

**ОБ УЧЕТЕ ГЛУБИНЫ ГИПОЦЕНТРА
ПРИ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКЕ МАГНИТУДЫ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВОЙ
ШКАЛЫ $M_s(20R)$**

О.С. Чубарова ¹, А.А. Гусев ^{1,2}

1. Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

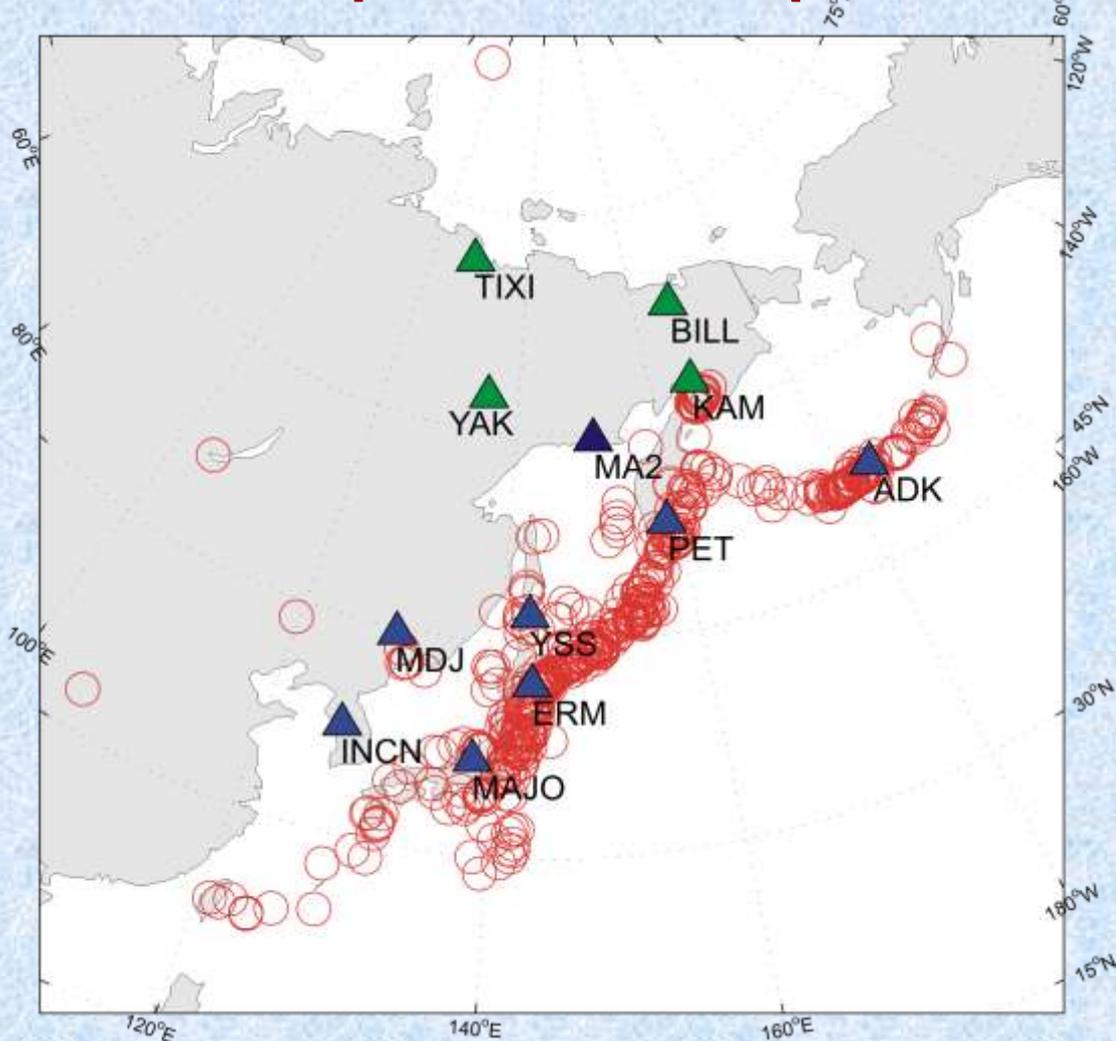
2. Камчатский филиал Геофизической службы РАН

Шкала магнитуд $M_s(20R)$ разработана как модификация известных магнитудных шкал $M_s(20)$ и $M_s(BB)$ для сравнительной оценки мощи очагов землетрясений.

