

V Международная конференция
«Триггерные эффекты в геосистемах»

**Исследование процесса развития очага
тектонического землетрясения с применением
метода согласования спектральных фаз**

Епифанский А.Г.

ФИЦ ЕГС РАН

4 - 7 июня 2019 г.

Москва

Описание метода исследования

Метод основан на согласовании спектральных фаз Фурье преобразования очагового импульса на сейсмической записи. Ниже показано как выбирается очаговый импульс и как строится функция согласования.

Но вначале перечислим гипотезы, принятые при построении описываемого метода.

1. Очаговый импульс сейсмического события не изменяет форму на всем протяжении распространения от источника к приемнику.

2. Очаговый импульс каждого сейсмического события уникален, также как и само событие.

3. Спектр очагового импульса может быть описан ограниченным набором частот.

Поскольку амплитуда сигнала сильно зависит от времени распространения сигнала, амплитудная часть спектра игнорируется.

Метод назван “Метод согласования спектральных фаз” (ССФ).

На следующем слайде представлен график первых разностей спектральных фаз в зависимости от частоты деленные на произведение шага по частоте на 2π

Это Уральского событие 4.09.2018 22:58:16.689. Координаты события $\varphi=54.68$; $\lambda=57.83$; $h=10$ км. Приведены кривые для сейсмических фаз P и pP для всех сейсмических станций, записи которых были использованы при анализе события.

Выбор первой разност продиктован тем, что именно в таком виде легко сравнивать значения спектральных фаз на различных частотах. Действительно, если начало сигнала (очагового импульса) не совпадает с началом отрезка записи от которого строится спектр, то согласно теореме о сдвиге, фаза изменяется на величину: $\varphi = 2\pi f\tau$, где f - частота, τ - сдвиг в секундах. Очевидно, среднее значение сдвига по частоте:

$$\tau = \frac{\varphi(f_K) - \varphi(f_1)}{2\pi(f_K - f_1)}$$

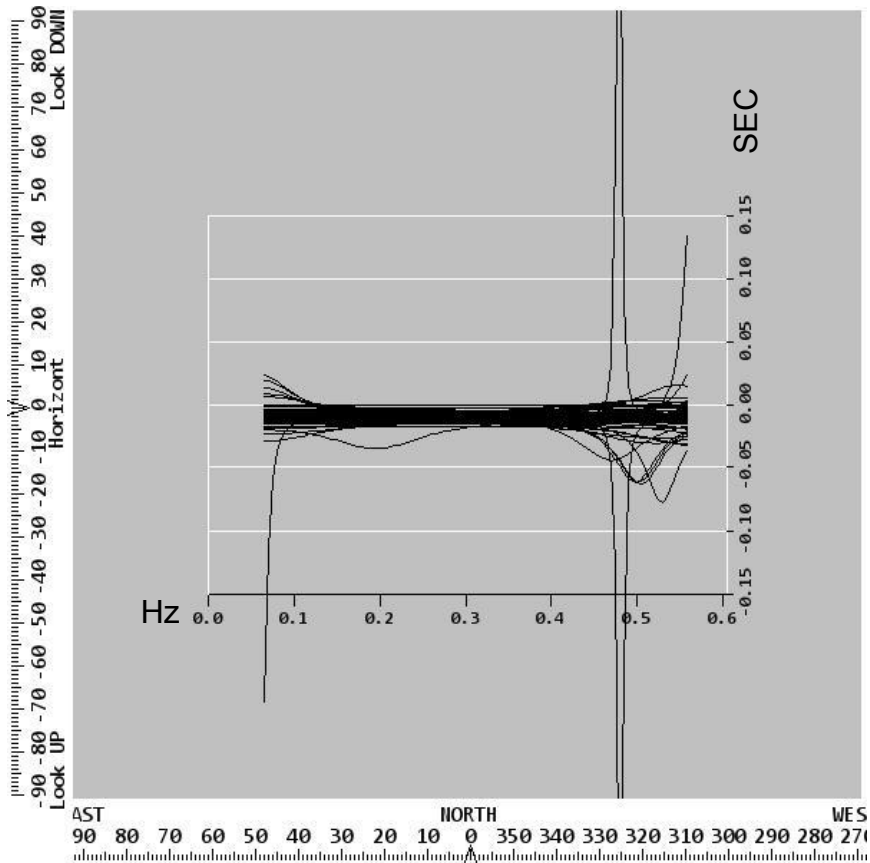


График первых разностей спектральных фаз по частоте деленных на произведение шага по частоте на 2π

Вертикальная ось - секунды. Горизонтальная ось - частота в Гц.

На графике нанесены попарно спектральные фазы для Фурье преобразований записей сейсмических фаз Р и рР.

Отклонения от горизонтальной линии указывает на тот факт, что данные относятся к другому событию.

Графики построены в интервале частот, где функция согласования максимальна.

Функция согласования спектральных фаз рассчитывается по следующей формуле:

$$\Phi = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left(\frac{\sum_{m=1}^M e^{i\varphi_m(f_k)} w_m}{\sum_{m=1}^M w_m} \right)^2, \quad (1)$$

где $k = (1, \dots, K)$ - индекс, определяющий набор частотного окна, в котором происходит сравнение фазовых спектров,

w_m - весовая функция, знак которой учитывает сдвиг фазы при отражении от свободной поверхности: отрицательное значение для сейсмической фазы pP.

