

IV Всероссийская научная конференция
«Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений»

ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ ОЧАГОВ СУБДУКЦИОННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Игнатьев Дмитрий Александрович

Институт океанологии
им. П.П. Ширшова РАН



Владимирова Ирина Сергеевна

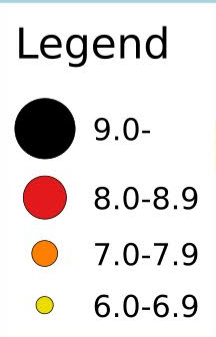
Институт теории прогноза землетрясений
и математической геофизики РАН,
институт океанологии
им. П.П. Ширшова РАН



22 – 23 октября 2025 г.

г. Москва

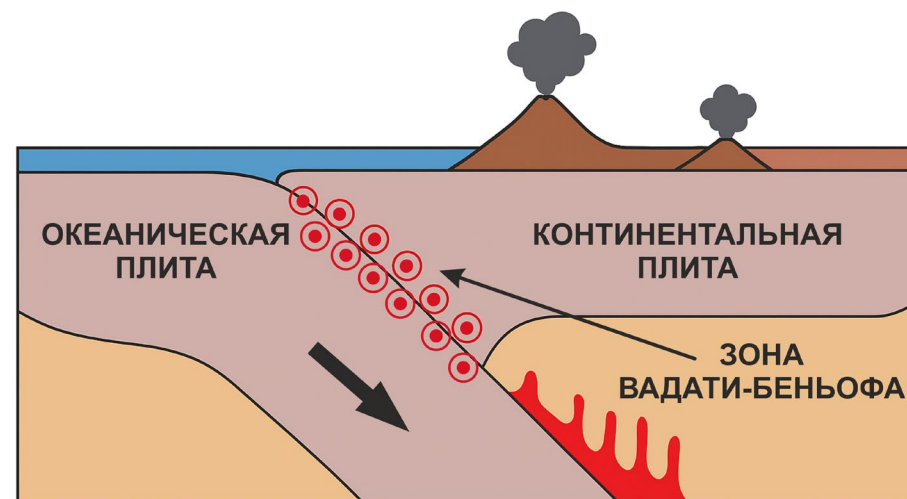
КАРТА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ



Геометрия очага критически важна для:

- моделирования смещений морского дна,
- прогнозирования цунами,
- оценки сейсмических рисков

ЦЕЛЬ: автоматизация определения геометрических параметров очага землетрясения с использованием методов машинного обучения



ЗАДАЧИ исследования

- восстановление профиля субдукционной зоны на основе сейсмофокальных зон Вадати–Беньофа,
- определение линейных размеров очага через выделение афтершоковых последовательностей

Традиционные методы требуют ручной обработки, медленны и не масштабируемы

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Каталоги землетрясений:
NEIC / USGS



- Регионы исследования:
- японская зона субдукции
 - чилийская зона субдукции
 - алеутская зона субдукции



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОИСКОВОЙ ОБЛАСТИ И ОТБОР ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

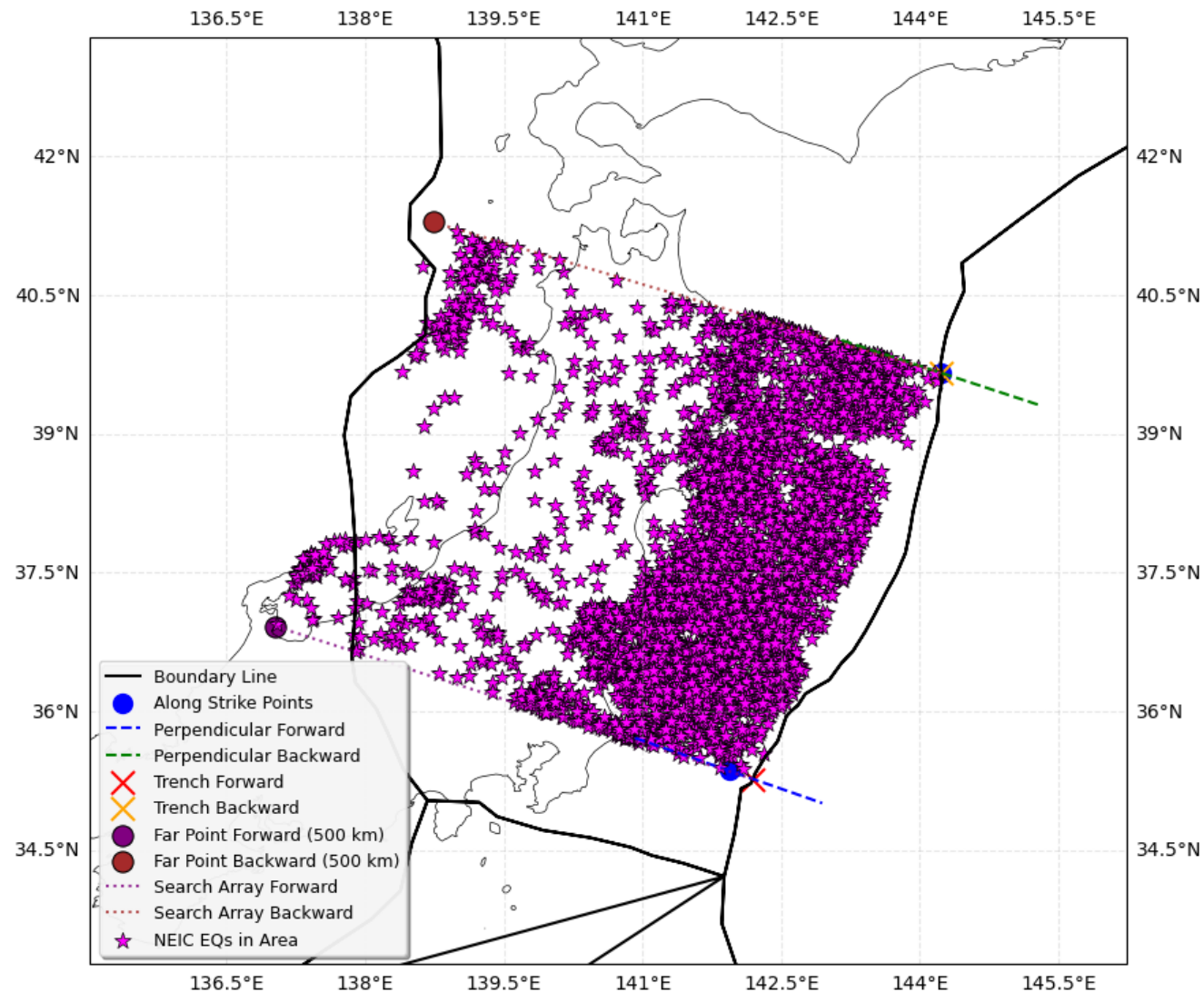
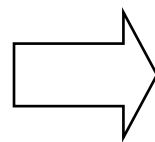
Сегмент японской зоны

Формула Ризниченко

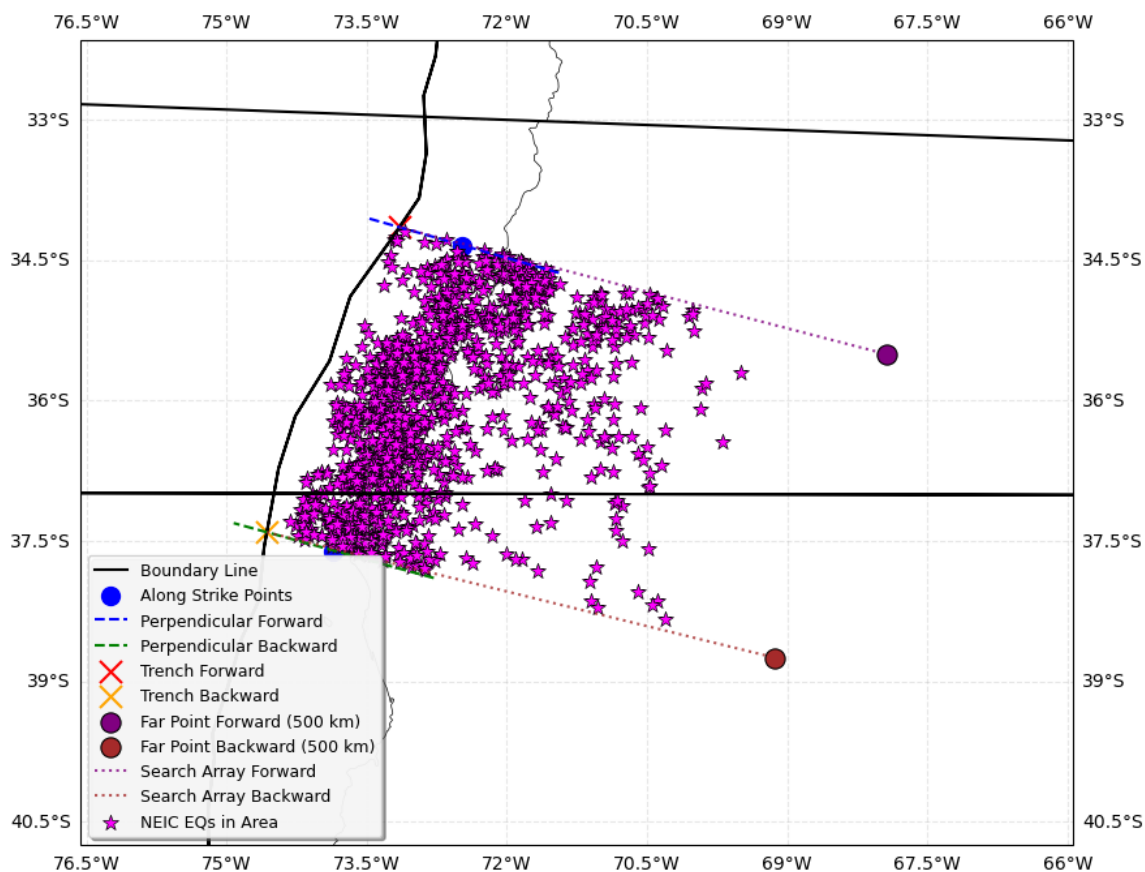
$$L = 10^{0.440 \cdot M_{\omega} - 1.289}$$

