



XXVI Уральская молодежная научная школа по геофизике



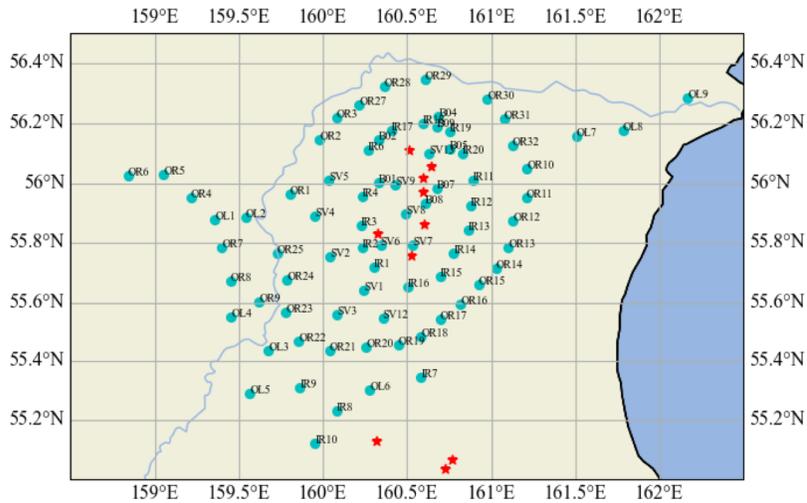
Изучение эффекта ближней зоны для землетрясений вблизи Ключевской группы вулканов

А.П. Молокова^{1,2}

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва

²ИТПЗ РАН, г. Москва

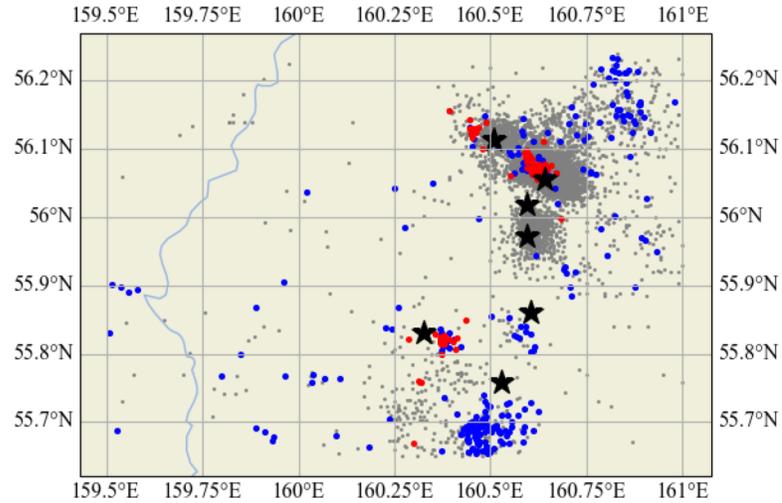
Эксперимент KISS, 2015-2016 гг



Карта расположения временных станций эксперимента KISS

- – временные станции
- ★ – вершины вулканов

83 автономные сейсмические станции в радиусе 55 км



Карта и разрез с землетрясениями под КГВ, записанными в рамках эксперимента KISS

- – ВЧ землетрясения
- – ДП землетрясения
- – землетрясения под КГВ в период 1968–2023 гг.
- ★ – вершины вулканов

Записано 2136 событий. Из них выделено:
343 вулканических землетрясения под КГВ.
Из них: **84 длиннопериодных (ДП)** (24%)
и **259 высокочастотных (ВЧ)** (76%)

Оценка сейсмических моментов

Подбираются записи одного землетрясения, полученные с разных станций, и рассчитываются их быстрое преобразование Фурье



Спектр приводится к условиям однородного упругого полупространства – в настоящем исследовании с помощью поправки за геометрическое расхождение C_1 и за добротность C_2



Оценивается уровень низкочастотной площадки спектра на нулевой частоте, и по формуле вычисляется сейсмический момент для индивидуальной записи

$$M_0 = \frac{4\pi\rho R c^3 \Omega_0}{R_{\theta\varphi}} \quad C_1 = \frac{1}{r}$$
$$\Omega_0 = C_1 C_2 A \quad C_2 = \exp\left(-\frac{\pi f t}{Q(f)}\right)$$

M_0 – сейсмический момент

Ω_0 – уровень площадки спектра

ρ – плотность среды

R – учитывает геометрическое расхождение в слоистой или сферической модели Земли

r – гипоцентрально расстояние

c – скорость объемных волн

$R_{\theta\varphi}$ – диаграмма направленности для объемной волны

A – амплитуда спектра

f – частота

t – время

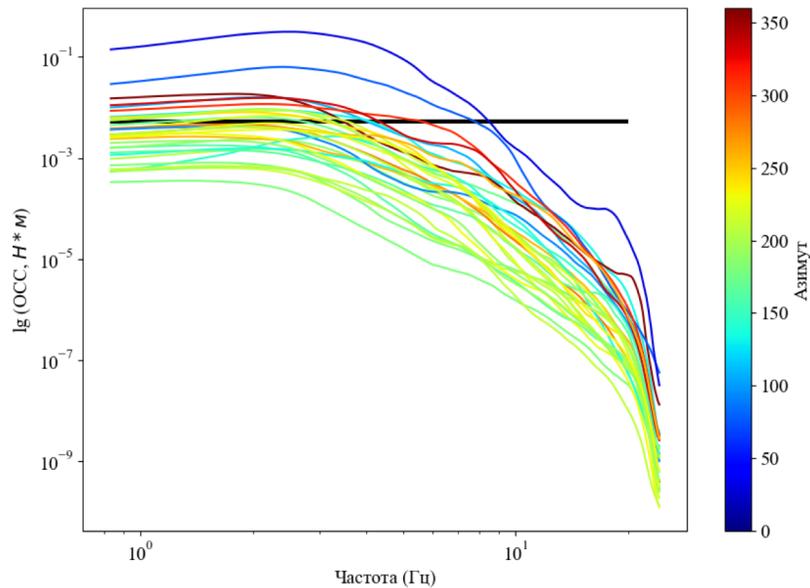
$Q(f)$ – добротность

Эффект направленности

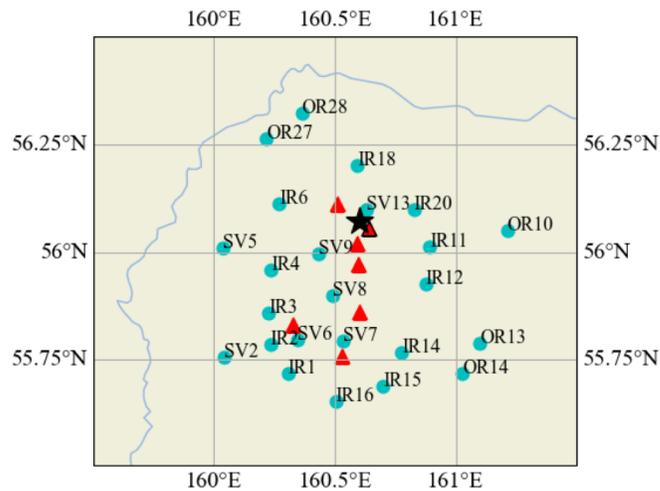
При анализе полученных индивидуальных значений сейсмического момента был качественно обнаружен эффект направленности (зависимость уровня спектра от азимута)