Телесеismicкая магнитуда $M_s(20)$, основанная на классической магнитуде M_s Б. Гутенберга [*Gutenberg, 1945*], определена для периодов волн 18-22 с и эпицентральных расстояний $20^\circ \leq \Delta \leq 160^\circ$. Недостатком является невозможность получать оценки $M_s(20)$ на региональных расстояниях. Широкополосная магнитуда $M_s(BB)$ [*Ванек и др., 1962*] определена в широком диапазоне эпицентральных расстояний $2^\circ \leq \Delta \leq 160^\circ$, но не имеет четкой спектральной привязки и поэтому не вполне удобна для таких важных приложений, как оценка потенциала разрушительных волн цунами или анализ сильных движений грунта.

Новая региональная магнитудная шкала $M_s(20R)$ использует амплитуды записи группы поперечных и поверхностных волн в узком диапазоне периодов (вблизи периода $T=20$ с). Шкала $M_s(20R)$ позволяет делать оперативные оценки магнитуды, тесно связанные со значением спектра сейсмического момента на частоте $1/T=0.05$ Гц.

Карта эпицентров землетрясений 1993-2009 гг. Северо-Западной части Тихоокеанского региона и цифровых сейсмических станций, использованных для построения калибровочной кривой.



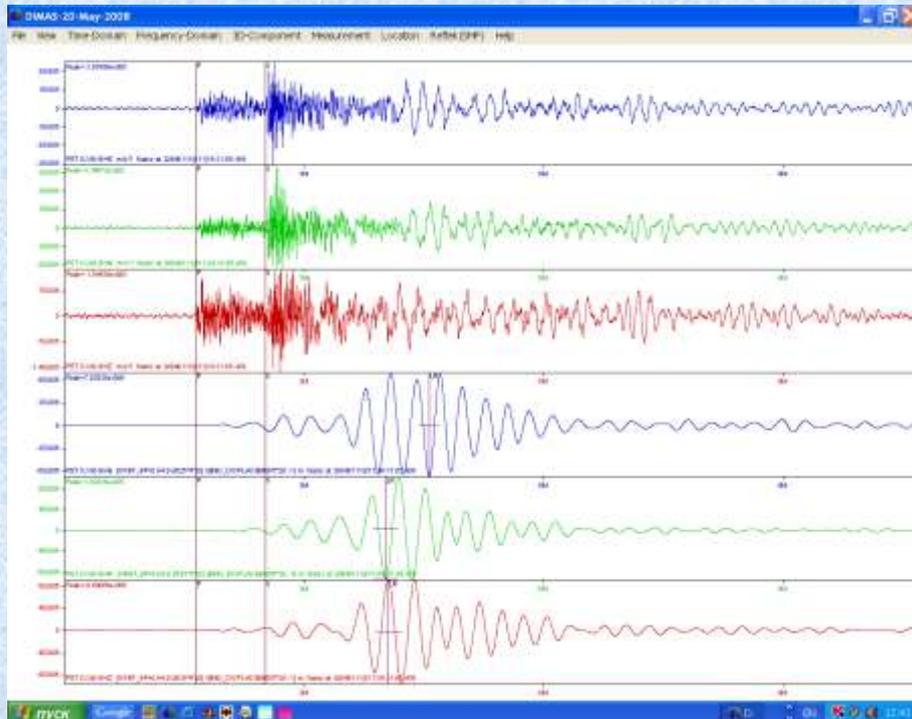
12 сейсмических станций
433 землетрясения
(1659 трехкомпонентных записей на каналах ВН)
 $\Delta = 0.7^\circ - 40^\circ$ (~80 – 4500 км)
 $M_S = 4.0 - 8.2$ (NEIC)
 $H \leq 70$ км

- - эпицентр землетрясения
- Сейсмические станции:
 - ▲ - “островодужные”
 - ▲ - “континентальные”

Для обработки исходной записи применялась программа Д.В. Дрозина DIMAS в три шага:

1. **Удаление нулевой линии**
2. **Полосовая фильтрация** фильтром Баттерворта 4 порядка, частоты среза фильтров 0.04 Гц и 0.0625 Гц (16-25 с). Фильтр односторонний, с фазовым сдвигом и запаздыванием моментов прихода максимальных амплитуд.
3. **Эмуляция «истинного» смещения грунта** при установке в обратном фильтре безразмерного отношения «уровня воды» на 20 Дб.