L — длина разлома
 M_{ω} — магнитуда момента

```
earthquake = {  
  'event': '2011 Tohoku earthquake',  
  'latitude': 37.52,  
  'longitude': 143.05,  
  'depth_km': 20,  
  'Mw': 9.1,  
  'scalar_moment_Nm': 5.31e29,  
  'strike_deg': 203,  
  'dip_deg': 10,  
  'rake_deg': 88  
}
```



Сегмент чилийской зоны

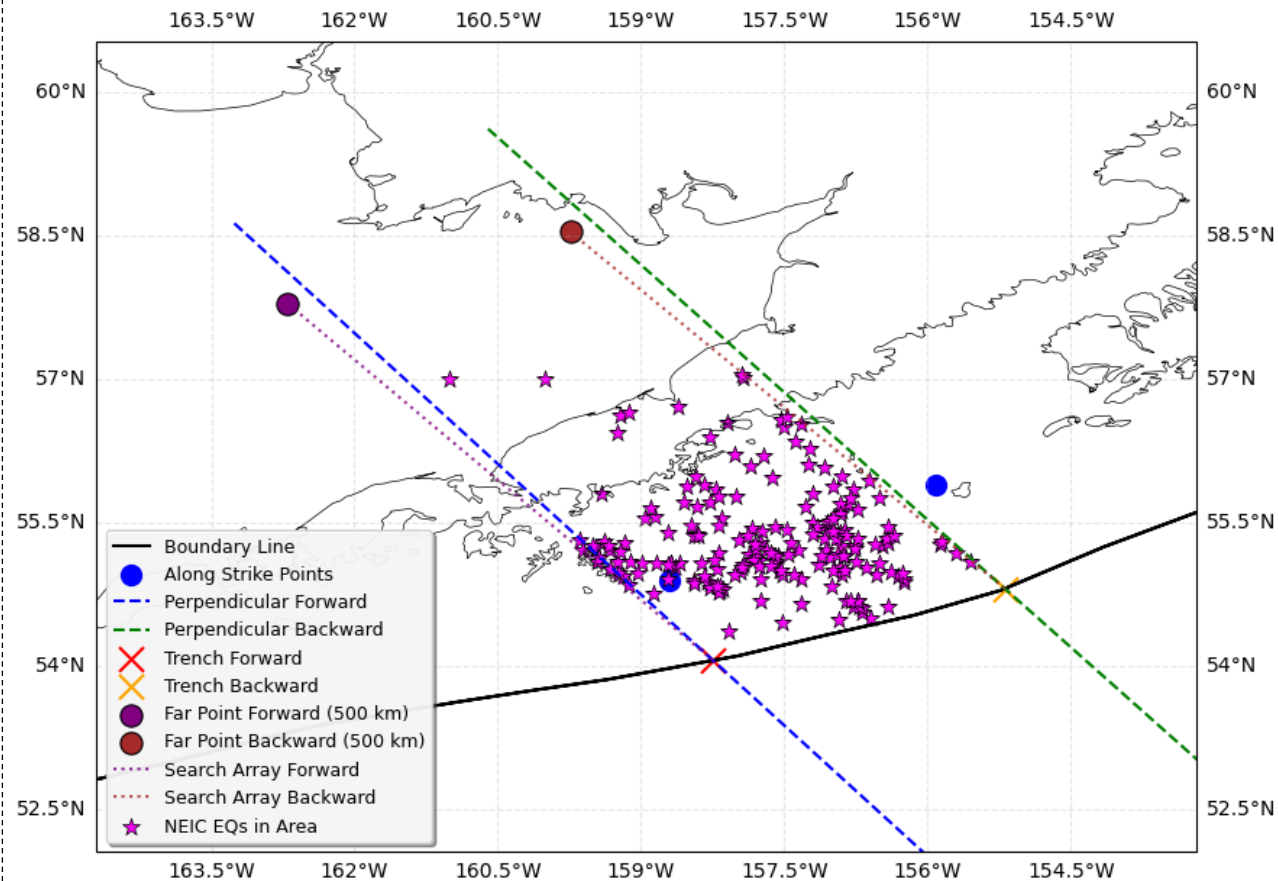


```

earthquake = {
  'event': '2010 Maule earthquake',
  'latitude': -35.98,
  'longitude': -73.15,
  'depth_km': 23.2,
  'Mw': 8.8,
  'scalar_moment_Nm': 1.86e+29,
  'strike_deg': 19,
  'dip_deg': 18,
  'rake_deg': 116
}

```

Сегмент алеутской зоны



```

earthquake = {
  'event': '2021 Chignik earthquake',
  'latitude': 55.40,
  'longitude': -157.32,
  'depth_km': 29.6,
  'Mw': 8.2,
  'scalar_moment_Nm': 2.84e+28,
  'strike_deg': 238,
  'dip_deg': 10,
  'rake_deg': 88
}

```



ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ СУБДУКЦИОННОЙ ЗОНЫ

Подходы

метод наименьших квадратов (МНК)

чувствителен к выбросам

робастная регрессия Хубера

устойчива к шуму и аномалиям



полиномиальные признаки

для моделирования нелинейных профилей



адаптивная весовая функция

для учета региональных особенностей



кусочно-линейная аппроксимация

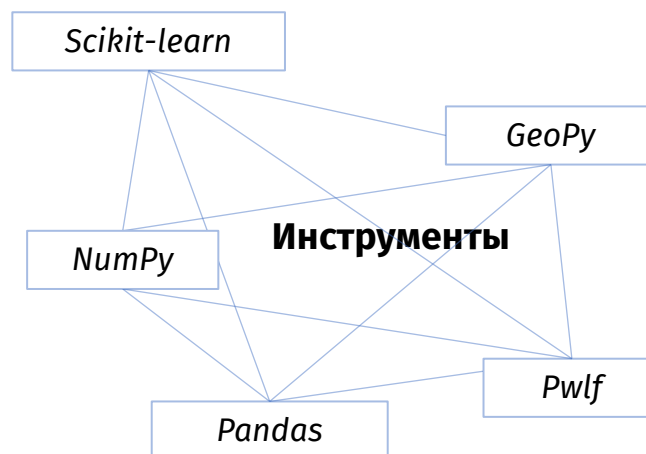
для вывода углов наклона профиля

Функция потерь

$$L_{\delta}(r_i) = \begin{cases} \frac{1}{2}r_i^2 & \text{if } |r_i| \leq \delta \\ \delta \cdot (|r_i| - \frac{1}{2}\delta) & \text{if } |r_i| > \delta \end{cases}$$

$r_i = y_i - \hat{y}_i$ остаток (разница) между наблюдаемым значением y_i и прогнозируемым значением $\hat{y}_i$

$\delta = 1,35$ пороговый параметр, контролирующий точку, в которой функция потерь переходит от квадратичной к линейной



Задача оптимизации

$$\text{Minimize: } \sum_{n=1}^n L_{\delta}(r_i)$$

n количество наблюдений в наборе данных

ВВЕДЕНИЕ АДАПТИВНОЙ ВЕСОВОЙ ФУНКЦИИ И ПОЛИМИАЛЬНЫХ ПРИЗНАКОВ

Адаптивная весовая функция

$$w_i = w_i^{(d)} \cdot w_i^{(z)}$$

$$w_i^{(d)} = \begin{cases} w_{near}, & X_i \leq X_{th} \\ w_{far}, & X_i > X_{th} \end{cases}$$