Для 60 выделенных землетрясений были построены диаграммы направленности – зависимость индивидуальных (станционных) оценок сейсмического момента от азимута



Индивидуальные станционные спектры смещений (по оси ординат – OCC или очаговый спектр смещений) для длиннопериодного землетрясения 2015.08.09 ($M_w=2.12$)



Карта события. Звезда – эпицентр землетрясения, треугольники – вершины вулканов (с черной обводкой – Ключевская сопка), голубые кружки – станции с эпицентральной дистанцией до 50 км

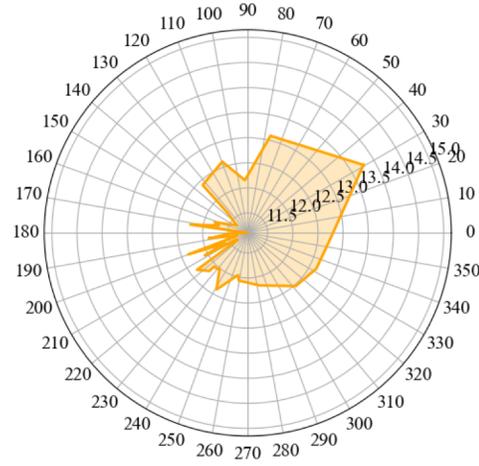


Диаграмма направленности. По окружности отмечены азимуты, по радиусу – логарифмы сейсмических моментов

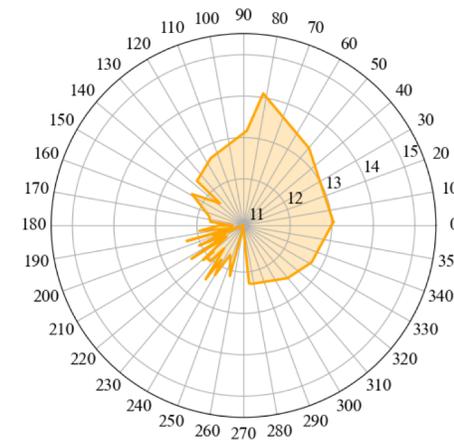


Диаграмма направленности для ДП землетрясения (2015.08.11). По окружности отмечены азимуты, по радиусу – логарифмы сейсмических моментов

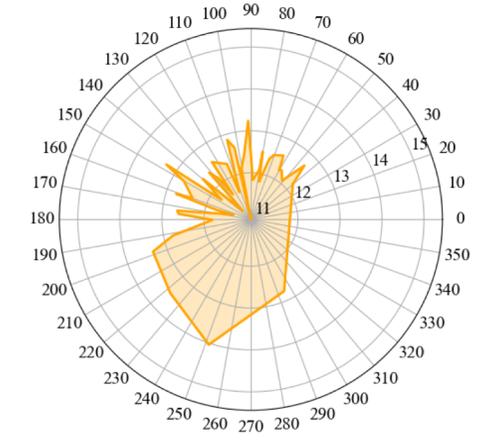


Диаграмма направленности для ВЧ землетрясения (2015.10.01). По окружности отмечены азимуты, по радиусу – логарифмы сейсмических моментов

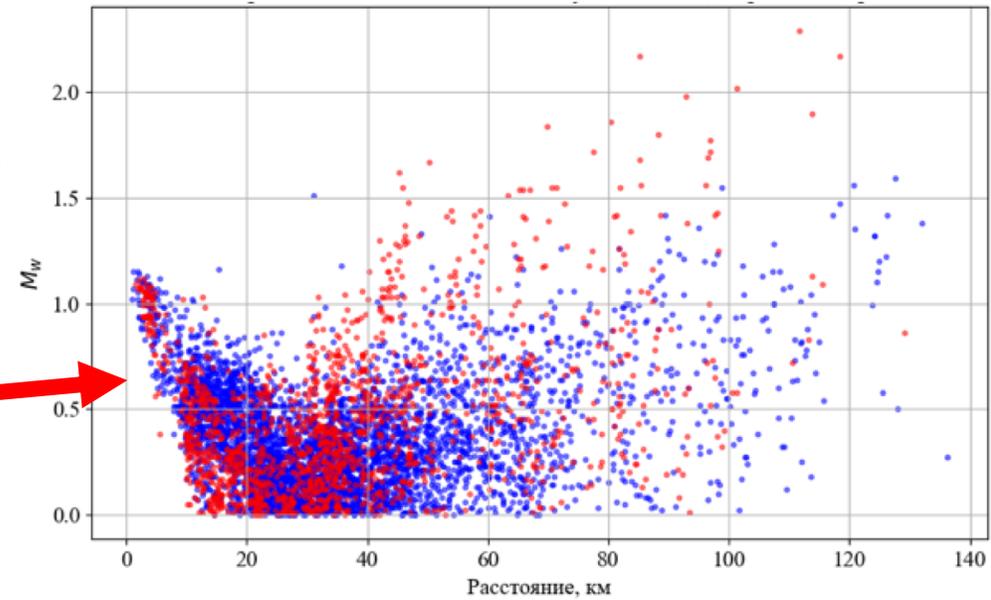
Зависимость сейсмического момента от эпицентрального расстояния

При небольших эпицентральных расстояниях (до 20 км) наблюдается зависимость, которая может быть связана с эффектом ближней зоны

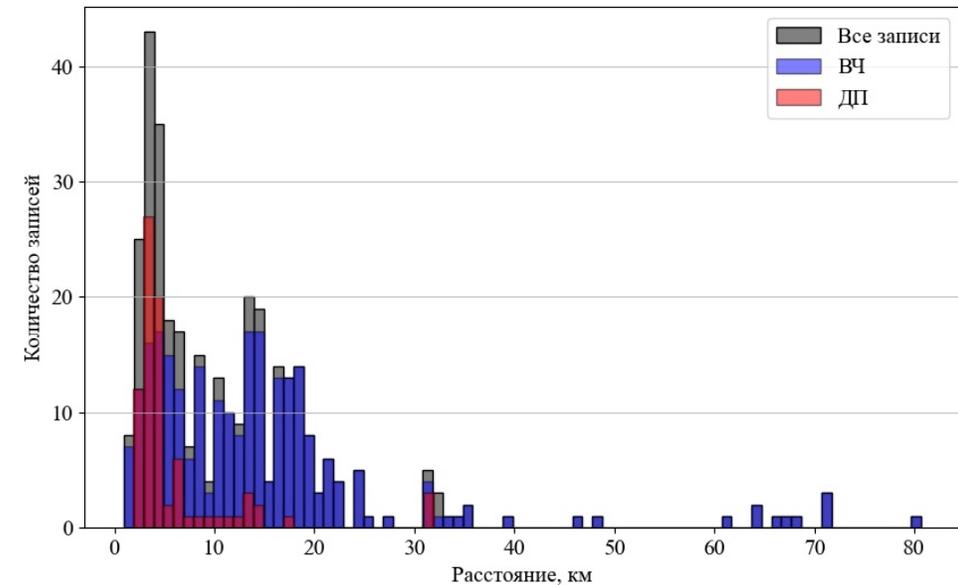
Наблюдается, что максимальные сейсмические моменты получены с расстояний:

До 10 км – для ДП землетрясений
До 20 км – для ВЧ землетрясений

График зависимости разности средней моментной магнитуды и моментной магнитуды на станции от эпицентрального расстояния. Красный – ДП, синий – ВЧ



Гистограмма максимальных сейсмических моментов. Красный – ДП, синий – ВЧ, серый – все записи



Изучение связи $M_w - M_L$ для землетрясений КГВ

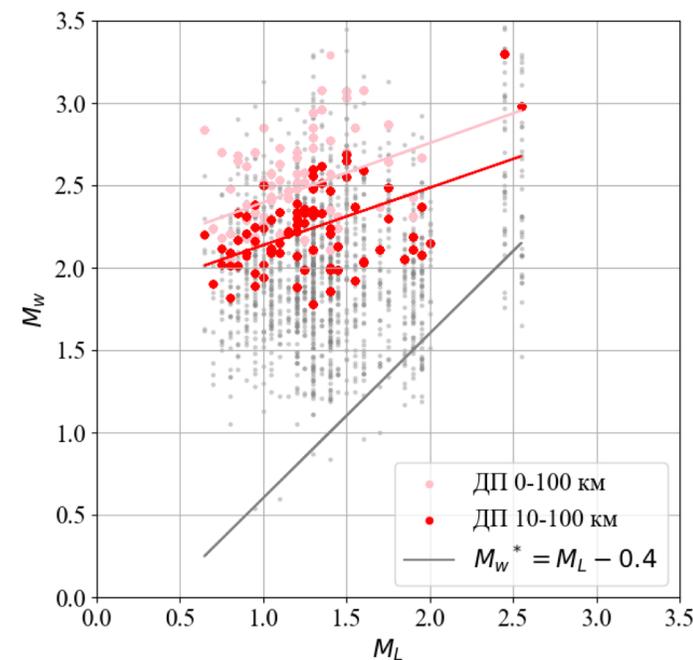
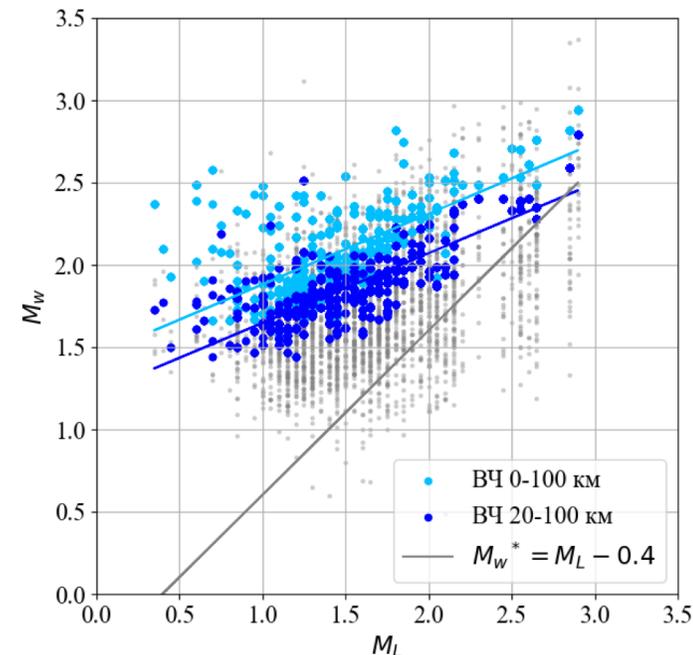
- Для ДП землетрясений расхождение между оценками разных магнитудных шкал оказалось выше, чем для ВЧ
- Полученные моментные магнитуды для ДП слабо зависят от локальной магнитуды, что является предварительным результатом, и может быть объяснено узким интервалом рассматриваемых магнитуд
- Зависимость для диапазона 3–6 не описывает соотношение магнитуд в диапазоне 1–2.5, особенно для ДП землетрясений
- Учет ближней зоны уменьшает разброс значений и следовательно улучшает оценку

$$M_w = \frac{2}{3}(\lg M_0 - 9.1)$$

Зависимость полученных моментных магнитуд M_w от локальной магнитуды M_L для ВЧ (синие) и ДП (красные) землетрясений

Серые точки –
станционные оценки
магнитуд

Темно-серая линия —
соотношение моментной
и региональной
магнитуд, полученный по
выборке с более
сильными
тектоническими
(субдукционными)
землетрясениями
магнитудного диапазона
 $M_w = 3-6$



Канатори, 1977;
Абубакиров и др., 2018

Заключение

- Впервые по данным эксперимента KISS для Ключевской группы вулканов выполнен спектральный анализ
- На примере вулканической сейсмичности рассмотрен способ определения ближней зоны, а именно, по зависимости разности стационарных и средних значений магнитуды от расстояния.
- Рассмотрен эффект ближней зоны, а именно, направленность сейсмического сигнала.
- Определены межмагнитудные соотношения, определенные с учетом эффекта ближней зоны

Спасибо
за внимание

E-mail: molokova.ap@my.msu.ru

Идентификация типов вулканических землетрясений

Вулканические землетрясения

1 – 3 Гц

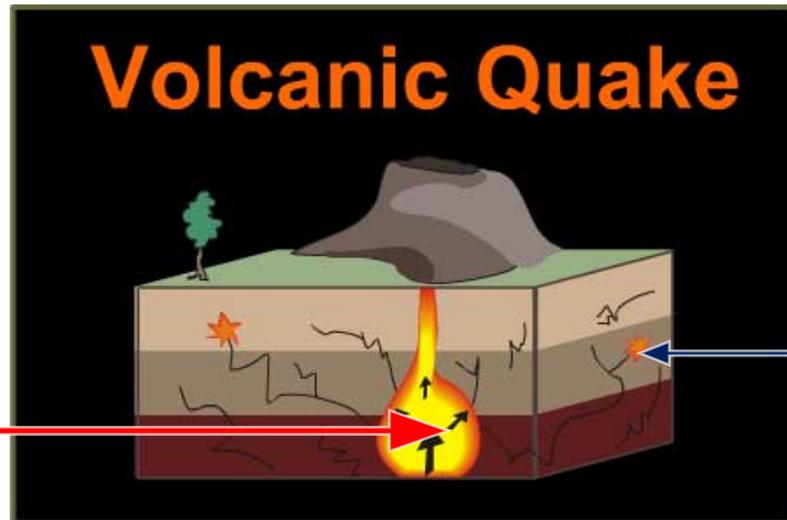
Низкочастотные
(длиннопериодные)

4 – 11 Гц

Высокочастотные
(вулкано-тектонические)

ДП

ВЧ



Идентификация по характерной частоте с помощью оценки соотношения спектральных амплитуд между низкими и высокими частотами



Для этого вычисляется логарифм спектрального отношения

$$\ln \left(\frac{\sum v_{\text{ДП}} / n_{\text{ДП}}}{\sum v_{\text{ВЧ}} / n_{\text{ВЧ}}} \right)$$

где $\sum v_{\text{ДП}}$ и $\sum v_{\text{ВЧ}}$ – суммы значений ДП и ВЧ амплитуд, $n_{\text{ДП}}$ и $n_{\text{ВЧ}}$ – число частот в ДП и ВЧ диапазонах.