На трассе каждой компоненты измерялась «двойная амплитуда» в пределах временного окна между вступлением S-волны t_S и моментом t_S+10 минут.



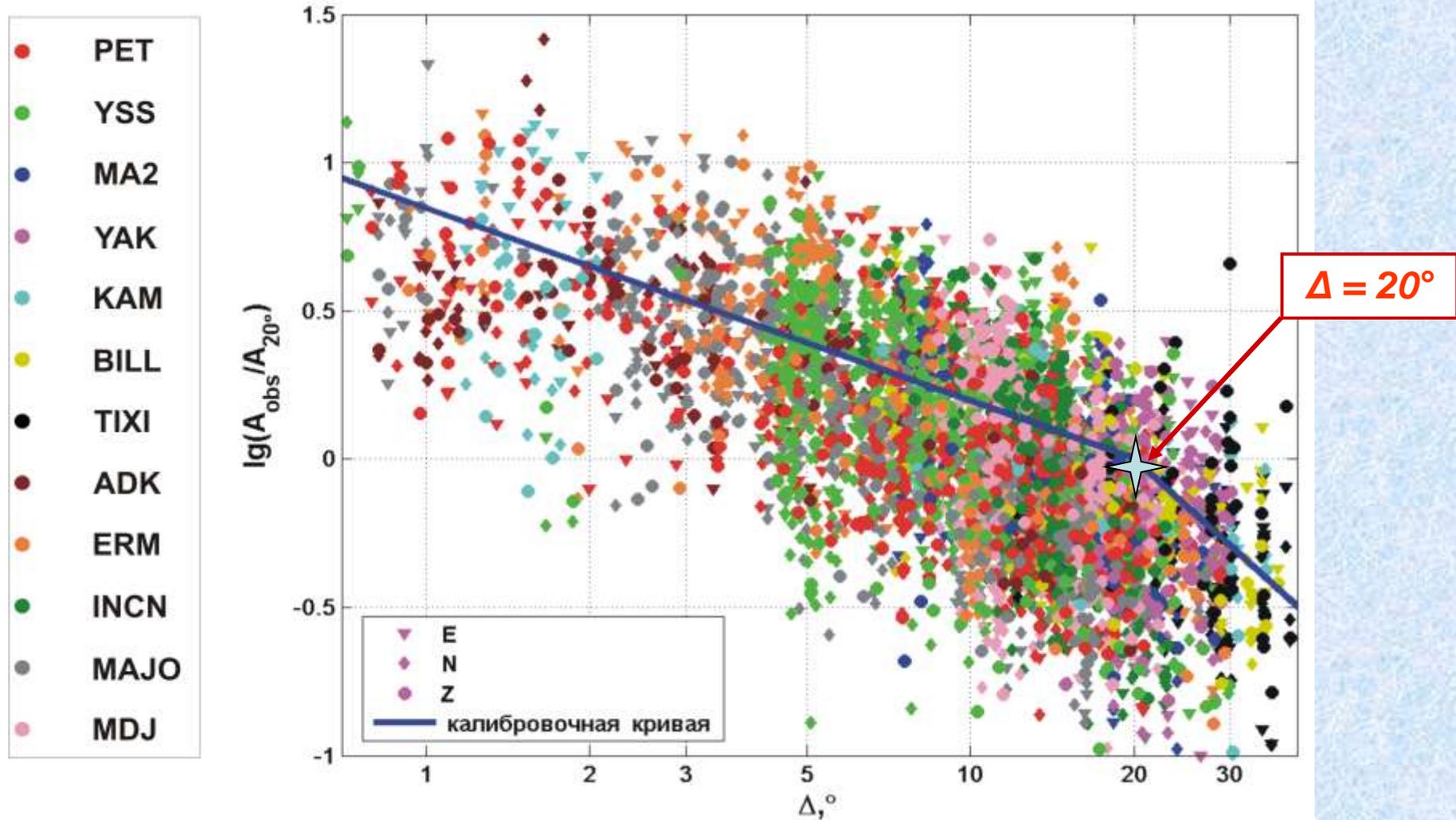
Обмеренная амплитуда приводится к единичной при $\Delta = 20^\circ$.