X_i — расстояние точки i от желоба,
 X_{th} — пороговое расстояние,
 w_{near} — вес для точек вблизи желоба,
 w_{far} — вес для точек, удаленных от желоба

$$w_i^{(z)} = \left(\frac{|z_i|}{z_{max}} \right)^\alpha$$

z_i — глубина очага,
 z_{max} — максимальная глубина очага,
 α — вес для точек вблизи желоба

$$\text{Minimize: } \sum_{n=1}^n w_i \cdot L_\delta \cdot (y_i - \beta^T X_i)$$

Полиномиальная трансформация

Расширение признаков:

$$X_i = [1, X_i, X_i^2]$$

X_i — расстояние от желоба

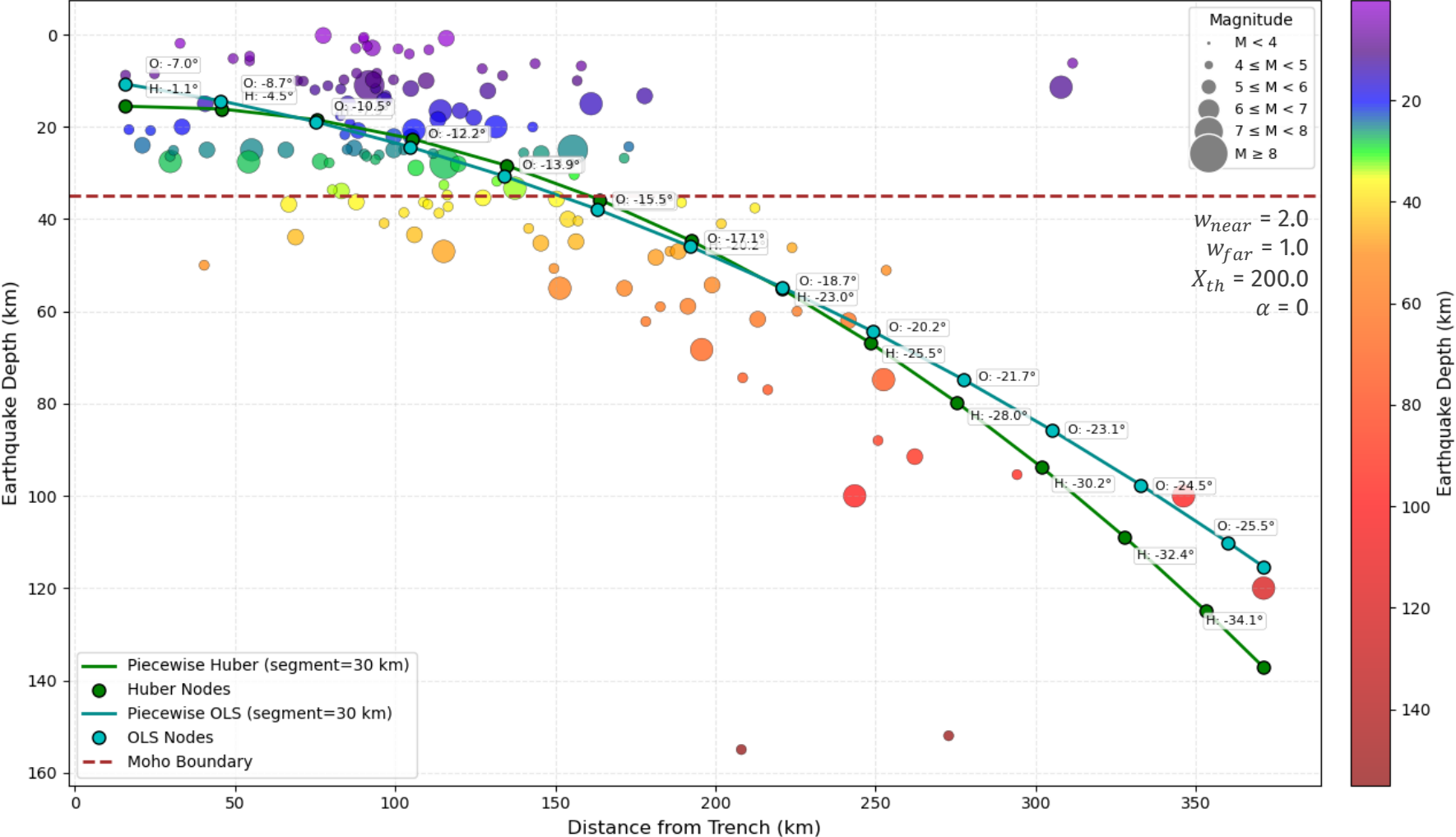
$$\hat{y}_i = \beta^T X_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \beta_2 X_i^2$$

$\beta^T = [\beta_0, \beta_1, \beta_2]$ — оптимизируемые коэффициенты

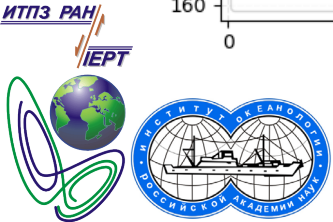
$$r_i = y_i - \beta_0 + \beta_1 X_i + \beta_2 X_i^2$$

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ АЛЕУТСКОЙ ЗОНЫ

Comparison of Huber and Polynomial OLS Piecewise Approximation

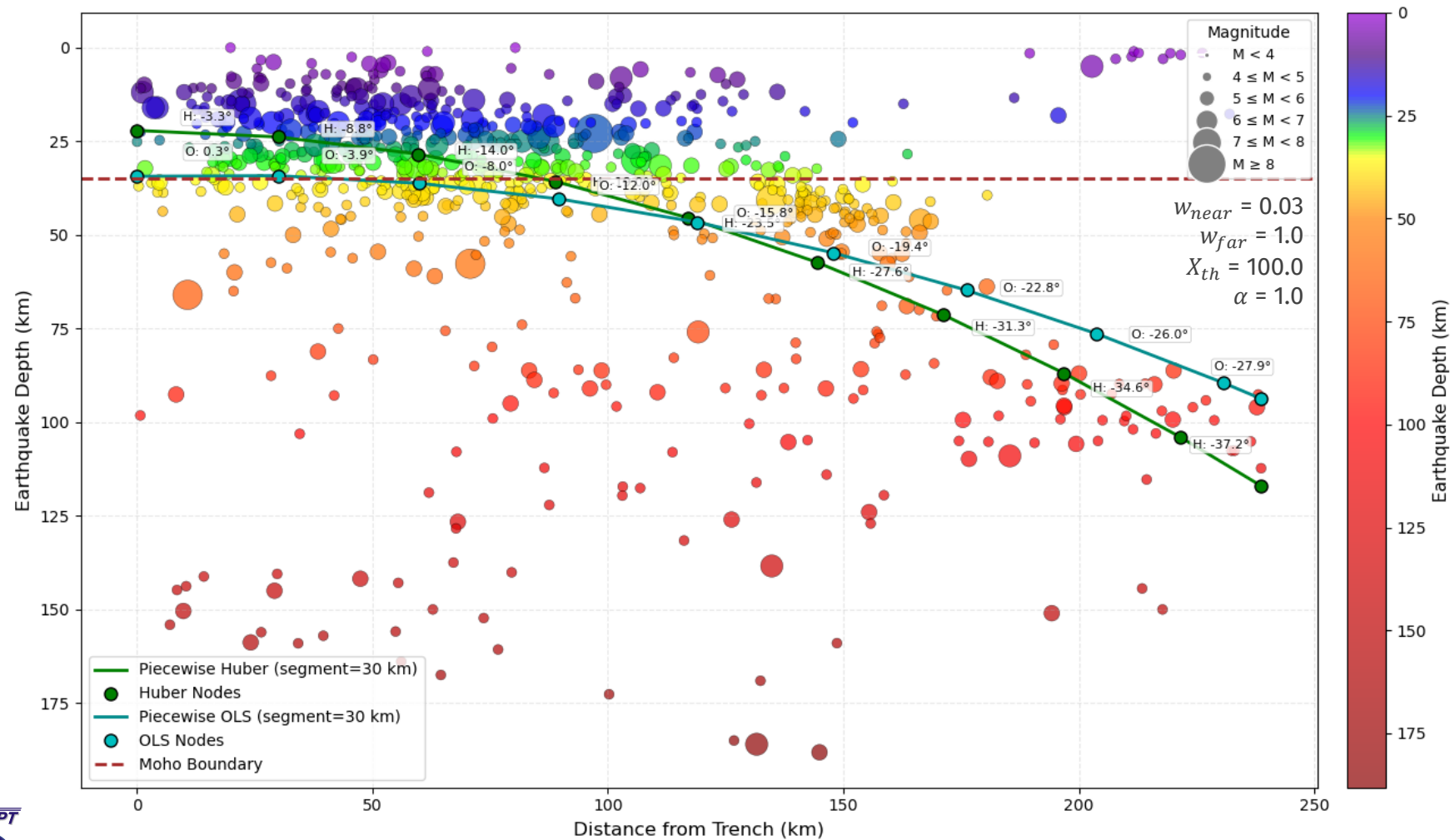


Робастная регрессия	МНК-регрессия
-1.13°	-6.95°
-4.52°	-8.73°
-7.87°	-10.47°
-11.14°	-12.19°
-14.30°	-13.87°
-17.33°	-15.52°
-20.22°	-17.13°
-22.96°	-18.70°
-25.54°	-20.23°
-27.97°	-21.71°
-30.24°	-23.15°
-32.37°	-24.54°
-34.09°	-25.50°



ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ ЧИЛИЙСКОЙ ЗОНЫ

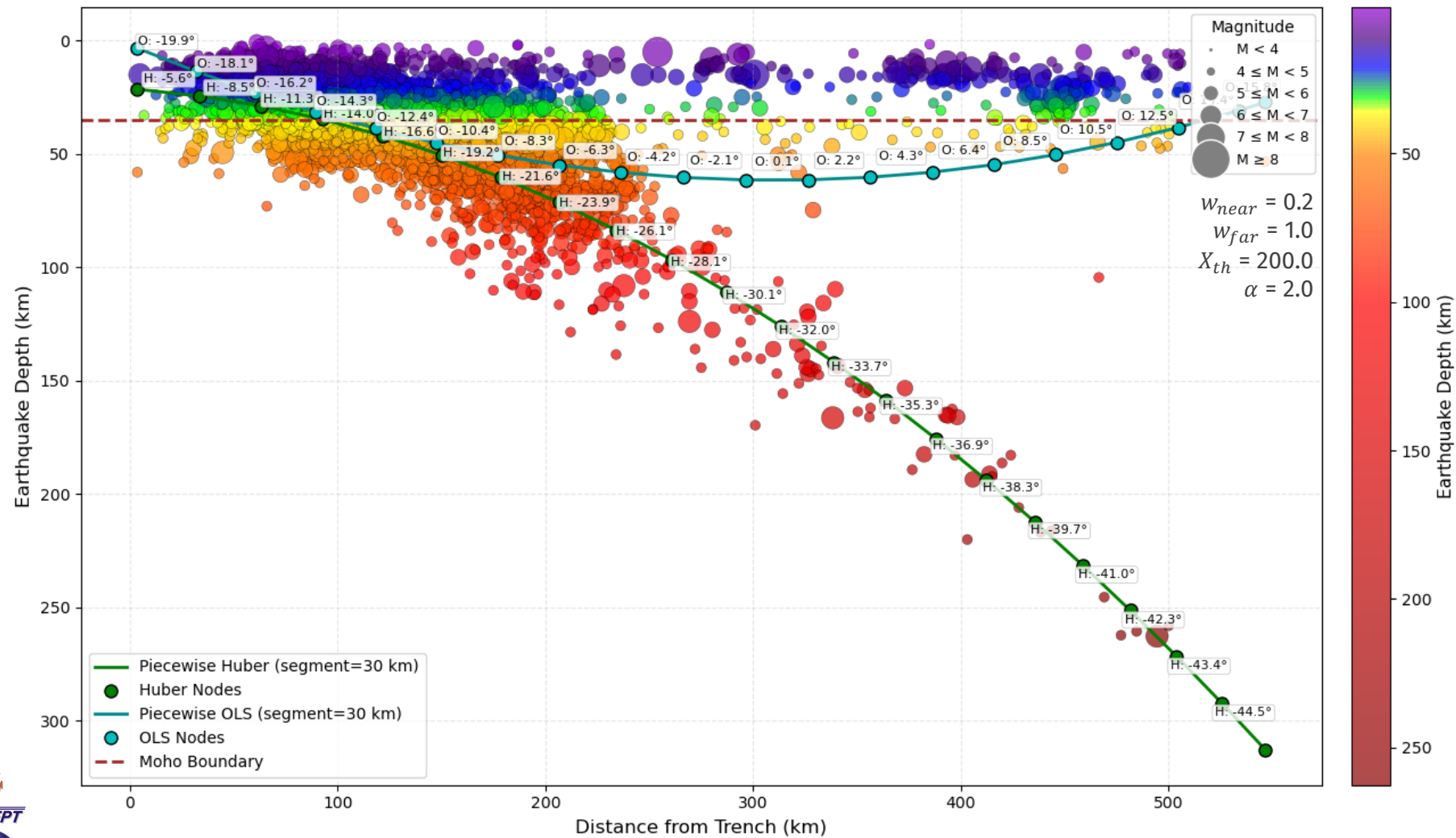
Comparison of Huber and Polynomial OLS Piecewise Approximation



Робастная регрессия	МНК-регрессия
-3.27°	0.30°
-8.77°	-3.87°
-14.04°	-7.99°
-18.97°	-11.98°
-23.51°	-15.81°
-27.62°	-19.43°
-31.31°	-22.82°
-34.62°	-25.98°
-37.19°	-27.92°

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ ЯПОНСКОЙ ЗОНЫ

Comparison of Huber and Polynomial OLS Piecewise Approximation



Робастная регрессия	МНК-регрессия
-5.60°	-19.89°
-8.46°	-18.10°
-11.27°	-16.25°
-14.00°	-14.34°
-16.64°	-12.39°
-19.17°	-10.39°
-21.58°	-8.35°
-23.89°	-6.28°
-26.08°	-4.18°
-28.15°	-2.07°
-30.11°	0.05°
-31.95°	2.17°
-33.70°	4.29°
-35.34°	6.38°
-36.89°	8.45°
-38.35°	10.49°
-39.73°	12.49°
-41.02°	14.44°
-42.25°	15.82°

ВЫДЕЛЕНИЕ АФТЕРШОКОВ

Гипотеза: облако афтершоков $\approx$ границы очага землетрясения

NND-кластеризация (nearest neighbor distance)

Нормированное расстояние между событиями i и j в пространственно-временной области

$$n_{ij} = \begin{cases} t_{ij}(r_{ij})^{d_f} 10^{-bm_i}, & t_{ij} > 0; \\ \infty, & t_{ij} \leq 0 \end{cases}$$

$t_{ij} = t_j - t_i$ временной интервал

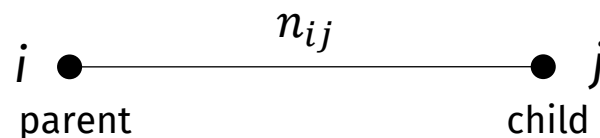
r_{ij} — эпицентральное расстояние

m_i — магнитуда события i

d_f — фрактальная размерность пространственного распределения

b — параметр закона Гутенберга–Рихтера

Критерий кластеризации



$$i^* = \arg \min_{i:t_i < t_j} n_{ij}$$

кластер формируется при условии

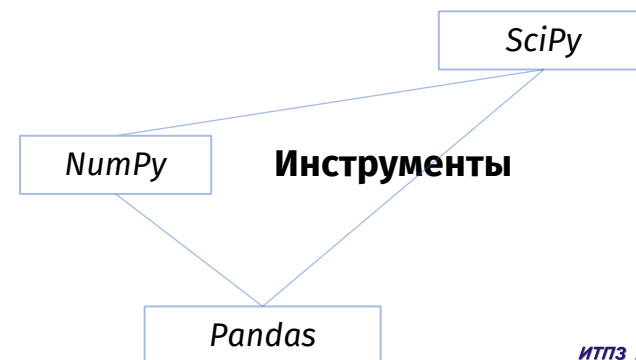
$$n_{ij} \leq n_c$$

Калибровка n_c (бутстреп-подход)

