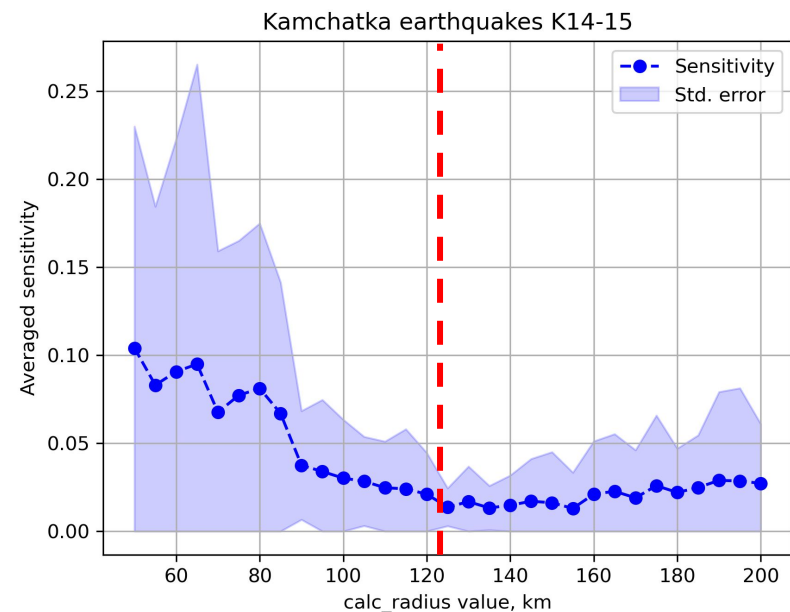
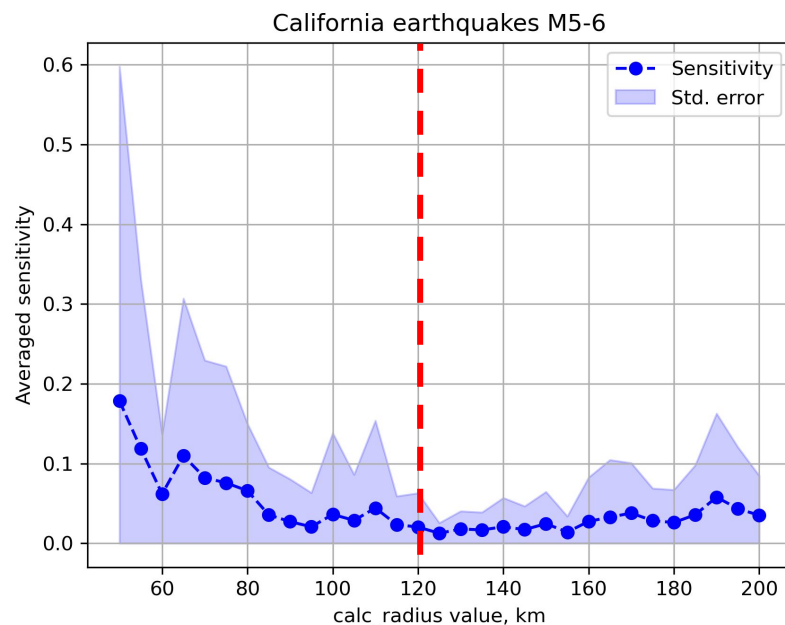


**$r_0$**   
**[1 – 100] км**



# Обсуждение результатов

2. Функция чувствительности для расчетного радиуса имеет менее выраженный, но тоже характерный вид: начиная с некоторых значений ( $\sim 120 - 140$  км) расчетные результаты меняются слабее (об этом говорит как меньшее абсолютное значение  $\phi$ -ии чувствительности, так и меньший разброс).



# Обсуждение результатов

3. Функция чувствительности для пороговой магнитуды не имеет выраженного поведения.
4. Вариации значений пороговой магнитуды и параметра  $r_0$  в указанном диапазоне наибольшим образом влияют на разброс кривых, а значение  $t_0$  и расчетный радиус наименьшим. Но, как нетрудно догадаться, эти результаты зависят от того какой диапазон варьируемых параметров мы возьмем.
5. Из столбчатых диаграмм разброса MSE видно, что для параметров  $t_0$  и  $M\_MIN$  разброс для разных событий достаточно стабилен, и локализован близко к среднему значению по всем событиям. Для расчетного радиуса наблюдается меньшая стабильность. А для параметра  $r_0$  разброс наиболее сильно зависит от конкретного события
6. Ранжирование настроечных коэффициентов функции RTL по величине влияния (разброса): единое для Калифорнии и Камчатки
7. На расчетное значение величины b-value больше влияет изменение пороговой магнитуды, чем изменение расчетного окна (в указанном диапазоне)