Для приведения использованы нормирующие амплитуды, как значения ожидаемой амплитуды от данного землетрясения на эпицентральной расстоянии $\Delta=20^\circ$.

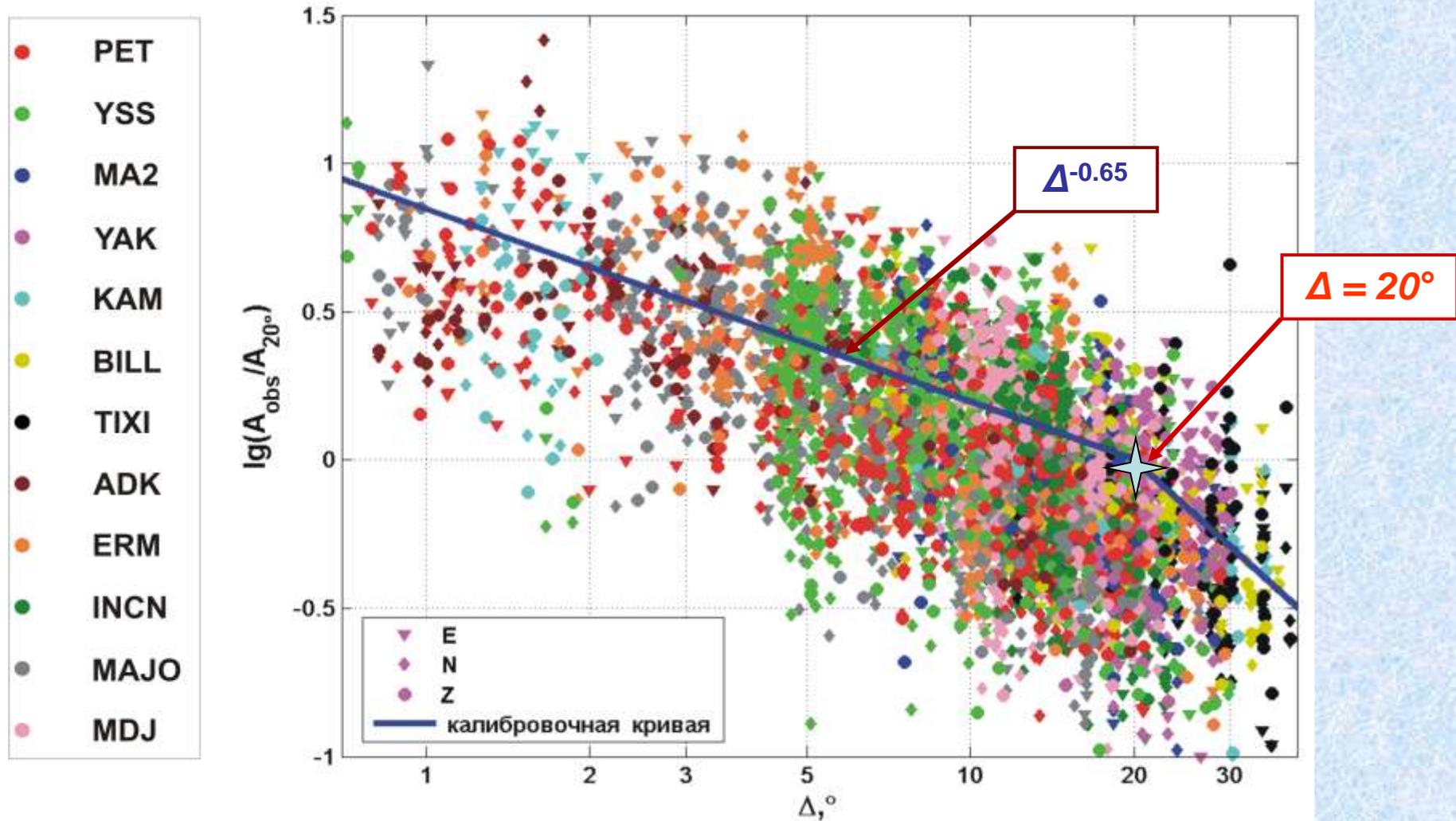
$$A_{\text{норм}} = T_{\text{норм}} * 10^{(M_S - 3.3 - 1.66 \lg(20))},$$