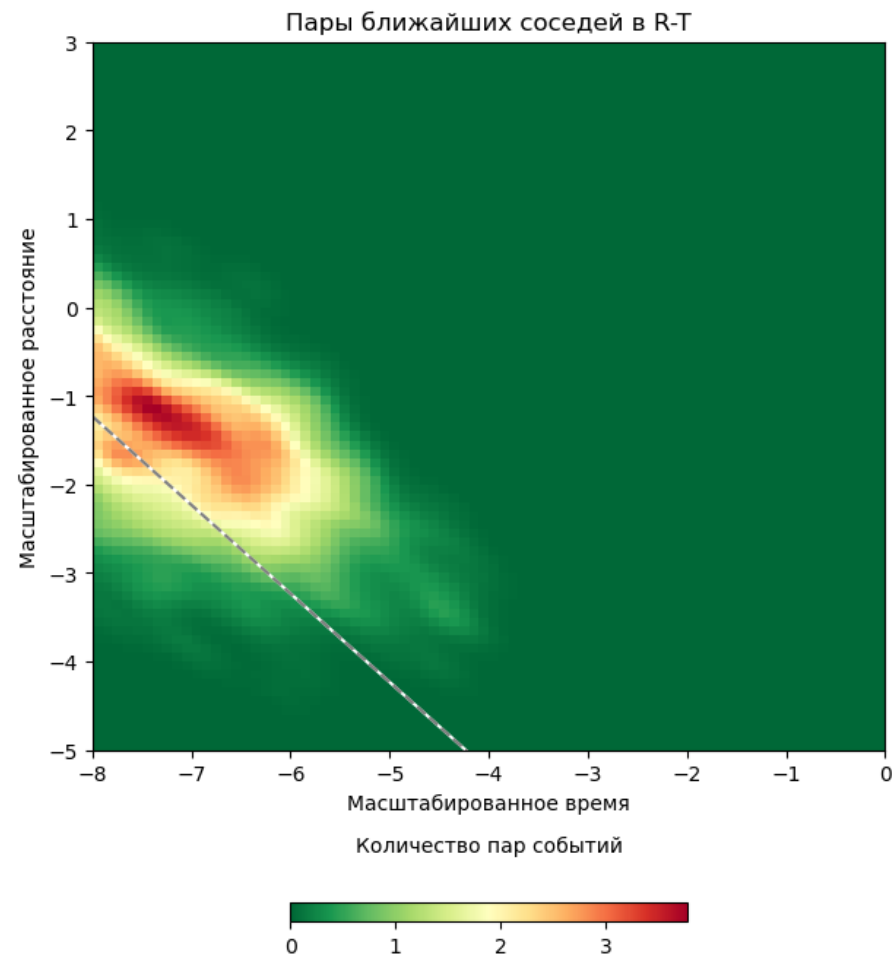
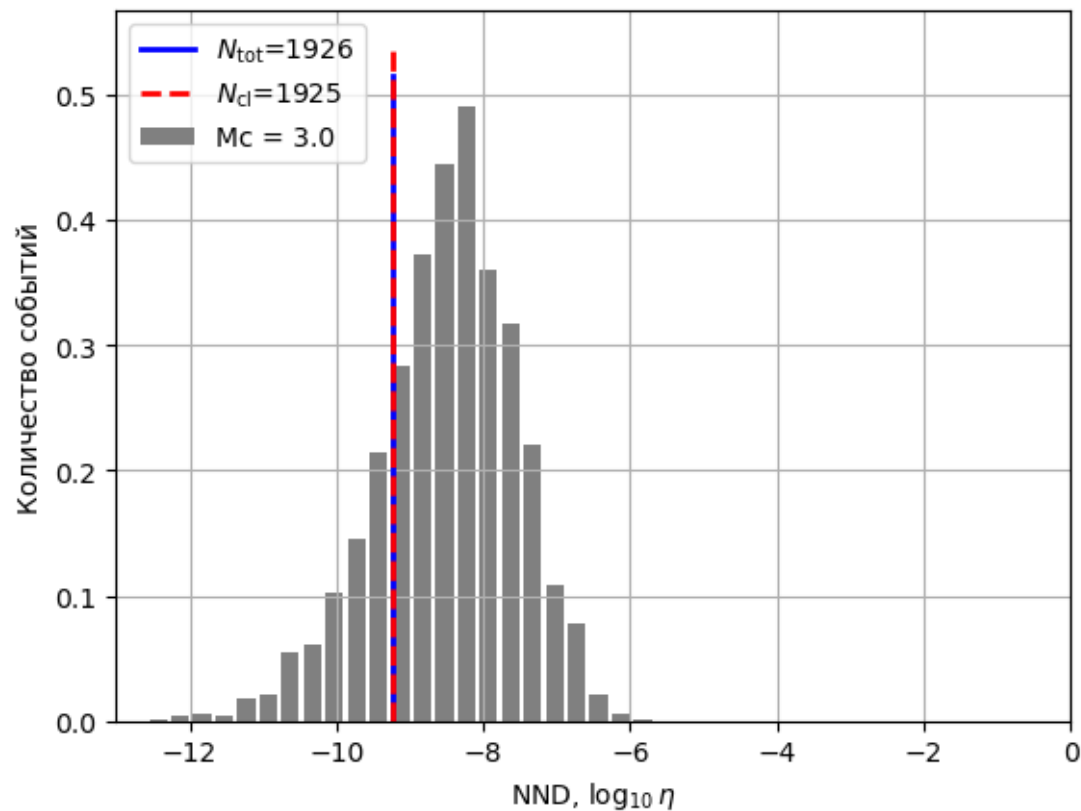
$$n_0^{(k)} = P_{1\%}(\log_{10}(n_i^{(k)}))$$

$$n_c = \frac{1}{B} \sum_{k=1}^B n_0^{(k)}$$

B — число итераций



На примере Японской зоны субдукции



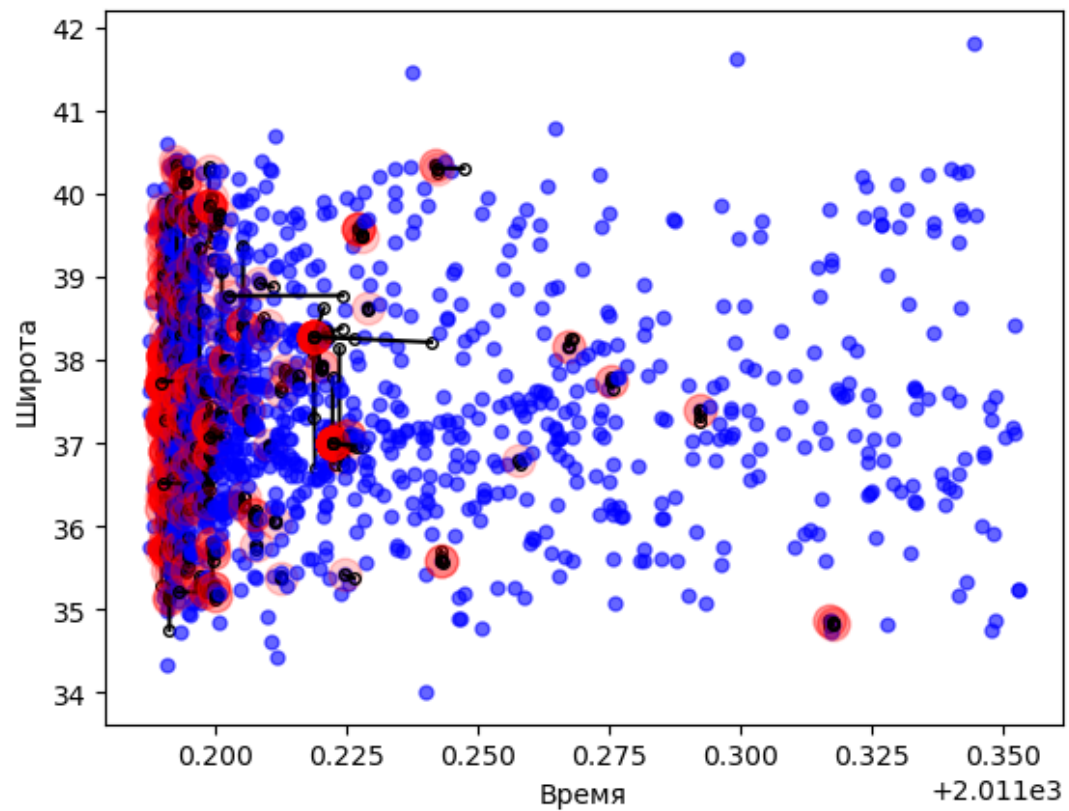
$$\eta_{ij} = T_{ij} \cdot R_{ij}$$

$$T_{ij} = t_{ij} \cdot 10^{-qbm_i}$$

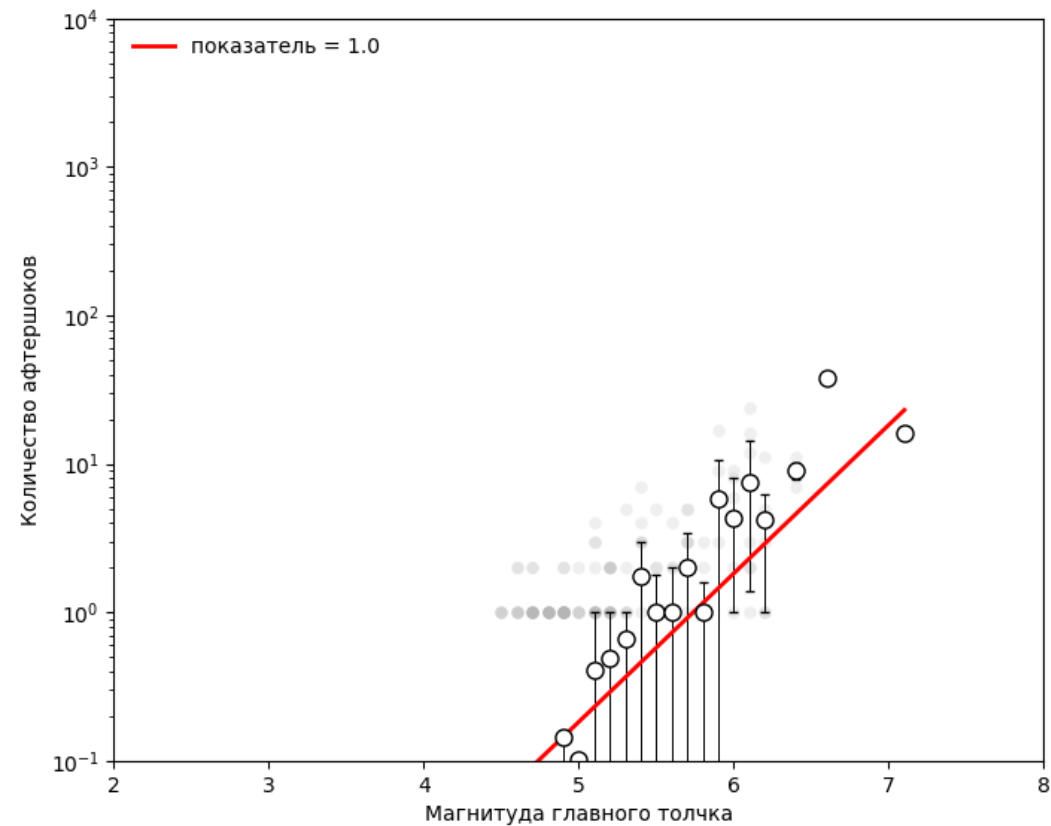
$$R_{ij} = (r_{ij})^{d_f} \cdot 10^{-(1-q)bm_i}$$