Вопрос расхождения магнитудных соотношений для диапазонов магнитуд 1-2.5 и 3-6

Расхождения магнитудных соотношений M_w-M_L (полученное в данном исследовании для диапазона магнитуд 1-2.5) и $M_w^*-M_L$ (полученное в [Абубакиров и др., 2018] для диапазона магнитуд 3-6) может иметь несколько причин:

- различие в природе очагов субдукционных и вулканических землетрясений.
- модель затухания, используемая для приведения наблюдаемых спектров к условиям однородного полупространства, существенно различается, что связано, в том числе, с разным строением земной коры в районе КГВ и Авачинском заливе
- Отсутствие учета параметра «каппа» ($k(f)$ и $k(r)$), импедансной поправки [Скоркина, Гусев, 2017], стационарных поправок [Гусев, Скоркина, 2020] в связи с отсутствием таковых оценок для района КГВ
- Оценки M_w и M_w^* получены на разных гипоцентральных расстояниях, а именно, 30-80 км и 70-200 км, соответственно, поэтому существует вероятность наблюдения в полученных результатах эффектов ближней зоны

Заключение

- Впервые получена зависимость моментной и региональных магнитуд для диапазона $M=1-3$ для землетрясений Ключевской группы вулканов.

Полученные результаты ценны

С научной точки зрения

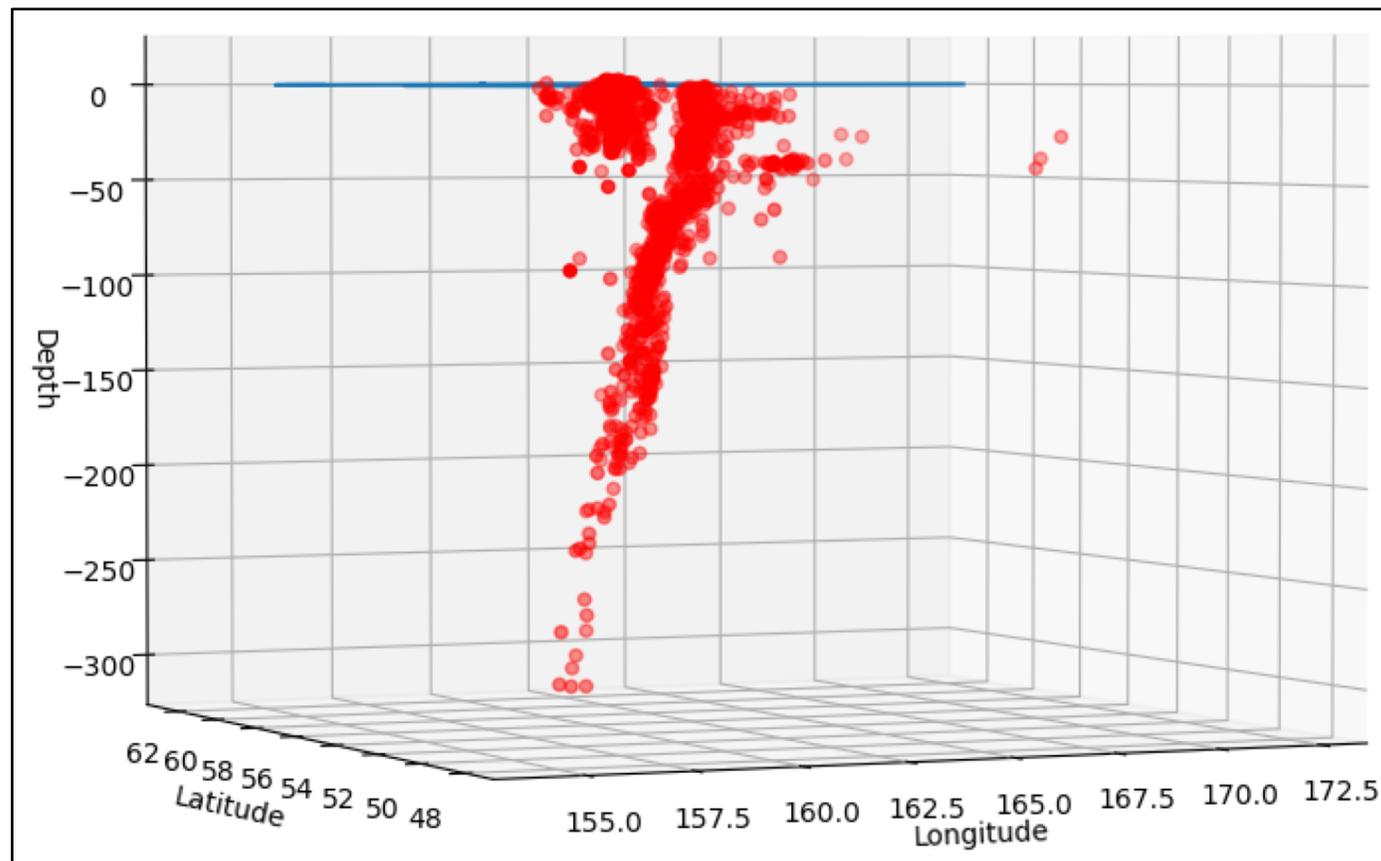
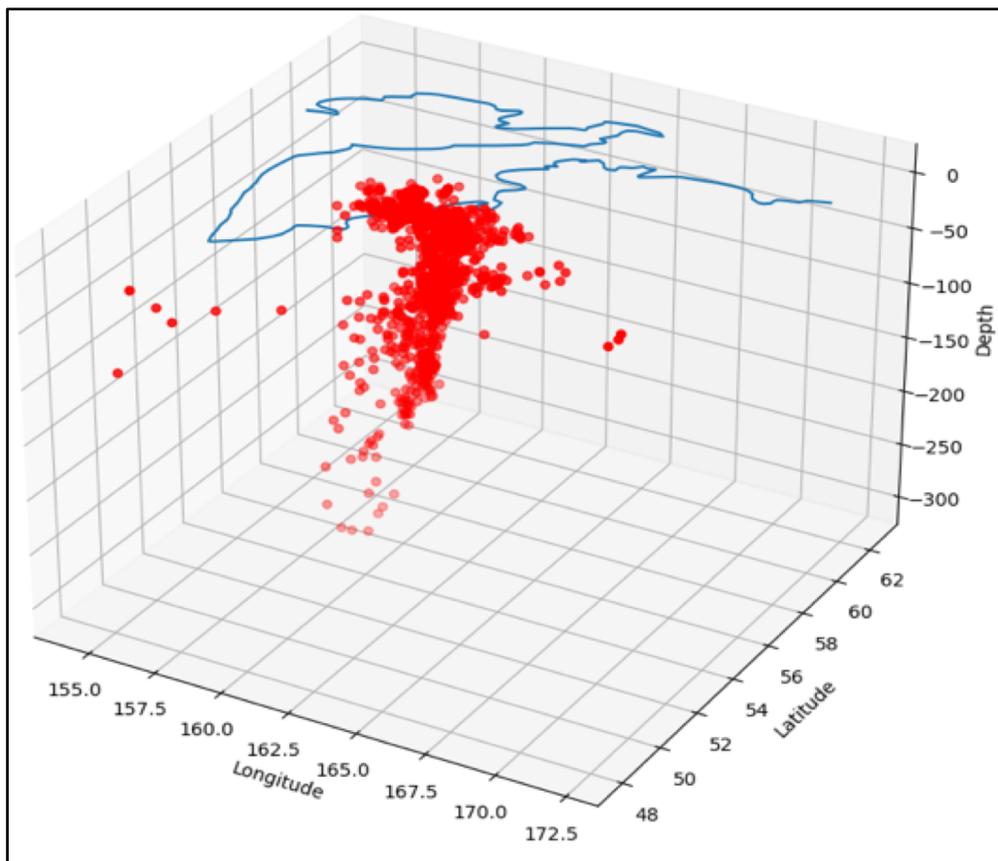
Для понимания физики очагов вулканических землетрясений (изучены зависимости очаговых параметров)