где $T_{\text{норм}} = 20$ с и M_S - значение по каталогу USGS. Для приведенной амплитуды имеем:

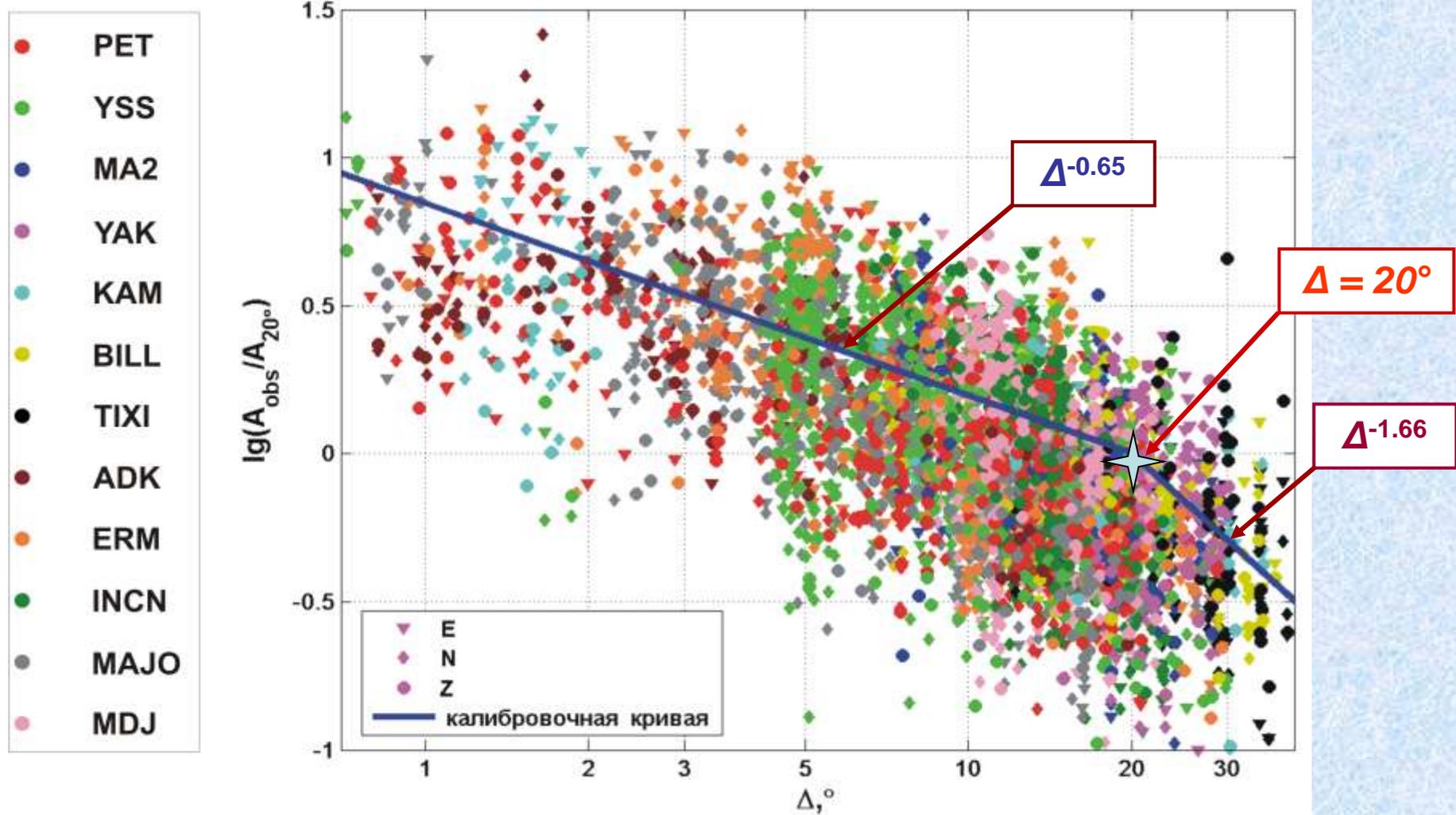
$$\lg A_{\text{прив}} = \lg(A_{\text{набл}} / A_{\text{норм}});$$



Зависимость приведенных максимальных амплитуд смещения (A_{obs}/A_{20°) от эпицентрального расстояния Δ для всех трех компонент записей. Ломаная линия: сегмент $\Delta = 0.7^\circ - 20^\circ$ - первый вариант калибровочной кривой со спадом амплитуд при как $\Delta^{-0.65}$. Сегмент калибровочной кривой при $\Delta > 20^\circ$ - это стандартный спад амплитуд при $\Delta > 20^\circ$ как $\Delta^{-1.66}$ по Гутенбергу-Соловьеву.