$$\log_{10} \eta_{ij} = \log_{10} T_{ij} + \log_{10} R_{ij}$$

Распределение событий в пространстве

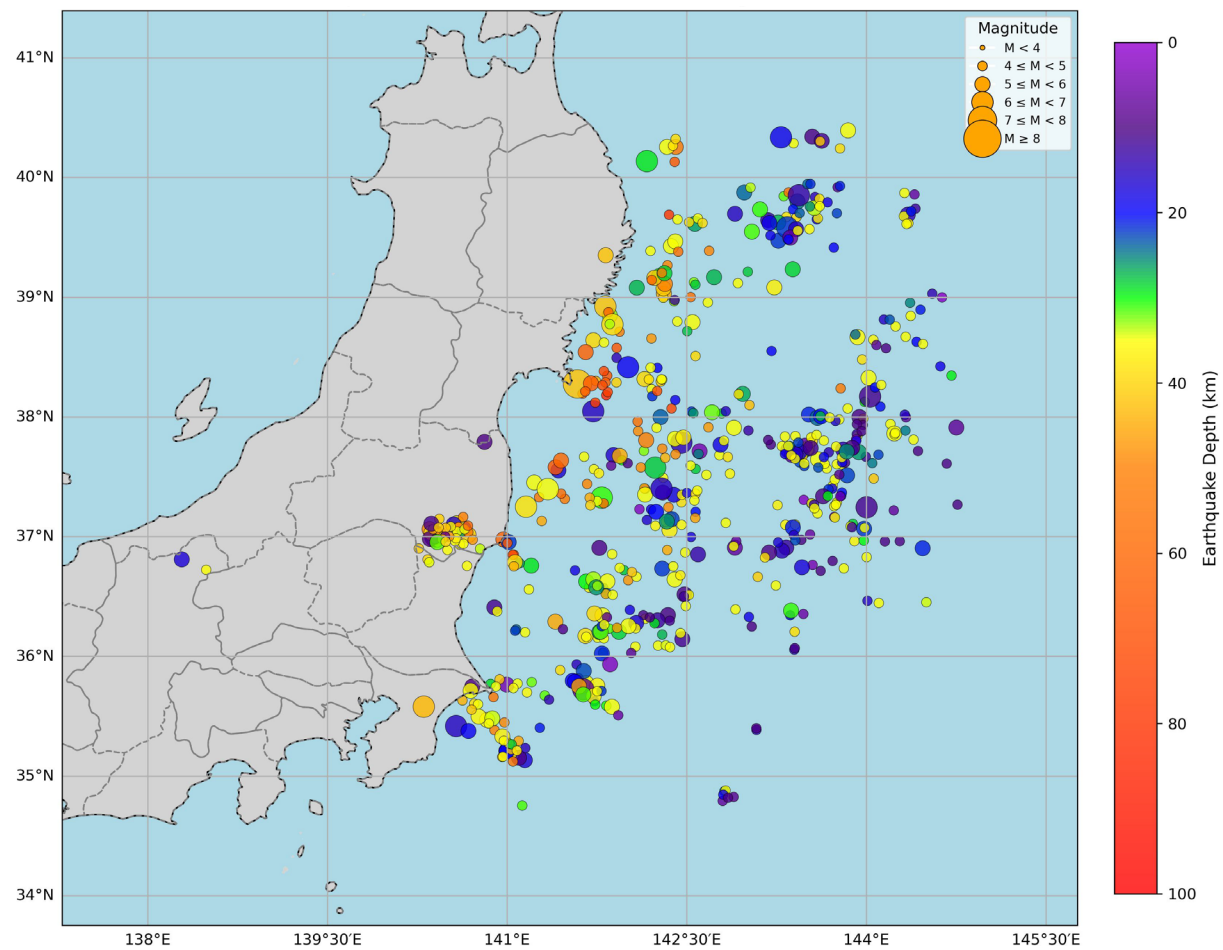


Проверка закона продуктивности

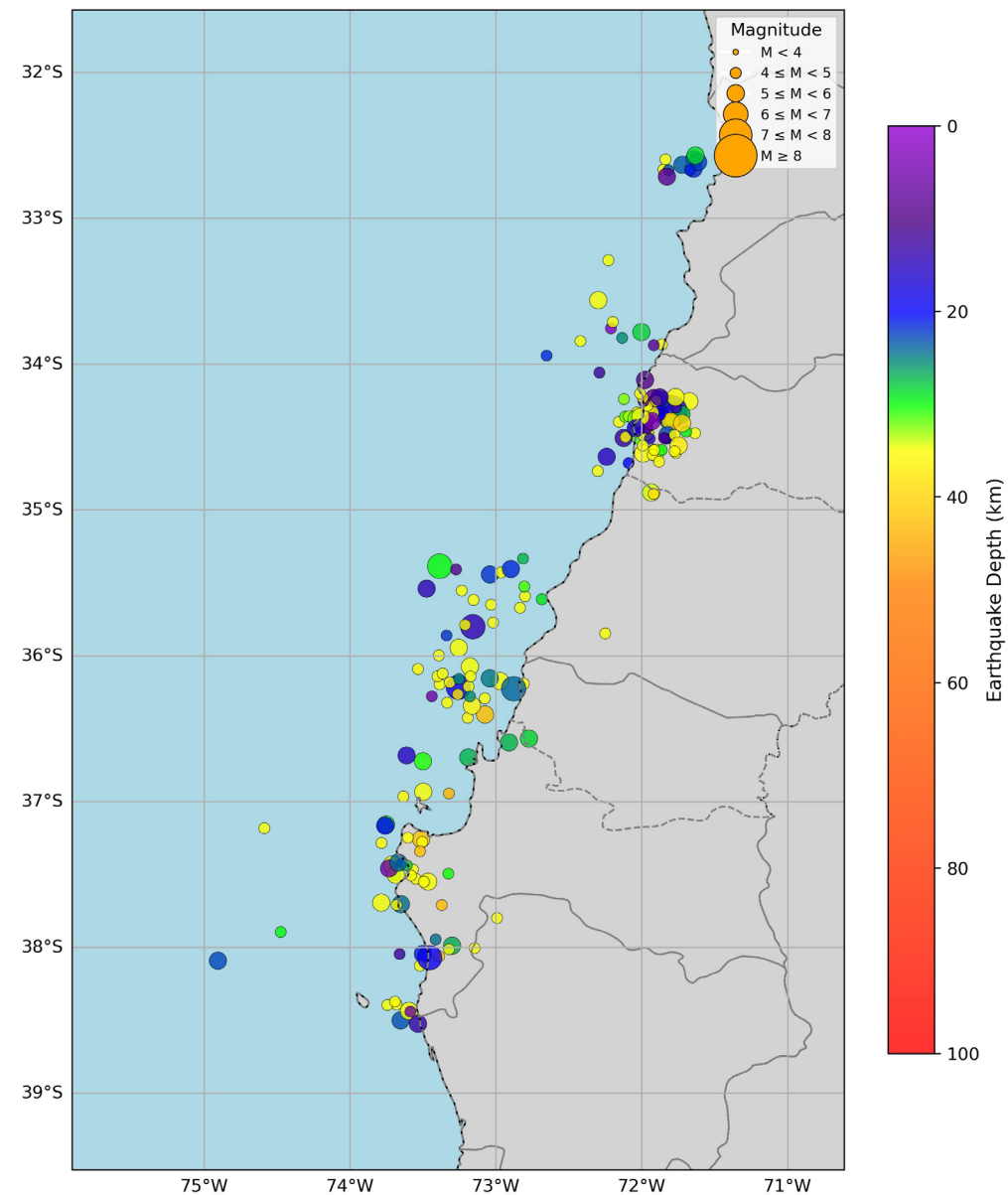


ПОЛУЧЕННЫЕ КЛАСТЕРЫ

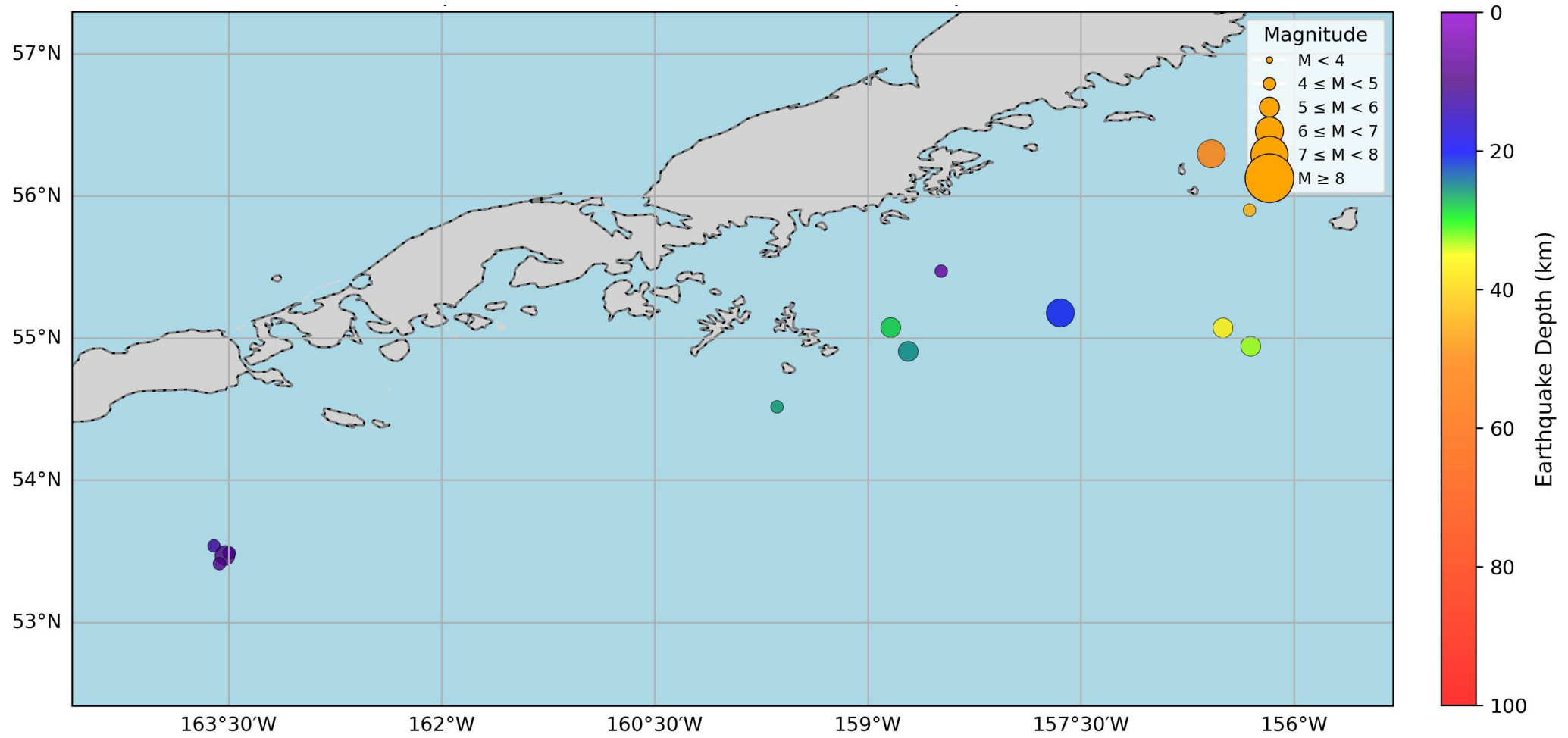
ЯПОНСКОЙ ЗОНЫ



ЧИЛИЙСКОЙ ЗОНЫ

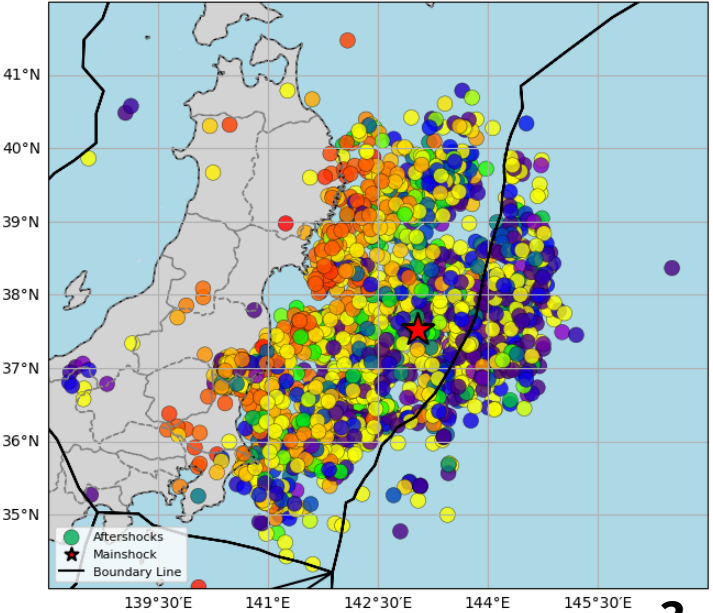


алеутской зоны



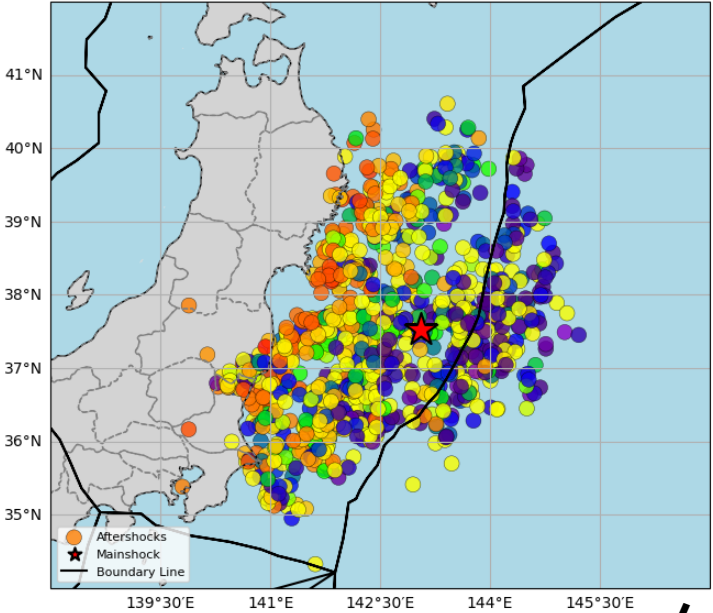
СРАВНЕНИЕ С ДРУГИМИ МЕТОДАМИ

Исходные данные



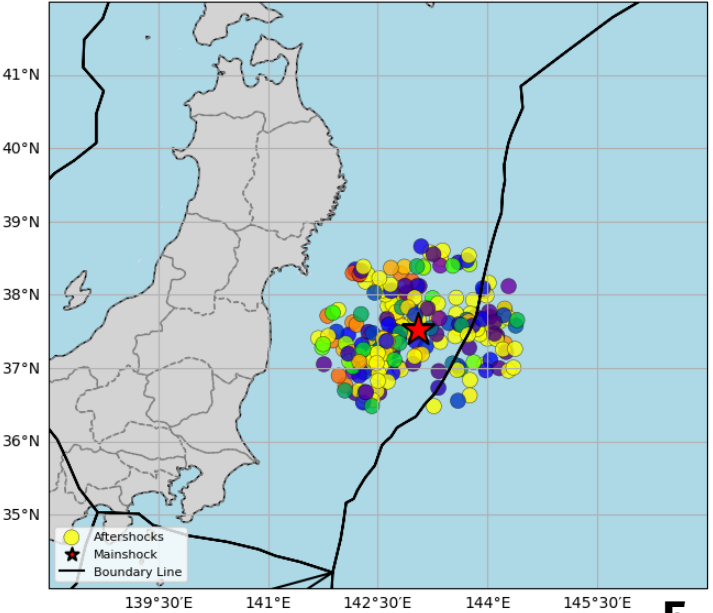
Aftident

1



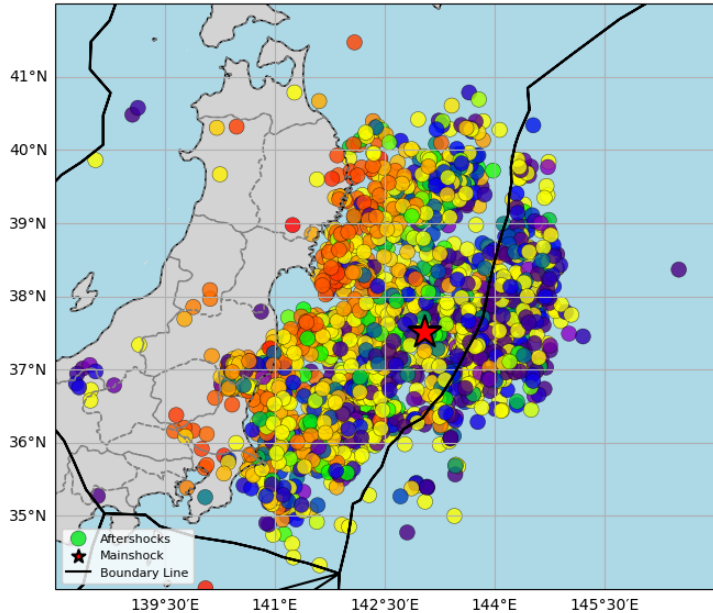
Gardner-Knopoff

2



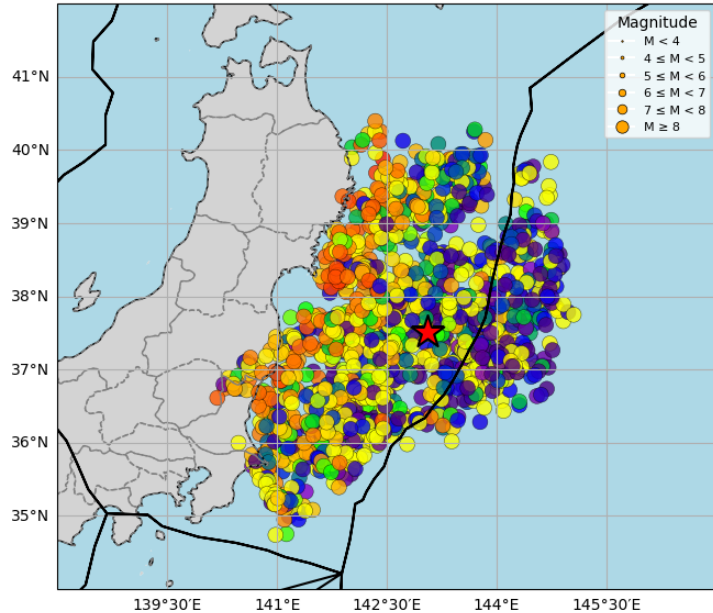
Reasenberg Declustering

3

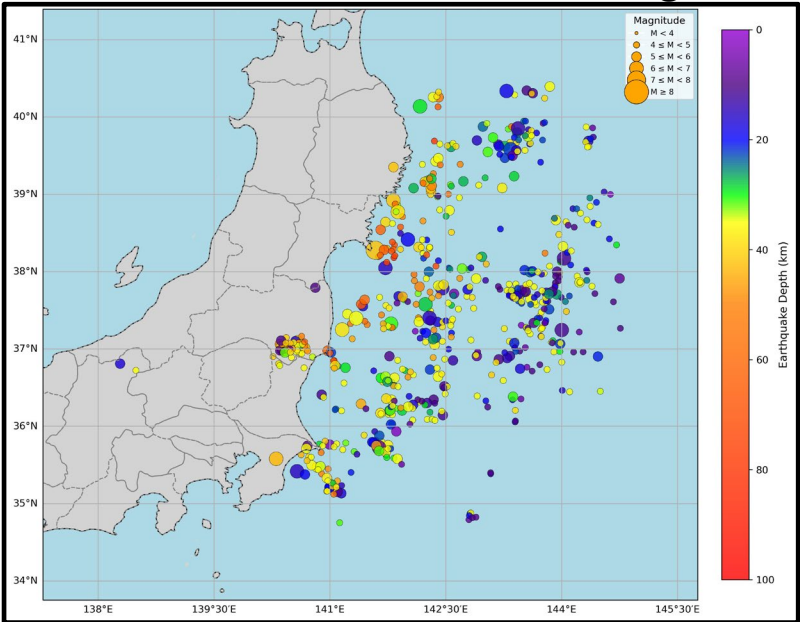


DBSCAN Clustering

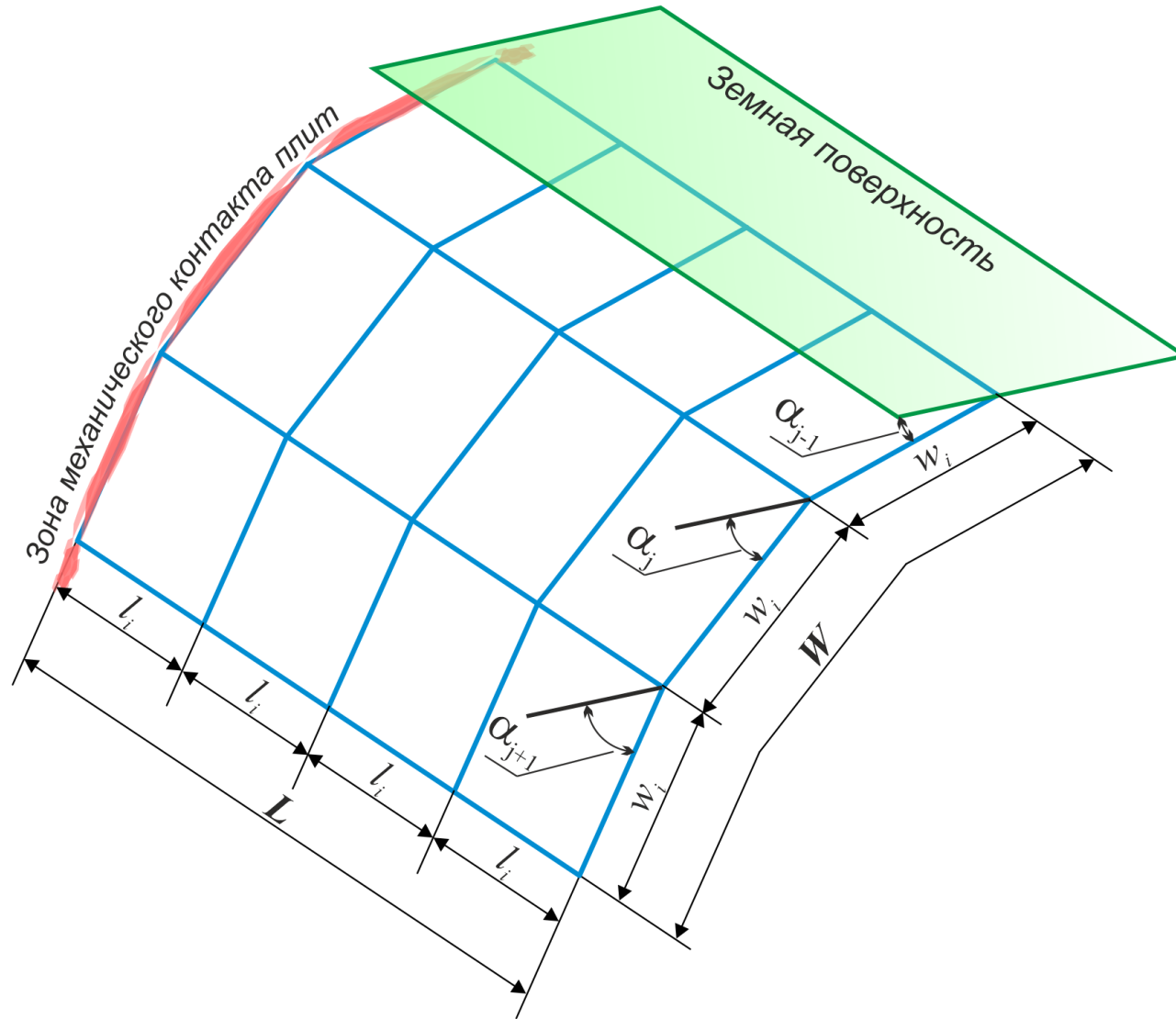
4



5



СЕТКА ДИСКРЕТИЗАЦИИ ОЧАГОВОЙ ОБЛАСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ



ВЫДЕЛЕНИЕ
АФТЕРШОКОВ