Индекс $m = (1, \dots, M)$ обозначает номер трассы, причем считается что для каждой сейсмической фазы (P или pP например) трасса своя.

Возведение в квадрат означает квадрат модуля комплексного значения в круглых скобках.

Результаты обработки реальных событий методом ССФ

Далее приведены диаграммы, построенные для нескольких сейсмических событий. Диаграмму представляют собой двумерную функцию согласования двух координат: относительно времени и пространственной координаты. В качестве пространственных координат выбраны:

1. Глубина (Z);
2. Направление юг - север (Lat);
3. Направление запад - восток (Lon).

Относительное время есть разность абсолютного времени в очаге, полученного при локации сейсмического события, и абсолютного времени в очаге, полученного по метода ССФ.

Следует отметить что диаграммы демонстрируют не распределение отдельных событий, а ***“пространственно-временное” распределение регистрируемой активности излучения сейсмической энергии.***

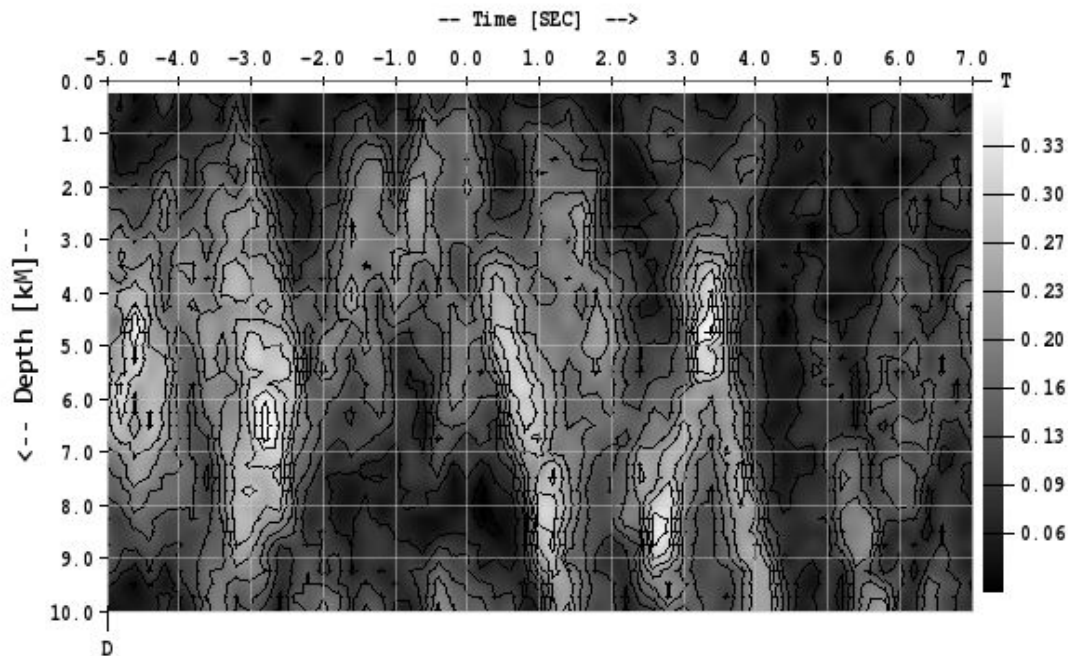
Исходные данные

В качестве исходных данных выбраны четыре сейсмические события:

1. Событие в районе Уральских гор: 04:09:2018 г. 22:58:19.451
 $\varphi = 54.69$ $\lambda = 57.83$, $M_b = 5.4$; глубины - верхняя треть коры;
2. Афтершок Чуйского (Алтай) землетрясения 27 сентября 2003 года:
15:31:27.782 $\varphi = 50.06$ $\lambda = 87.83$, $M_s = 4.4$; глубины - вся кора;
3. Афтершок Чуйского (Алтай) землетрясения 27 сентября 2003 года: 18:52:50.787
 $\varphi = 50.09$ $\lambda = 87.76$, $M_s = 6.6$; глубины - вся кора;
4. Район Гиндукуш (Афганистан) глубокое землетрясение 28 октября 2017: 17:45:34.858
 $\varphi = 36.15$ $\lambda = 70.74$, $M_b = 5.6$; глубины 160 - 280 км.

Уральское событие 4.09.2018 22:58:16

диаграмма сейсмической активности (T x Z)

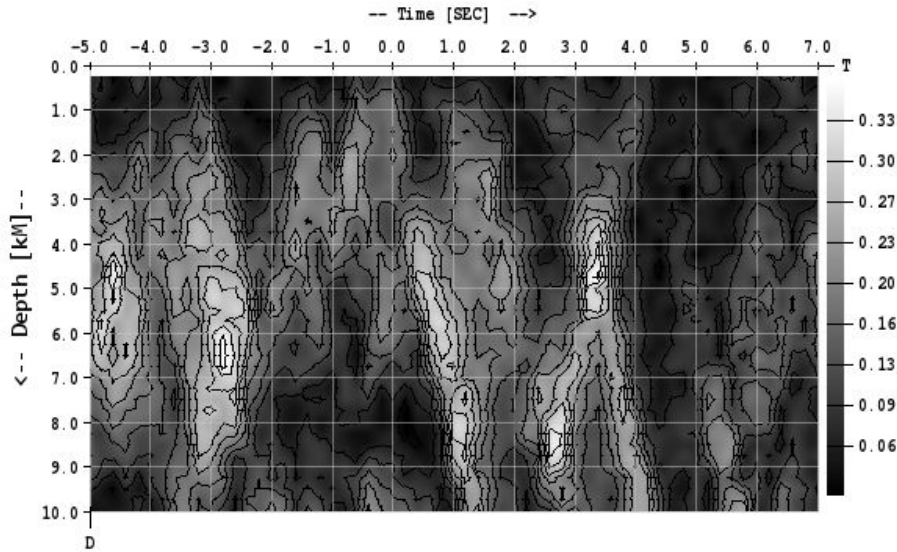


"P -pP" $f=(0.0008-0.69)$ $W=0.60$

20 отсчетов/сек.