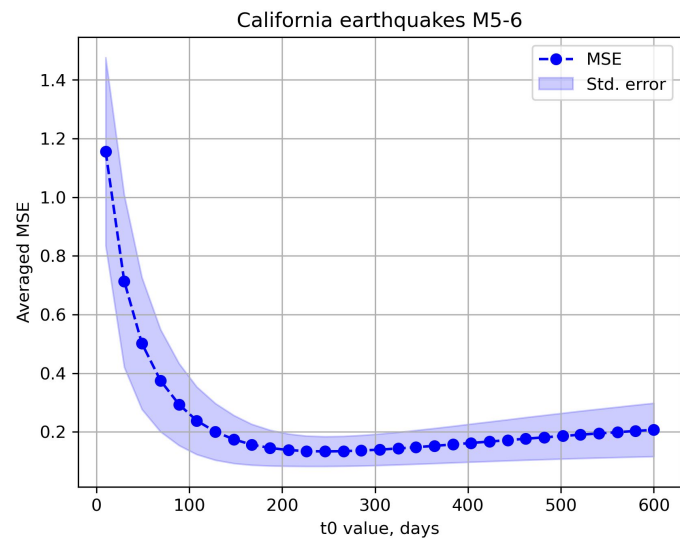


# Дальнейшая работа

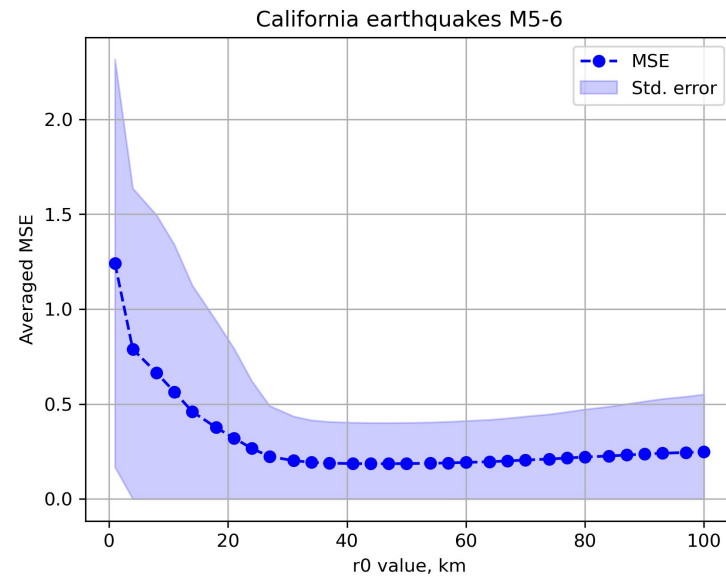
1. Предложенный метод оценки различия между кривыми на основе MSE описывает лишь то, насколько расчетные кривые отстоят друг от друга. Это позволяет достаточно эффективно выявлять области устойчивости и неустойчивости, однако дает не полную информацию о характере различия результатов. Необходимо дополнительно вводить альтернативные метрики, более детально описывающие различие результатов.
2. Выявление характерных случаев, в которых один и тот же настроечный коэффициент (например  $\gamma_0$ ) может оказывать как сильное, так и слабое влияние на разброс кривых. Определение возможных причин такой дифференциации
3. Разработка подходов к стабилизации расчетных алгоритмов и повышению их устойчивости.
4. Проведение оценок устойчивости для расчетов, охватывающих одинаковый временной промежуток.