ВОССТАНОВЛЕНИЕ
ПРОФИЛЯ
СУБДУКЦИОННОЙ
ЗОНЫ

ПРЕИМУЩЕСТВА ПРЕДЛОЖЕННОГО ПОДХОДА

- полная автоматизация;
- устойчивость к шуму и неточным данным;
- интерпретируемость результатов;
- готовность к интеграции в оперативные системы, такие как системы прогноза цунами

ОГРАНИЧЕНИЯ ПРЕДЛОЖЕННОГО ПОДХОДА

- малое количество сейсмических данных, особенно в регионах с небольшим количеством датчиков (Алеуты);
- необходимость использования территориальных коэффициентов

ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ

Использование методов
глубокого обучения
(CNN, Transformer)

Расширение NND-кластеризации
на 3D-геометрию

Интеграция в систему регистрации смещений земной поверхности
в режиме реального времени посредством спутниковой геодезической сети

ВЫВОДЫ

Разработан автоматизированный алгоритм для определения геометрии очагов субдукционных землетрясений на основе робастной регрессии Хубера и NND-кластеризации

Методы обеспечивают устойчивость к шуму и воспроизводимость результатов, но имеют ограничения в регионах с малым объемом данных

Подход применим к глобальным сейсмическим каталогам (NEIC/USGS) и перспективен для систем оперативного прогноза цунами

Дальнейшее развитие включает интеграцию в систему регистрации смещений земной поверхности в режиме реального времени

IV Всероссийская научная конференция
«Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений»

ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ ОЧАГОВ СУБДУКЦИОННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Игнатьев Дмитрий Александрович

Институт океанологии
им. П.П. Ширшова РАН



Владимирова Ирина Сергеевна

Институт теории прогноза землетрясений
и математической геофизики РАН,
институт океанологии
им. П.П. Ширшова РАН



22 – 23 октября 2025 г.

г. Москва