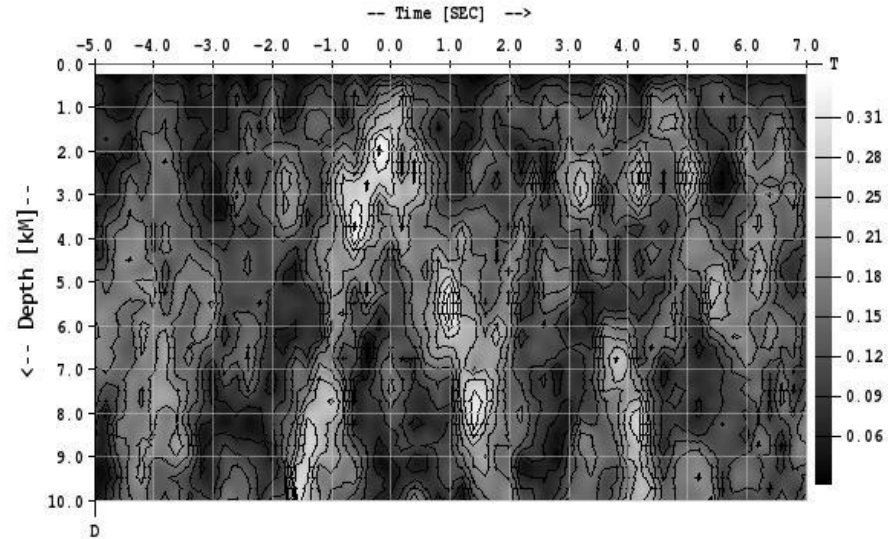
Уральское событие 4.09.2018 22:58:16

диаграммы сейсмической активности (T x Z)



"P -pP" $f=(0.0008-0.69)$ $W=0.60$

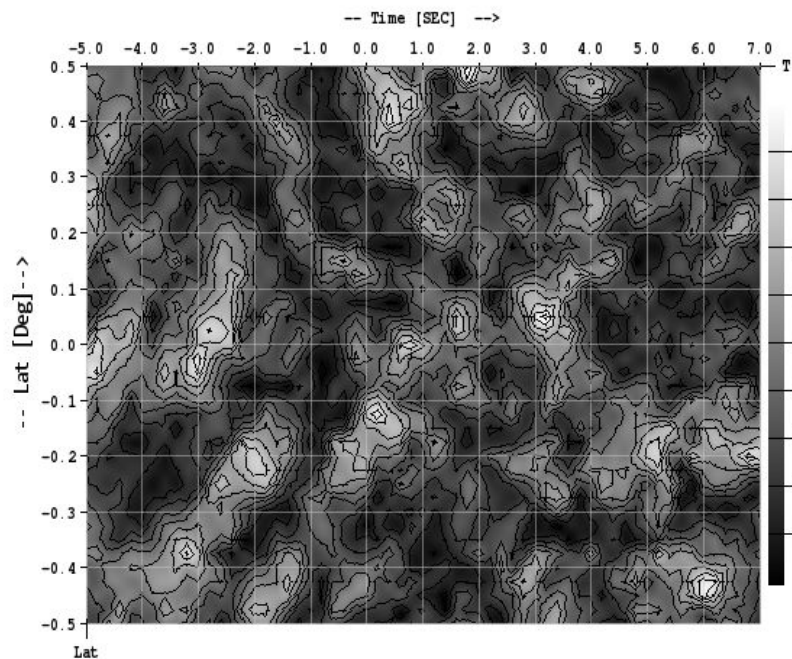
20 отсчетов/сек.



"P -pP" $f=(0.0322-0.57)$ $W=0.60$

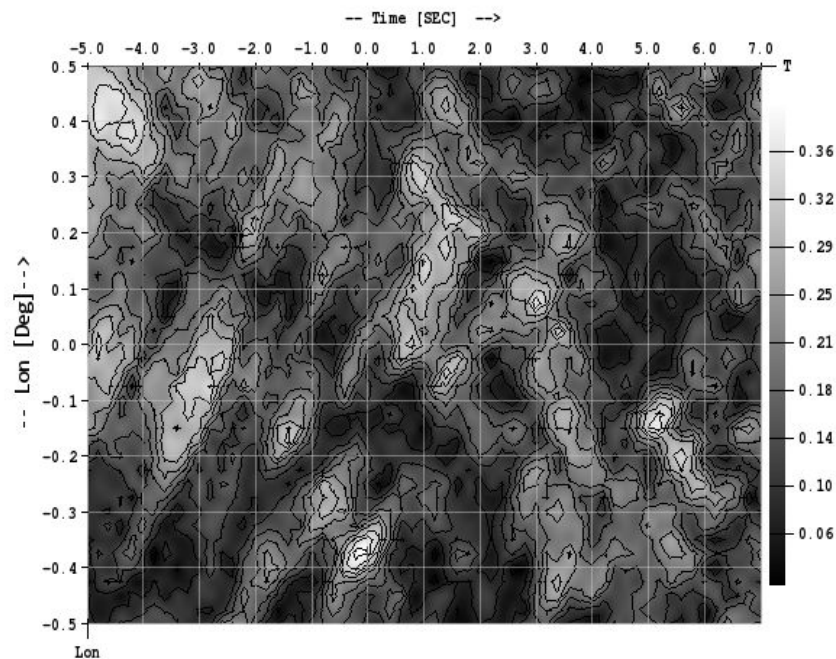
40 отсчетов/сек.