Спасибо за внимание

# RTL: среднее значение MSE



35 событий

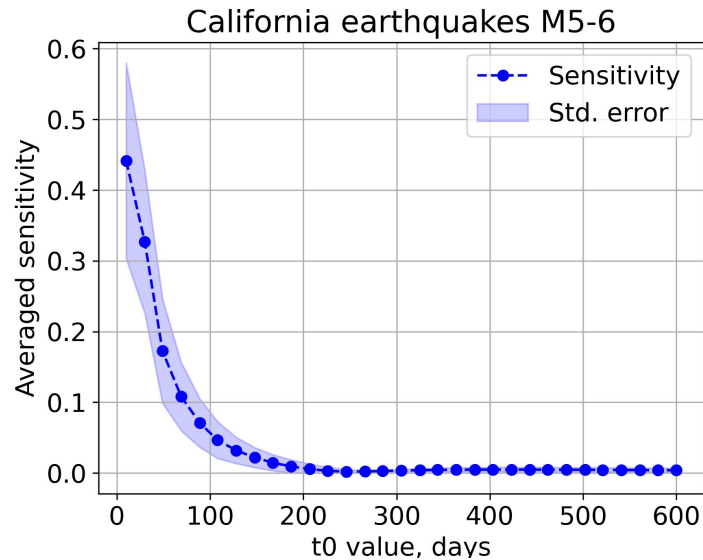


35 событий

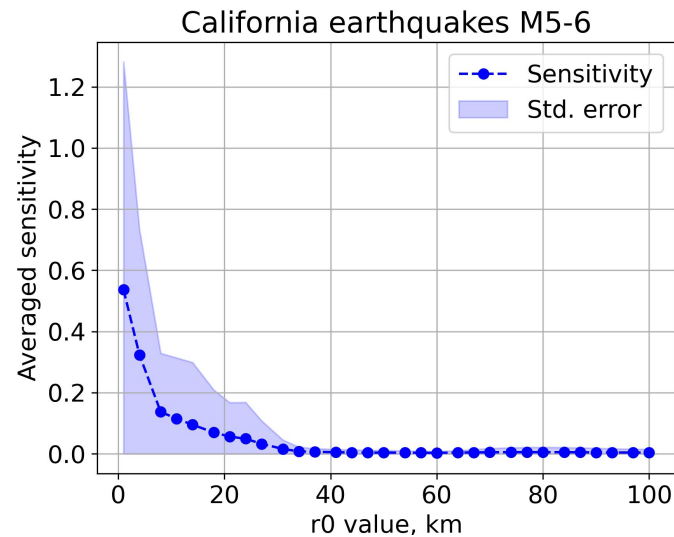
31 событие

# RTL: функция чувствительности как производная MSE

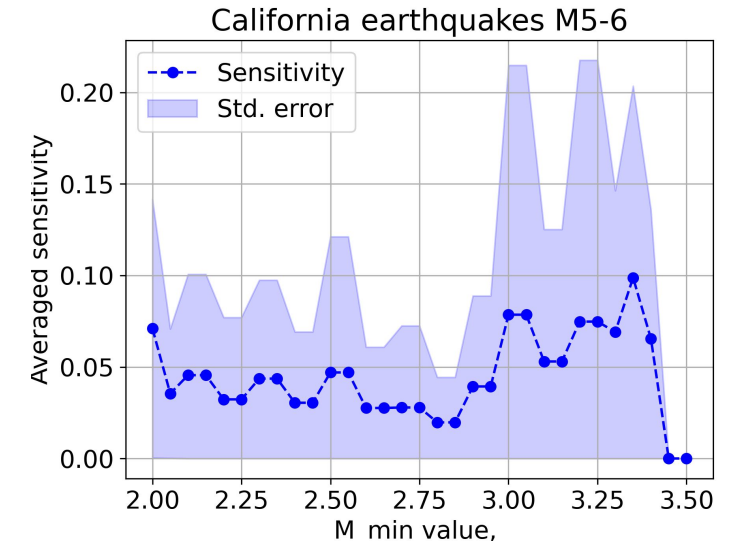
Ф-ии чувствительности, посчитанные через MSE и через к-т корреляции совпадают по форме



35 событий



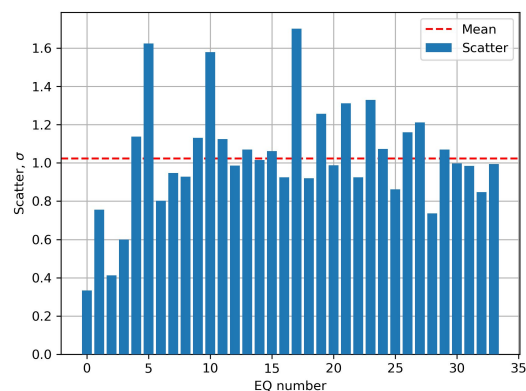
35 событий



31 событие

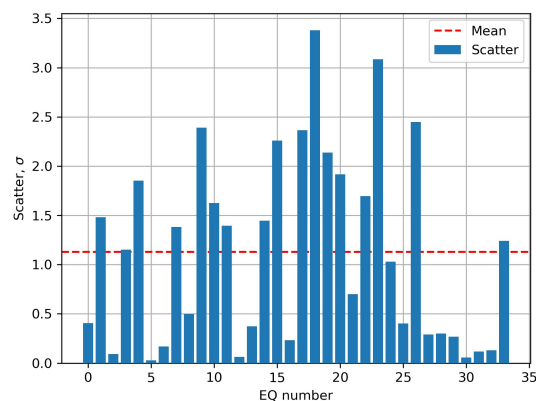
# RTL: разброс между кривыми при варьировании параметров