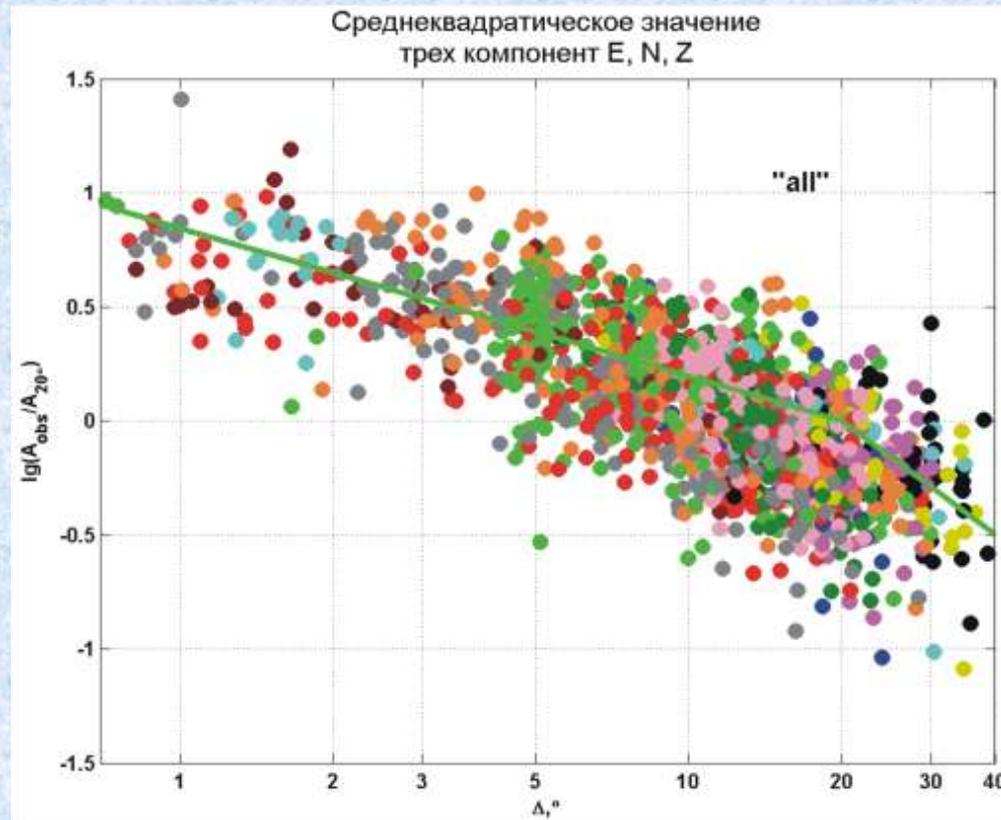


Зависимость приведенных максимальных амплитуд смещения (A_{obs}/A_{20°) от эпицентрального расстояния Δ для всех трех компонент записей. Ломаная линия: сегмент $\Delta = 0.7^\circ - 20^\circ$ - первый вариант калибровочной кривой со спадом амплитуд при как $\Delta^{-0.65}$. Сегмент калибровочной кривой при $\Delta > 20^\circ$ - это стандартный спад амплитуд при $\Delta > 20^\circ$ как $\Delta^{-1.66}$ по Гутенбергу-Соловьеву.