Уральское событие 4.09.2018 22:58:16
диаграммы сейсмической активности (20 отсчетов)



"P -pP" $f=(0.0007-0.72)$ $W=0.60$

(T x Lat)

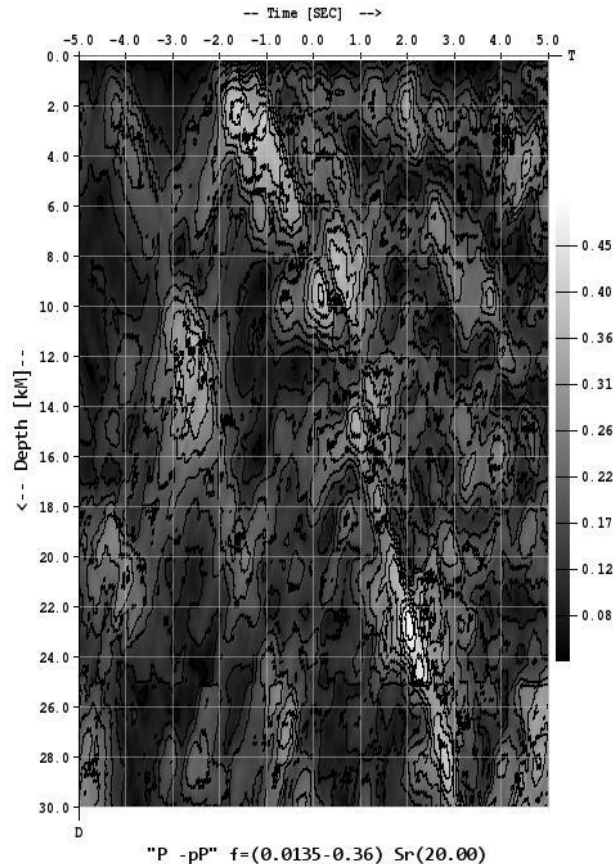


$f=(0.0062-0.64)$ $L=1.55$ $W=0.60$

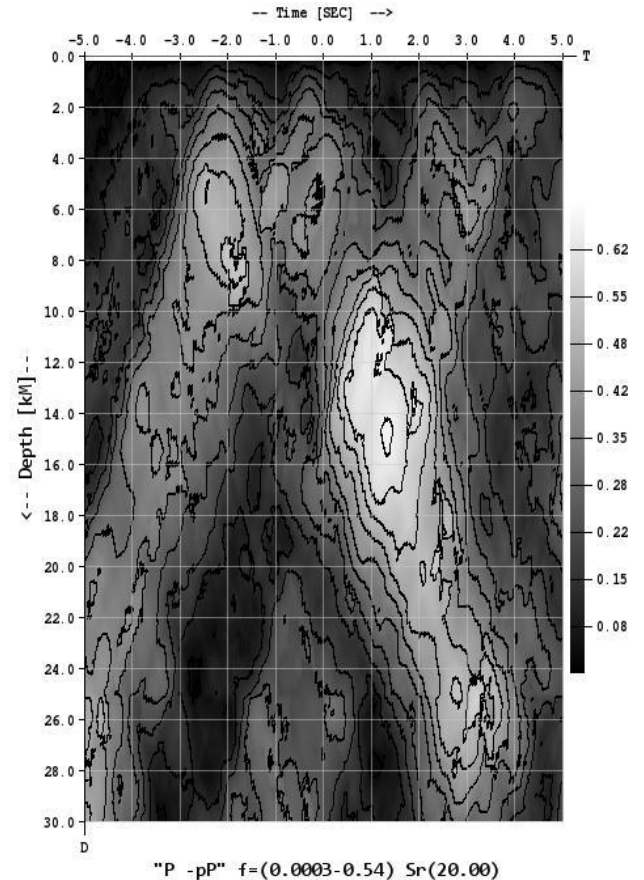
(T x Lon)

Чуйское землетрясение сентября 2003 г.

Афтершок: 27.09.2003 15:31:26 (T x Z)



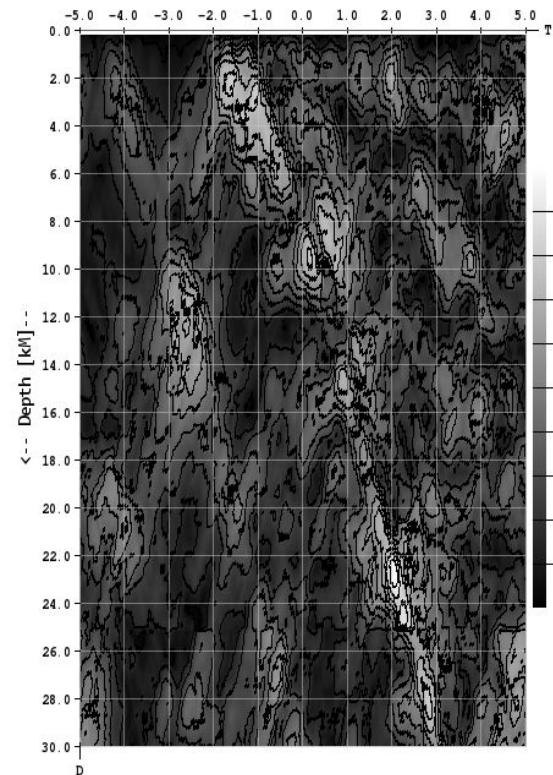
Афтершок: 27.09.2003 18:52:50, (T x Z)