С практической точки зрения

Для прогноза подготавливаемых извержений, потенциально опасных для населения и инфраструктуры, для оценки сейсмической опасности

В 2015–2016 гг. в районе КГВ в рамках проекта KISS, были установлены еще 83 автономных сейсмических станции сроком на 1 год

В результате их работы было записано 2136 событий



Карта землетрясений, записанных в рамках проекта KISS

Спектральный метод определения сейсмического момента

Для 146 вулканических землетрясений*

92 индивидуальные оценки сейсмических моментов

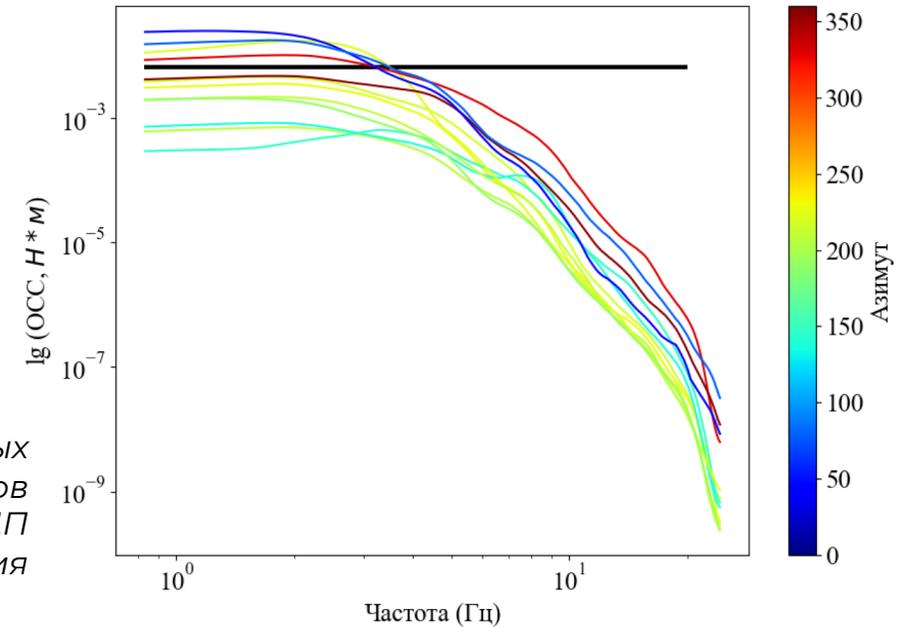
36 оценок для ДП

56 оценок для ВЧ

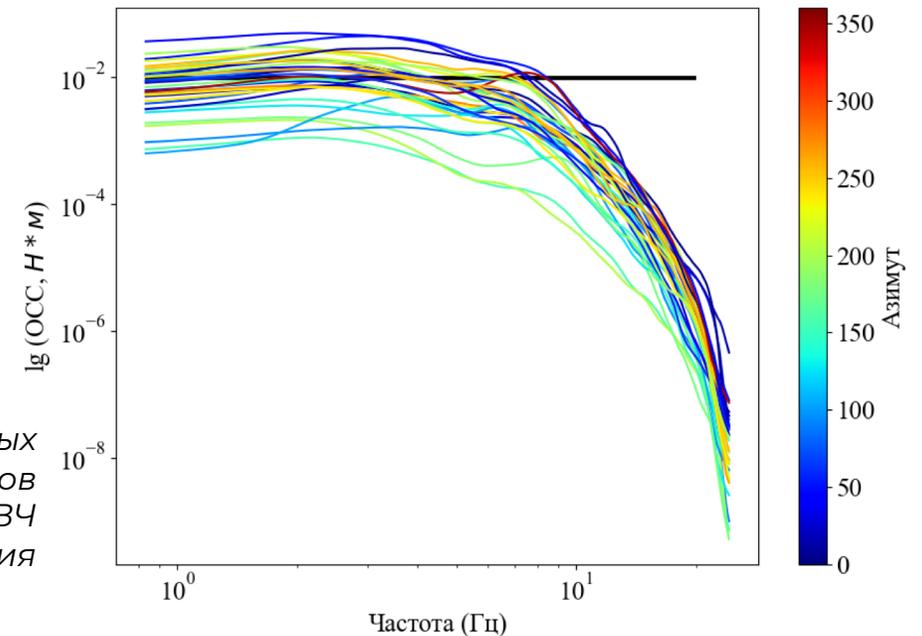
*которые уже участвовали в обработке методом спектральных отношений