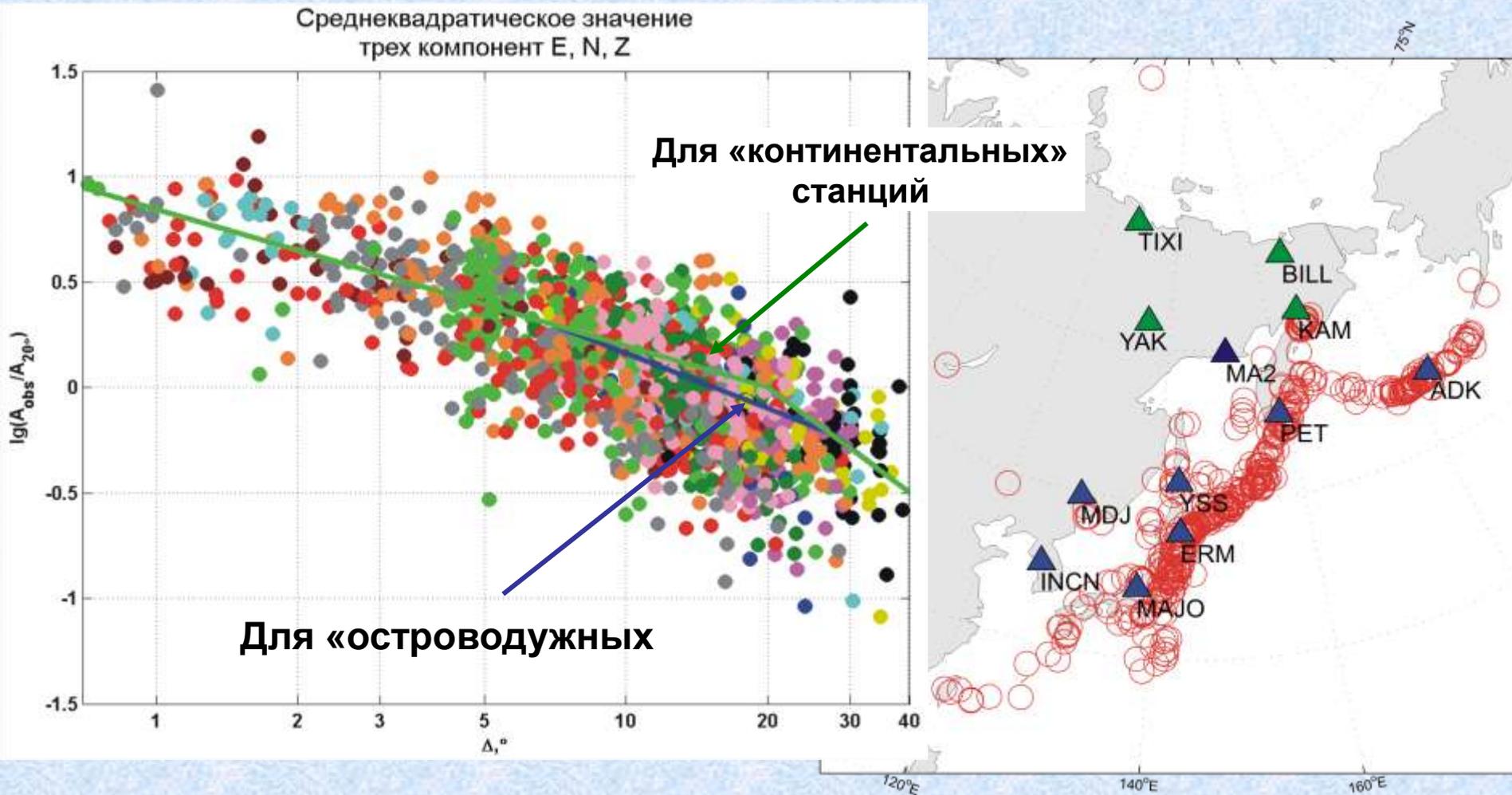
Зависимость приведенных максимальных амплитуд смещения ($A_{\text{obs}}/A_{20^\circ}$) от эпицентрального расстояния Δ для всех трех компонент записей. Ломаная линия: сегмент $\Delta = 0.7^\circ - 20^\circ$ - первый вариант калибровочной кривой со спадом амплитуд при как $\Delta^{-0.65}$. Сегмент калибровочной кривой при $\Delta > 20^\circ$ - это стандартный спад амплитуд при $\Delta > 20^\circ$ как $\Delta^{-1.66}$ по Гутенбергу-Соловьеву.