Афтершок: 27.09.2003 15:31:26

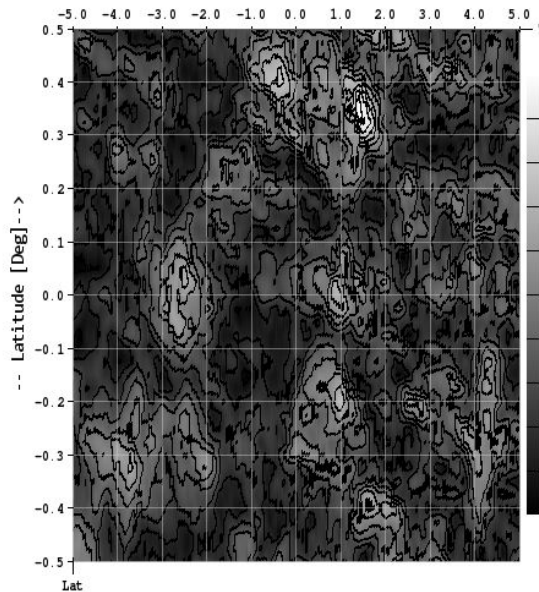
(T x Z)

-- Time [SEC] -->



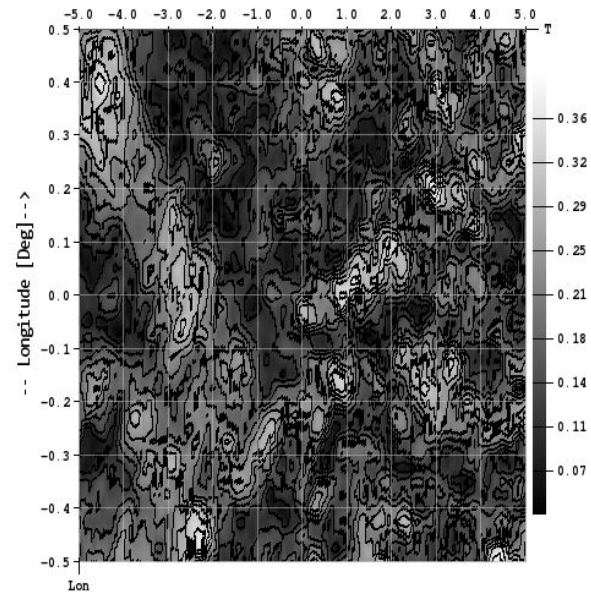
"P -pP" f=(0.0135-0.36) Sr(20.00)

-- Time [SEC]-->



"P -pP" f=(0.0082-0.44) Sr(20.00)

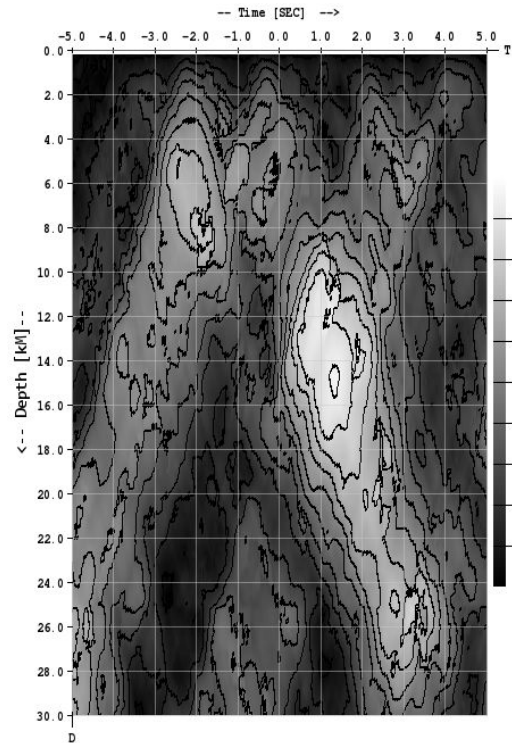
-- Time [SEC]-->



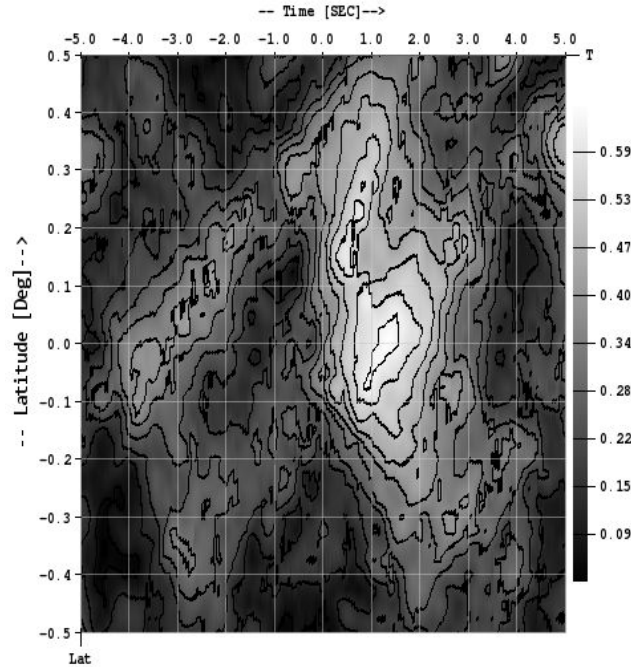
"P -pP" f=(0.0414-0.36) Sr(20.00)