Молокова А.П., 2024

Пример индивидуальных стационарных спектров смещений для ДП землетрясения



Пример индивидуальных стационарных спектров смещений для ВЧ землетрясения



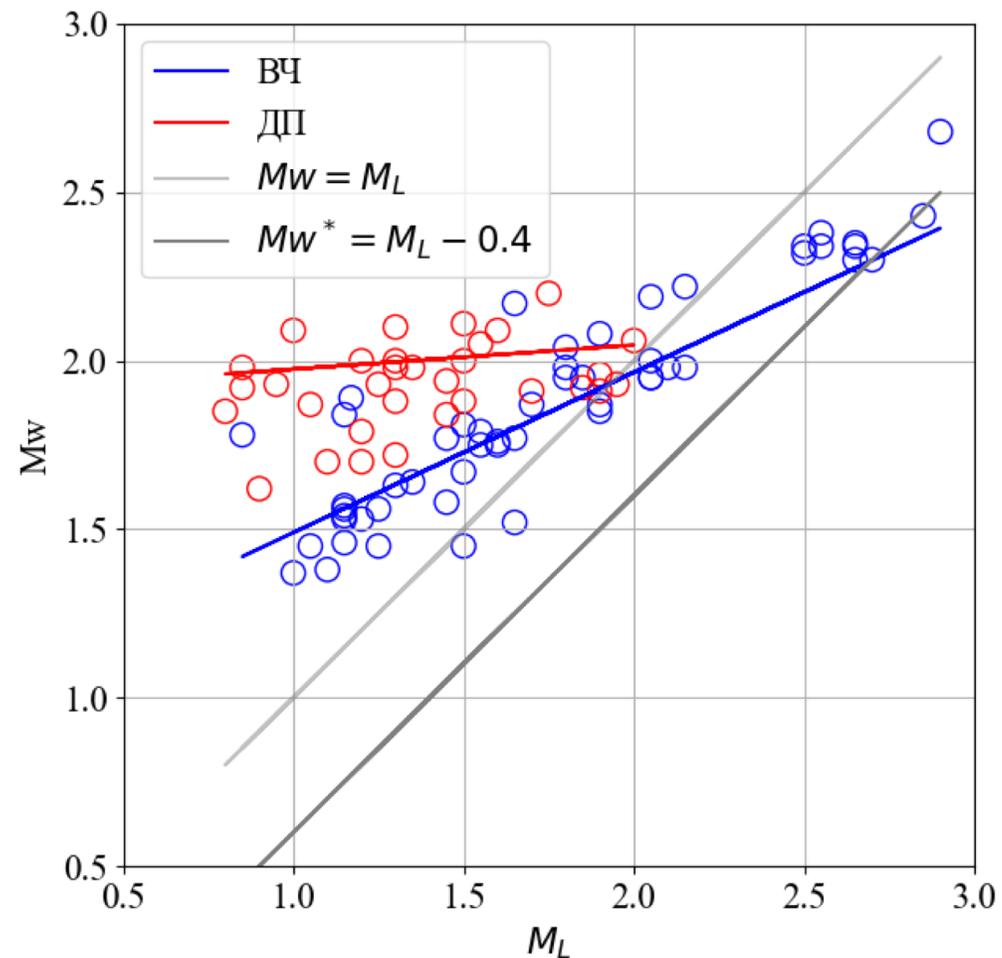
Изучение связи $M_w - M_L$ для землетрясений КГВ

Полученные оценки сейсмических моментов были пересчитаны в моментные магнитуды:

$$M_w = \frac{2}{3} (\lg M_0 - 9.1)$$

Затем было проведено сопоставление с имеющимися в каталоге КФ оценками региональной магнитуды M_L

Капатори, 1977; Абубакиров и др., 2018



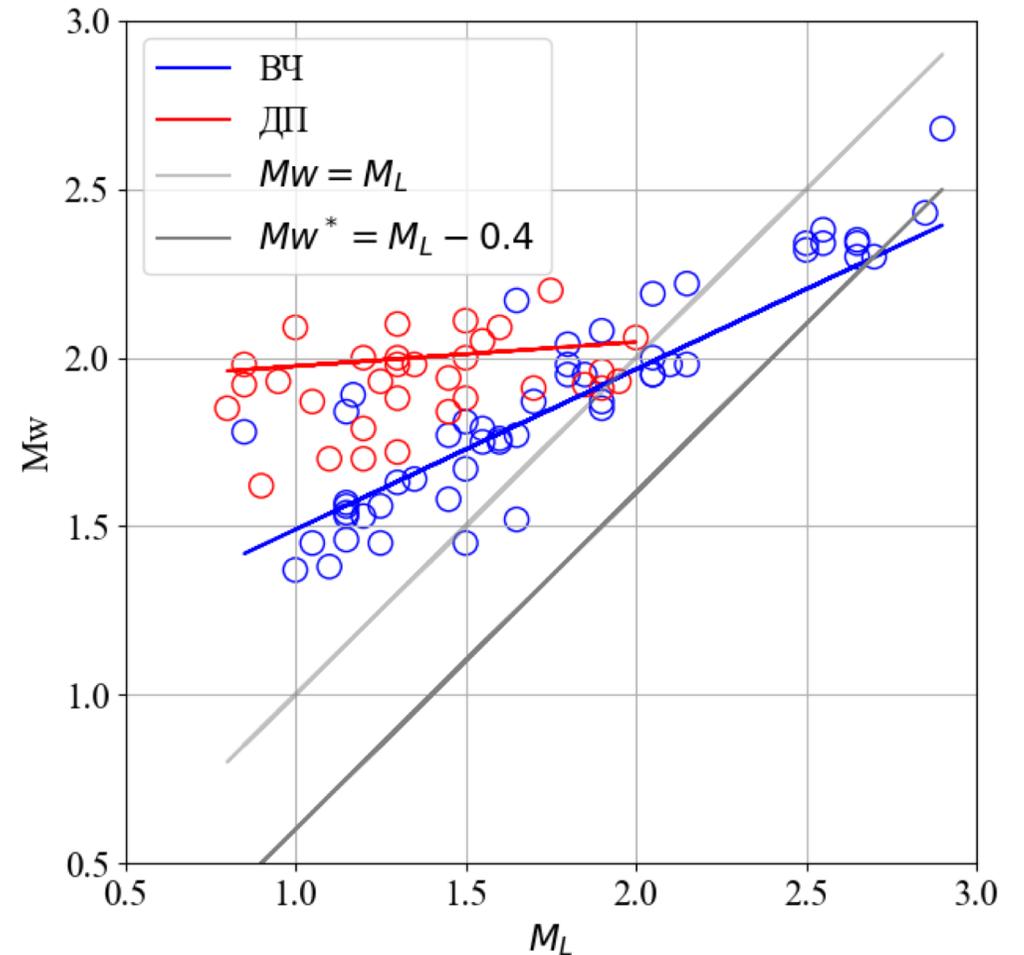
Зависимость полученных моментных магнитуд M_w от локальной магнитуды M_L для высокочастотных (синие) и длиннопериодных (красные) землетрясений

Темно-серая линия — соотношение моментной и региональной магнитуд, полученный по выборке с более сильными тектоническими (субдукционными) землетрясениями магнитудного диапазона $M_w = 3-6$

Изучение связи $M_w - M_L$ для землетрясений КГВ

Полученное соотношение моментной и локальной магнитуд для диапазона $M_w = 1-3$ различается для ВЧ и ДП землетрясений:

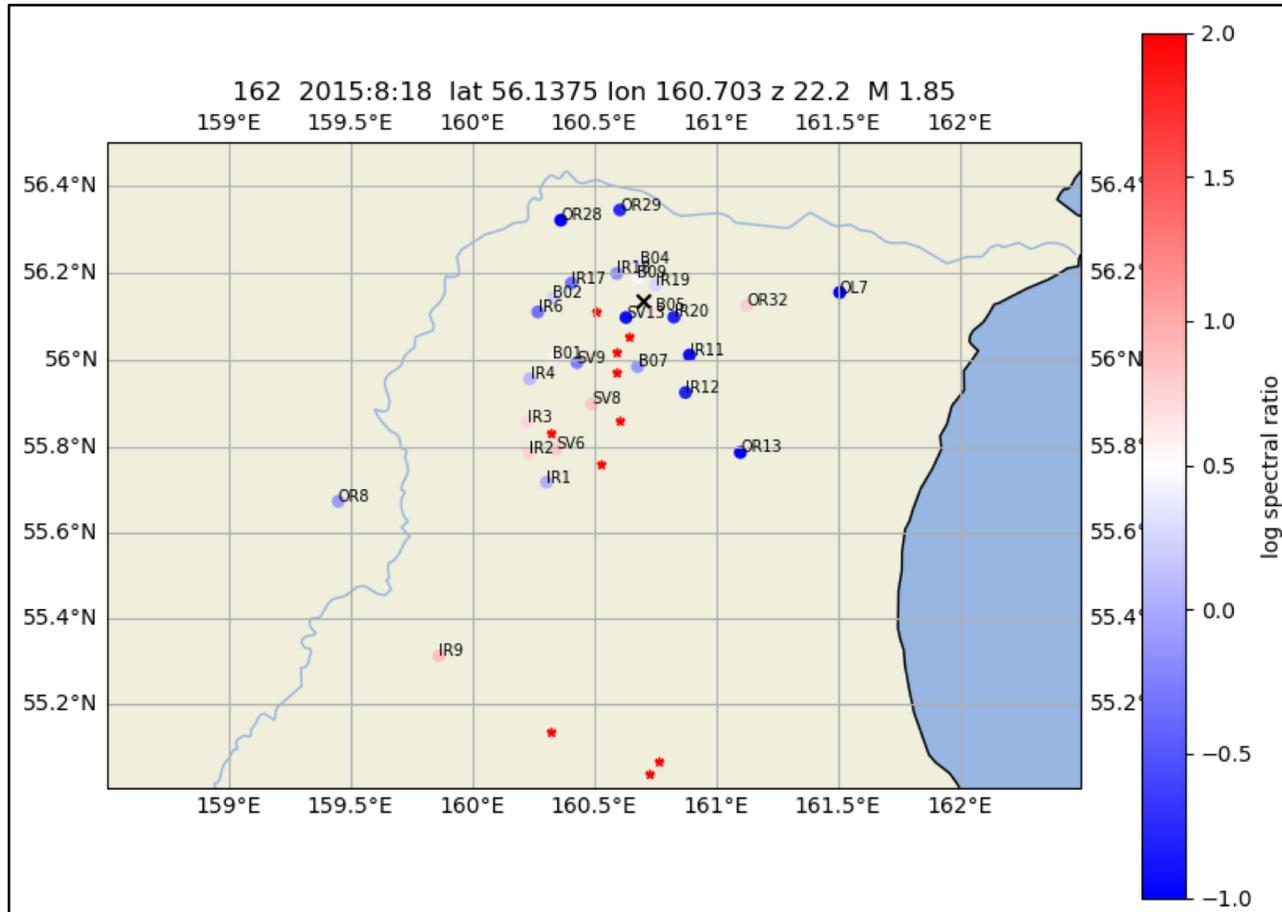
- Для ДП землетрясений расхождение между оценками разных магнитудных шкал оказалось выше, чем для ВЧ
- Полученные моментные магнитуды для ДП слабо зависят от локальной магнитуды, что является предварительным результатом, и может быть объяснено узким интервалом рассматриваемых магнитуд
- Зависимость для диапазона 3–6 не описывает соотношение магнитуд в диапазоне 1–2.5, особенно для ДП землетрясений



Зависимость полученных моментных магнитуд M_w от локальной магнитуды M_L для высокочастотных (синие) и длиннопериодных (красные) землетрясений

Темно-серая линия — соотношение моментной и региональной магнитуд, полученный по выборке с более сильными тектоническими (субдукционными) землетрясениями магнитудного диапазона $M_w = 3-6$

Оценка соотношения спектральных амплитуд между **НИЗКИМИ** и **ВЫСОКИМИ** частотами



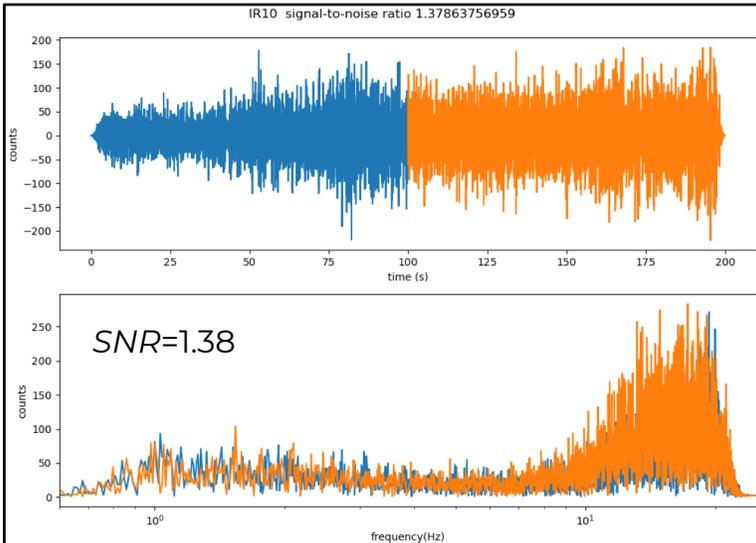
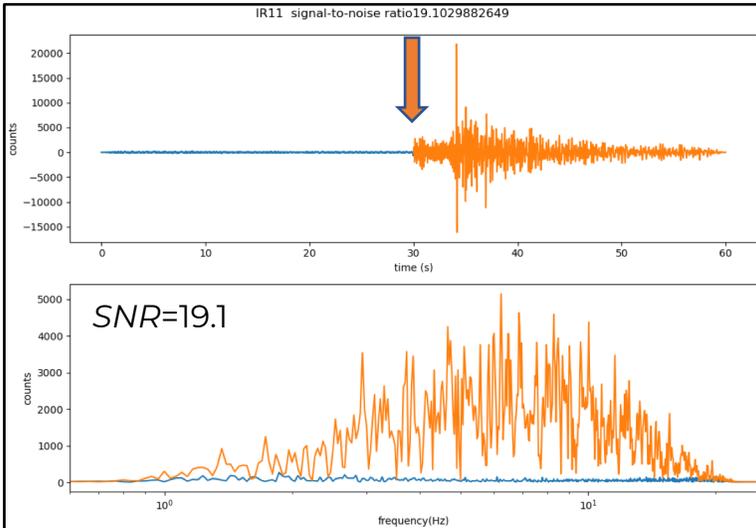
*Карта станций для
высокочастотного
землетрясения*

2015-08-18T02:46:09.030

глубиной 22,2 км и магнитудой 1,9

*Пределы **НИЗКИХ** частот – 1 и 3 Гц,
ВЫСОКИХ – 4 и 11 Гц.*

Стандартная оценка сигнал-шум (SNR)



$$SNR = \frac{\bar{A}_{\text{сигнал}}}{\bar{A}_{\text{шум}}}$$

$\bar{A}_{\text{сигнал}}$ и $\bar{A}_{\text{шум}}$ – средние амплитуды сигнала и шума соответственно