**t0**  
**[10 – 600]**  
**дней**



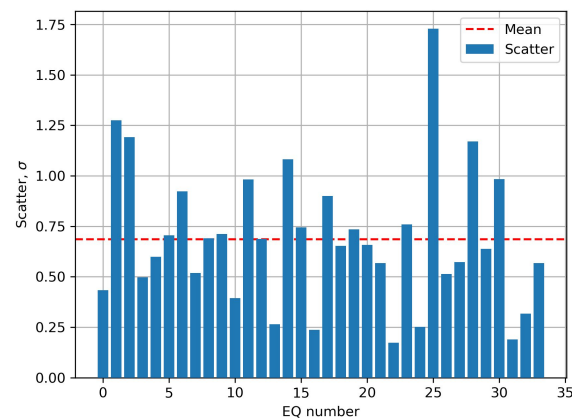
35 событий

**r0**  
**[1 – 100] км**



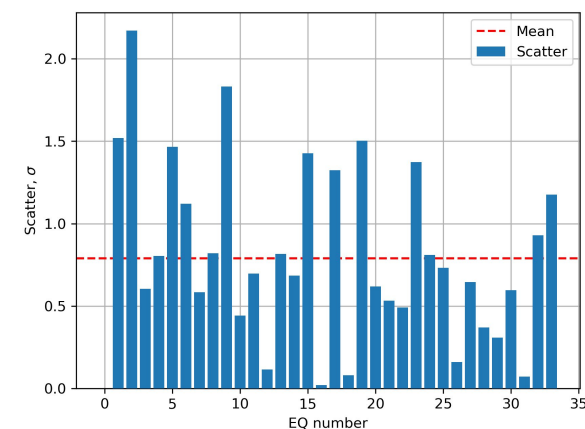
35 событий

**M\_MIN**  
**[2 – 3.5]**



31 событие

**Расчетный радиус**  
**[50 – 200] км**



34 события

Средний разброс MSE:

1.02

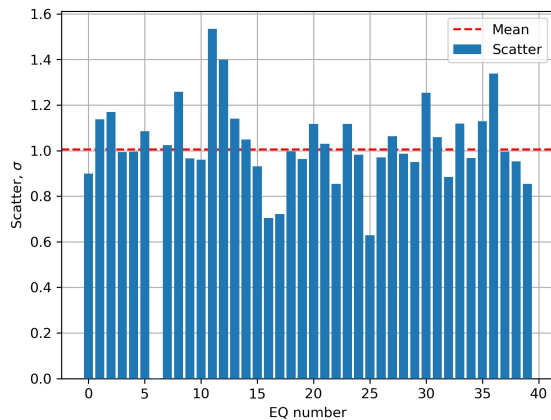
1.13

0.69

0.79

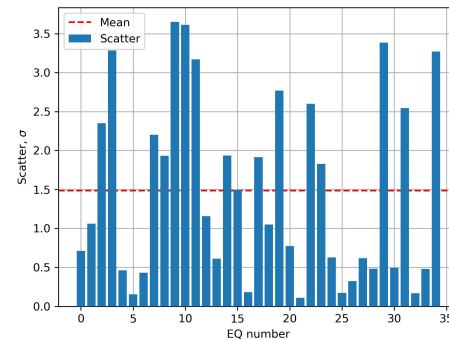
# RTL: разброс между кривыми при варьировании параметров

**t0**  
[10 – 600]  
сек



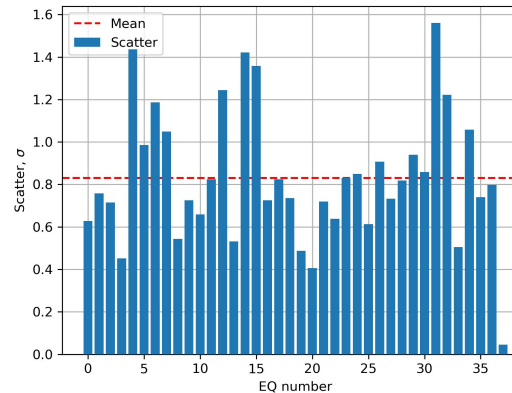
40 событий

**r0**  
[1 – 100] км



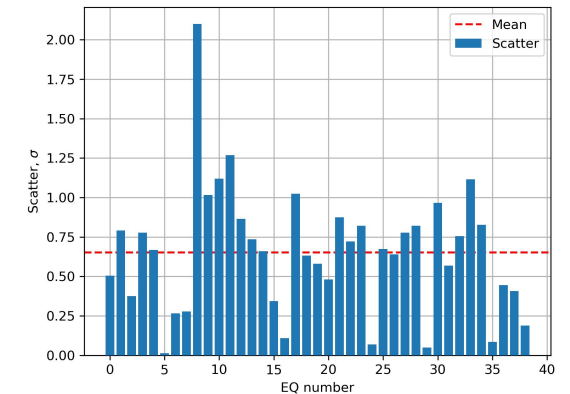
40 событий

**K\_MIN**  
[7 – 12]



38 событий

**Расчетный радиус**  
[50 – 200] км



39 событий

**Средний (максимальный)(среднемаксимальный) разброс MSE:**

1.00  
1.414  
1.213

1.09  
1.501  
1.326

0.83  
2.125  
1.870

0.65  
1.416  
1.200