Афтершок: 27.09.2003 18:52:50

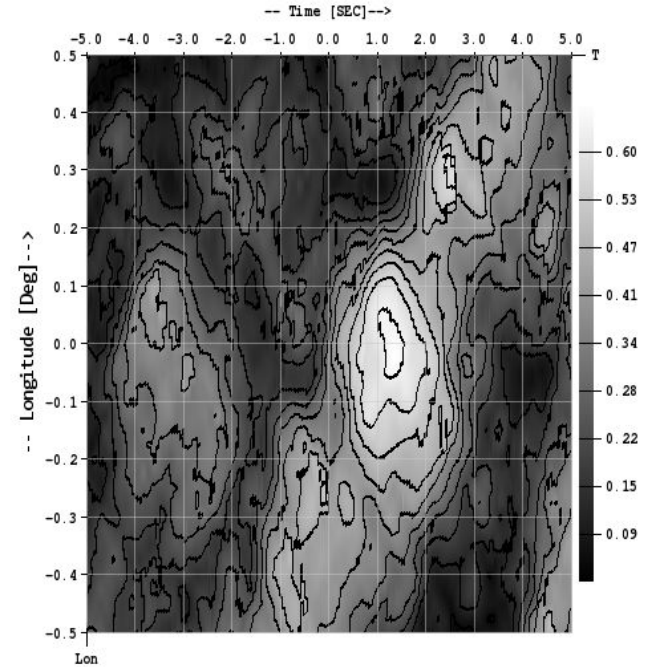
(T x Z)



"P -pP" f=(0.0003-0.54) Sr(20.00)

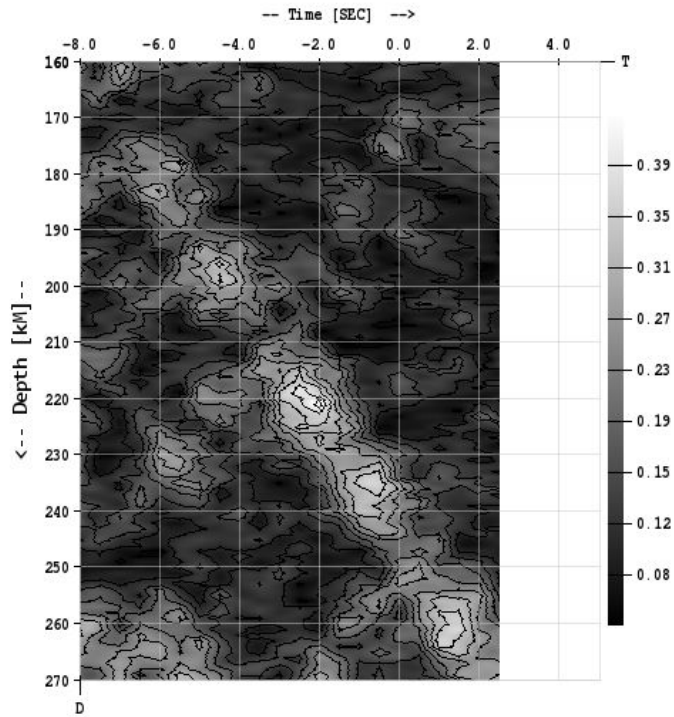


"P -pP" f=(0.0003-0.54) L=1.83



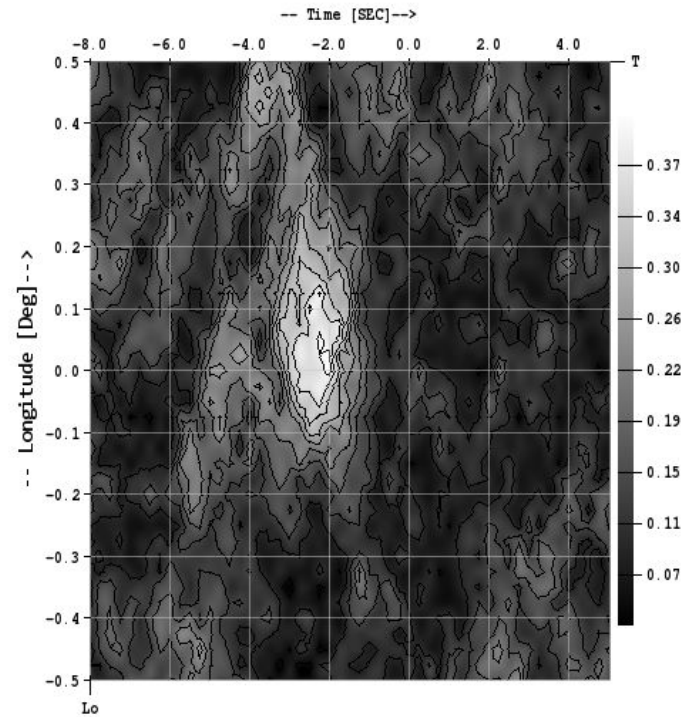
"P -pP" f=(0.0082-0.44) L=2.25

Район Гиндукуш (Афганистан) - глубокое землетрясение 28.10.2017



$f=(0.0713-1.42)$ $L=0.67$ $W=0.70$

(T x Z)