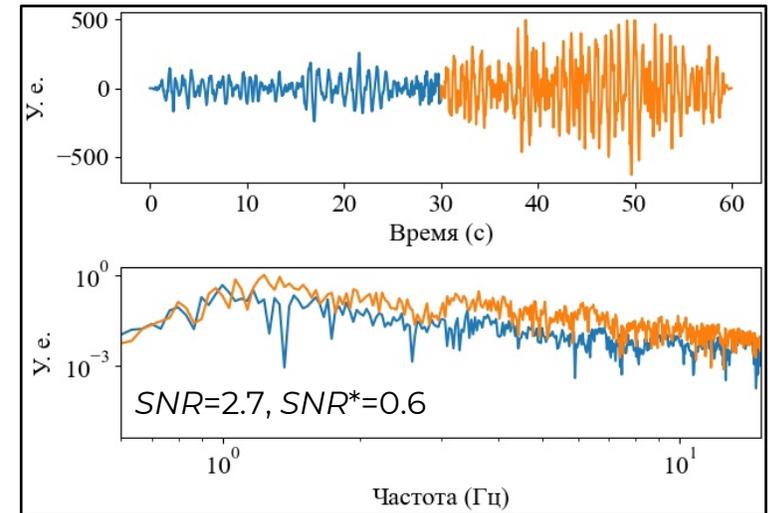
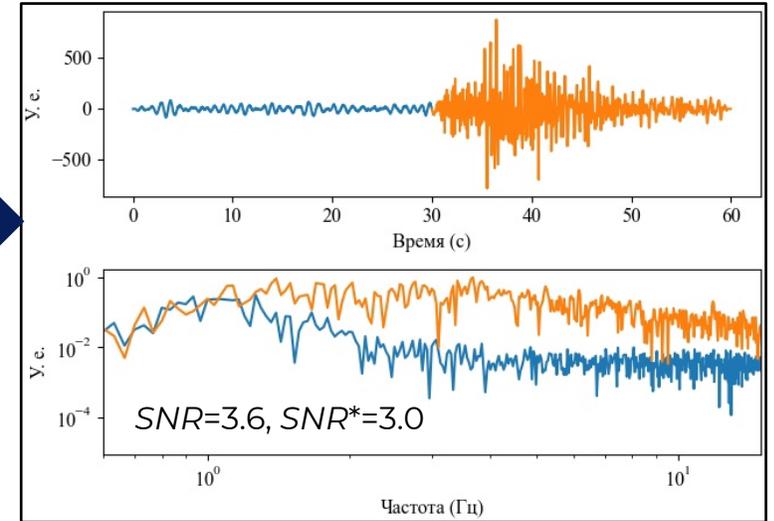
$$SNR^* = \frac{\int \frac{|S(\omega)|_{\text{сигнал}}}{A_{max}}}{\int \frac{|S(\omega)|_{\text{шум}}}{A_{max}}}$$

$|S(\omega)|_{\text{сигнал}}$ и $|S(\omega)|_{\text{шум}}$ – амплитудные спектры Фурье сигнала и шума соответственно
 A_{max} – максимальное значение амплитудного спектра Фурье

Оценка	Количество записей, соответствующих данной оценке, шт.	Количество записей, соответствующих данной оценке, %
$SNR \geq 1.5$	337	6.0
$SNR \geq 2$	171	3.1
$SNR^* \geq 1.5$	196	3.5
$SNR^* \geq 2$	122	2.2
Всего:	5637	100

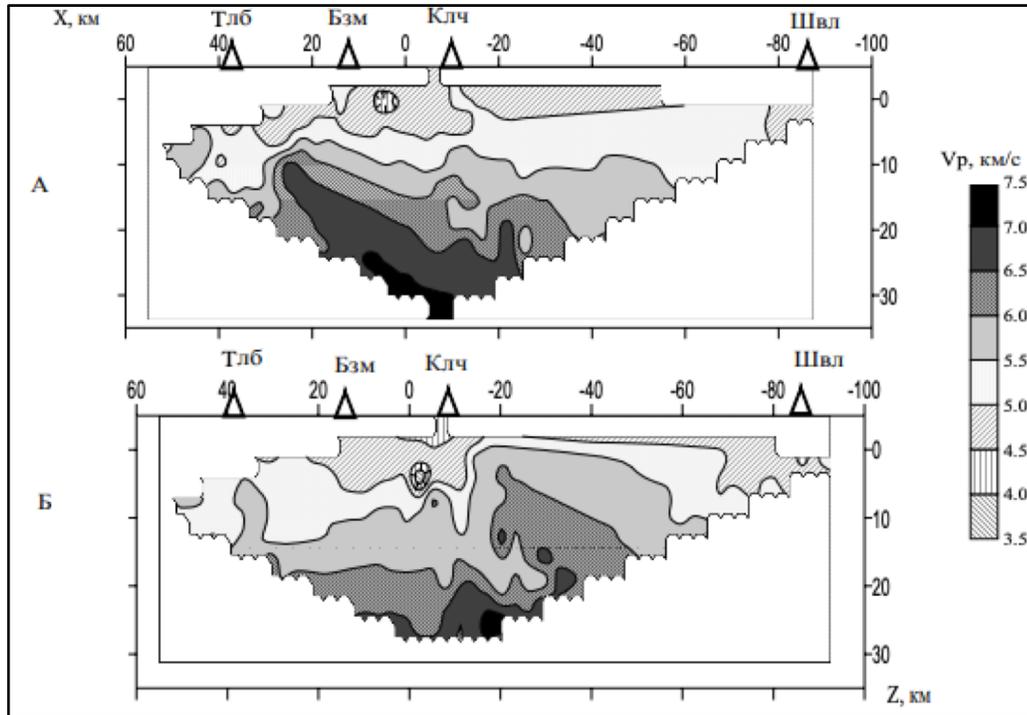
Синий – запись шума,
 оранжевый – запись события.

Оценка соотношения сигнал-шум «по площадям» (SNR^*)



Скоростная модель под КГВ

- В первой половине 2005 года активность вулканов КГВ достигла «красно-оранжевого»
- Во второй половине 2005 года вулканы КГВ не проявляли особую активность («зелено-желтый уровень»)



Изолинии поля скорости продольной волны в плоскости XZ. А – 1 половина 2005 г., Б – 2 половина 2005. Обозначения вулканов: Тлб - Плоский Толбачик, Бзм - Безымянный, Клч - Ключевской, Швл – Шивелуч

Февраль 2005

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Шивелуч	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж
Ключевской	о	о	о	о	о	о	о	о	о	о	о	о	о	о	о	о	о	о	о	о	о	о	о	о	о	о	о	о
Безымянный																												
Толбачик	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з
Кизимен	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з
Карымский																												
Корякский	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з
Авачинский	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з
Мутновский	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з
Горелый	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з
Алаид	з	з	з	з		з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з

Октябрь 2005

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Шивелуч	з	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	
Ключевской	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з		
Безымянный	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з		
Толбачик	з			з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з		
Кизимен	з			з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з		
Карымский	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж	ж		
Корякский	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з		
Авачинский	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з		
Мутновский	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з		
Горелый	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з		
Алаид	з	з	з	з		з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з		