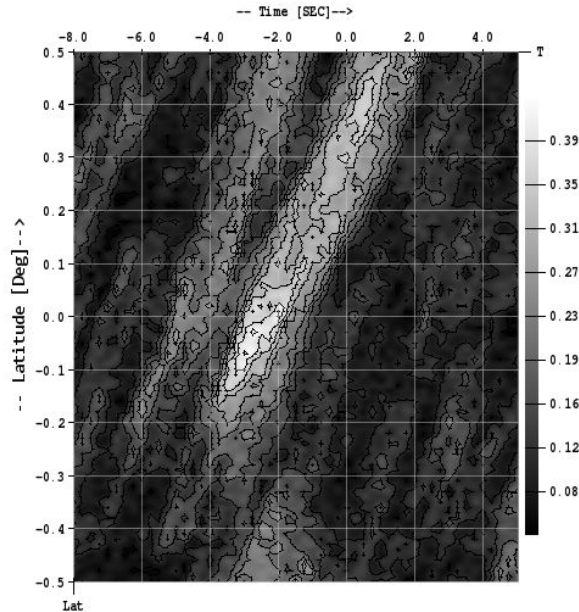


$f=(0.0022-1.51)$ $L=0.66$ $W=0.70$

H = 220; (T x Lon)

Район Гиндукуш (продолжение)

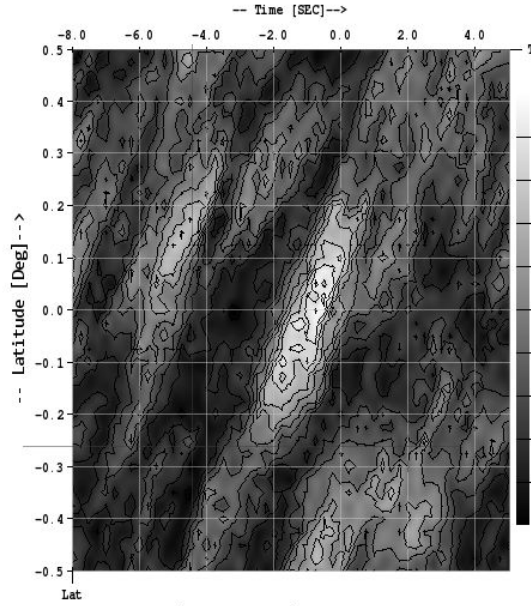
Depth = 220 km



f=(0.0084-1.51) L=0.66 W=0.70

(T x Lat)

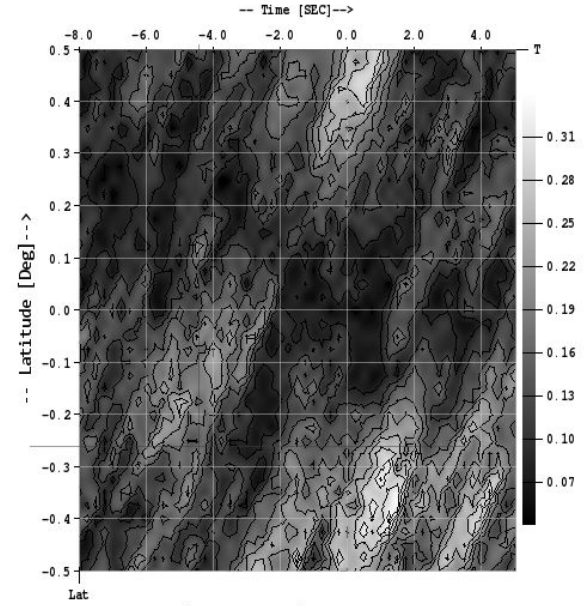
Depth = 235 km



f=(0.0198-1.55) L=0.64 W=0.70

(T x Lat)

Depth = 207 km



f=(0.0288-1.49) L=0.66 W=0.70

(T x Lat)

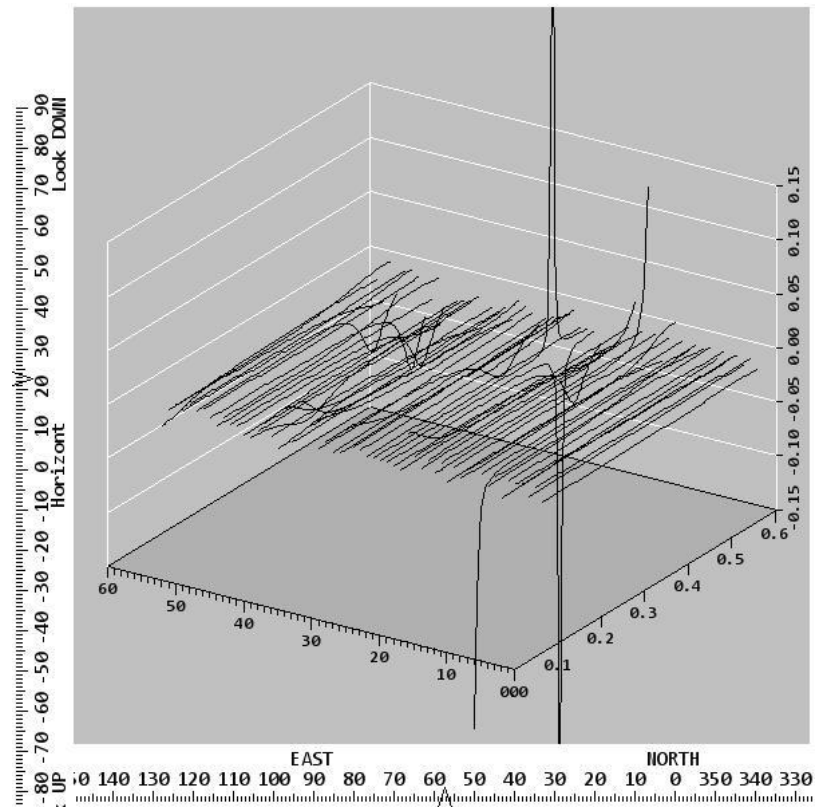
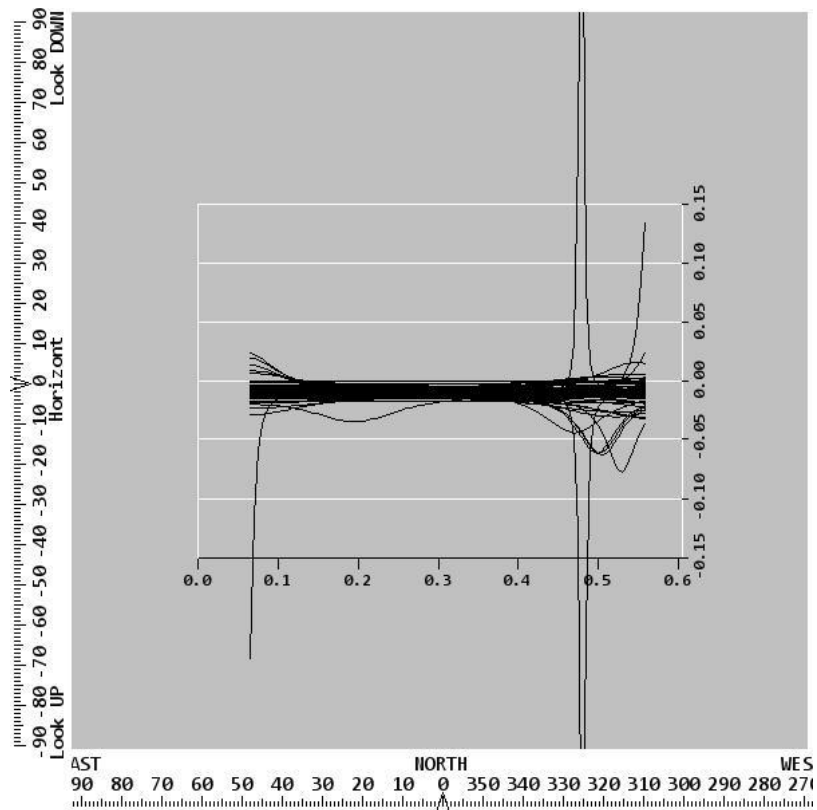
Относительная энергия сейсмических событий - оценка в методе ССФ

Метод ССФ построен на анализе согласования спектральных фаз для всех имеющихся записей заданных сейсмических фаз. В начале показан график первых разностей спектральных фаз для использовавшихся в исследовании сейсмических фаз Р и рР для всех доступных станций и приведены соответствующие объяснения.

На следующем слайде повторен этот график, а также для наглядности, график развернут в трехмерной проекции.

Основное, на что следует обратить внимание - диапазон постоянства первых разностей, что указывает на один источник - один очаг.

График первых разностей спектральных фаз



Построение величины для оценки выделенной энергии сейсмического события.

Из графиков видно, что близки к постоянным значения разностей находятся в определенном диапазоне частот. Это указывает на то, что в этом окне фиксируется очаговый импульс.

В некотором смысле, это противоречит общепринятому взгляду, что для спектра очагового импульса ограничение снизу по частоте отсутствует [Костров 1975 г.].

Наличие ограничения снизу связано с ограничением на длительность очагового импульса.

Таким образом, мы имеем две частоты из которых можем “сконструировать” величину, указывающую на энергетическую характеристику источника.

В качестве такой характеристики была выбрана величина $T = 1/(f_L + f_H)$ Величина имеет размерность секунды.

Сравнение оценочных величин для всех четырех рассмотренных сейсмических событий

	Магнитуда	f_L	f_H	$\langle T \rangle$
1	Mb = 5.4	0.0008	0.69	0.6
2	Ms = 4.4	0.0002 - 0.0615	0.34 - 0.49	2.25
3	Ms = 6.6	0.0003 - 0.0082	0.44 - 0.54	2.04
4	Mb = 5.6	0.0200	1.54	0.66

Заключение

1. Наблюдения показали не просто сложный характер очага тектонического землетрясения, но и то, что это непрерывно развивающийся во времени процесс, где отдельные сейсмические события появляются на фоне тихого скольжения.
2. В таком сложном процессе существует весь спектр событий. Распределение этих событий по энергии, по видимому, определяется законом повторяемости Гутенберга-Рихтера.
3. В зоне очага происходит не только разрушение горной породы, но и непрерывное передвижение ее. Что создает “течение горных масс”, о котором говорил Ю.В. Ризниченко в 1965 г.
4. Для исследования явлений, протекающих в районе очага, следует привлекать не только телесеismicкие станции, но и региональные и локальные сети с повышенной частотой квантования для получения более полной и детальной картины.