ОСРЕДНЕННЫЕ ДАННЫЕ И КАЛИБРОВОЧНЫЕ КРИВЫЕ

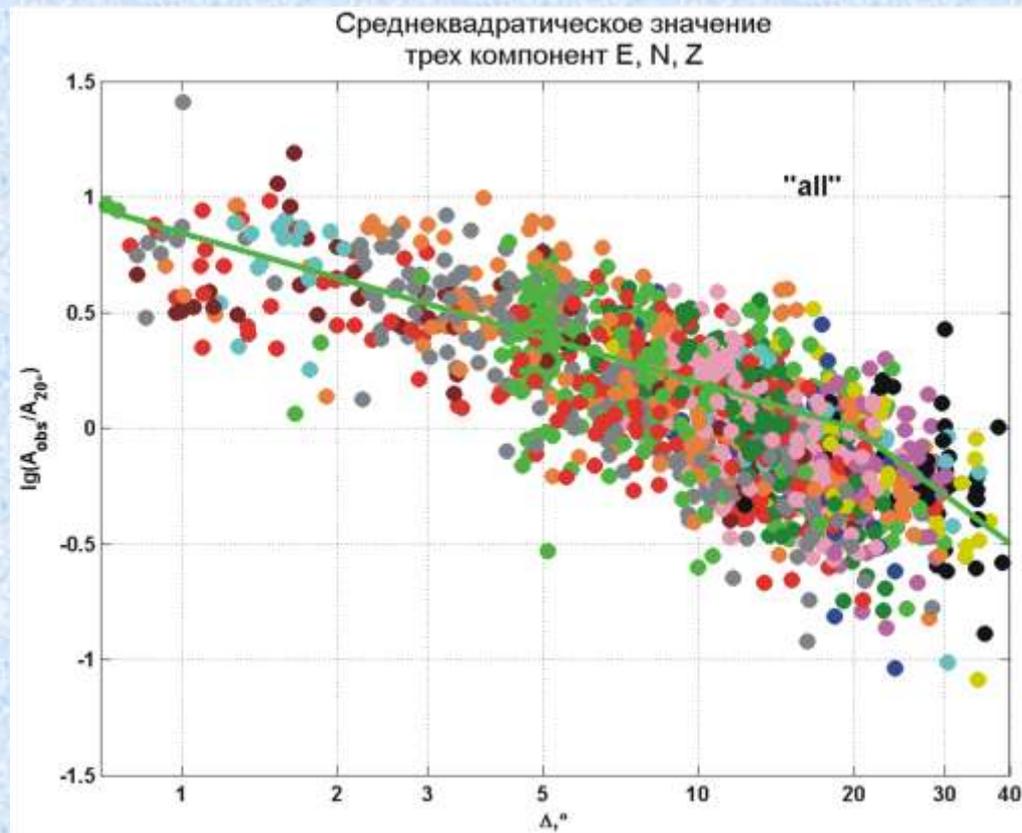


Для оценки качества аппроксимации тренда амплитуд с расстоянием были рассмотрены невязки стационарных оценок магнитуды от расстояния. В результате, стационарные магнитуды рассчитывались на основании среднеквадратического значения приведенных максимальных амплитуд трех компонент (максимумы измерялись в независимые моменты времени).

ОСРЕДНЕННЫЕ ДАННЫЕ И КАЛИБРОВОЧНЫЕ КРИВЫЕ



После опробования первоначального варианта магнитудной шкалы на данных отдельных сейсмостанций, выявились региональные особенности затухания сейсмических волн с расстоянием. Все станции региона удалось разделить на две большие, географически выделенные группы, "континентальные" и "островодужные".



Шкала $M_s(20R)$ разрабатывалась для региональных эпицентральных расстояний до $\Delta = 20^\circ$ (~2200 км). Обнаружилось, что в изучаемом регионе использование для эпицентральных расстояний $\Delta > 20^\circ$ стандартной телесеismicической калибровочной кривой ведет к заметным ошибкам. Для того, чтобы снизить такие ошибки, шкала $M_s(20R)$ продлена до расстояния 4500 км. Ее использование для изученного региона в интервале 2200-4500 км может быть рекомендовано как уточнение стандартной шкалы $M_s(20)$.

Расчетные формулы для определения магнитуды $M_S(20R)$ – калибровочные кривые

Магнитуда $M_S(20R)$ определяется как:

$$M_S(20R) = \lg(A/T) + \sigma(\Delta) \equiv \lg(A/T) - S(\Delta) + 5.460,$$

где $\sigma(\Delta)$ – калибровочная функция в традиционной записи, $S(\Delta)$ – ее

модификация, Δ – эпицентральное расстояние в градусах, $0.7^\circ \leq \Delta \leq 40^\circ$,

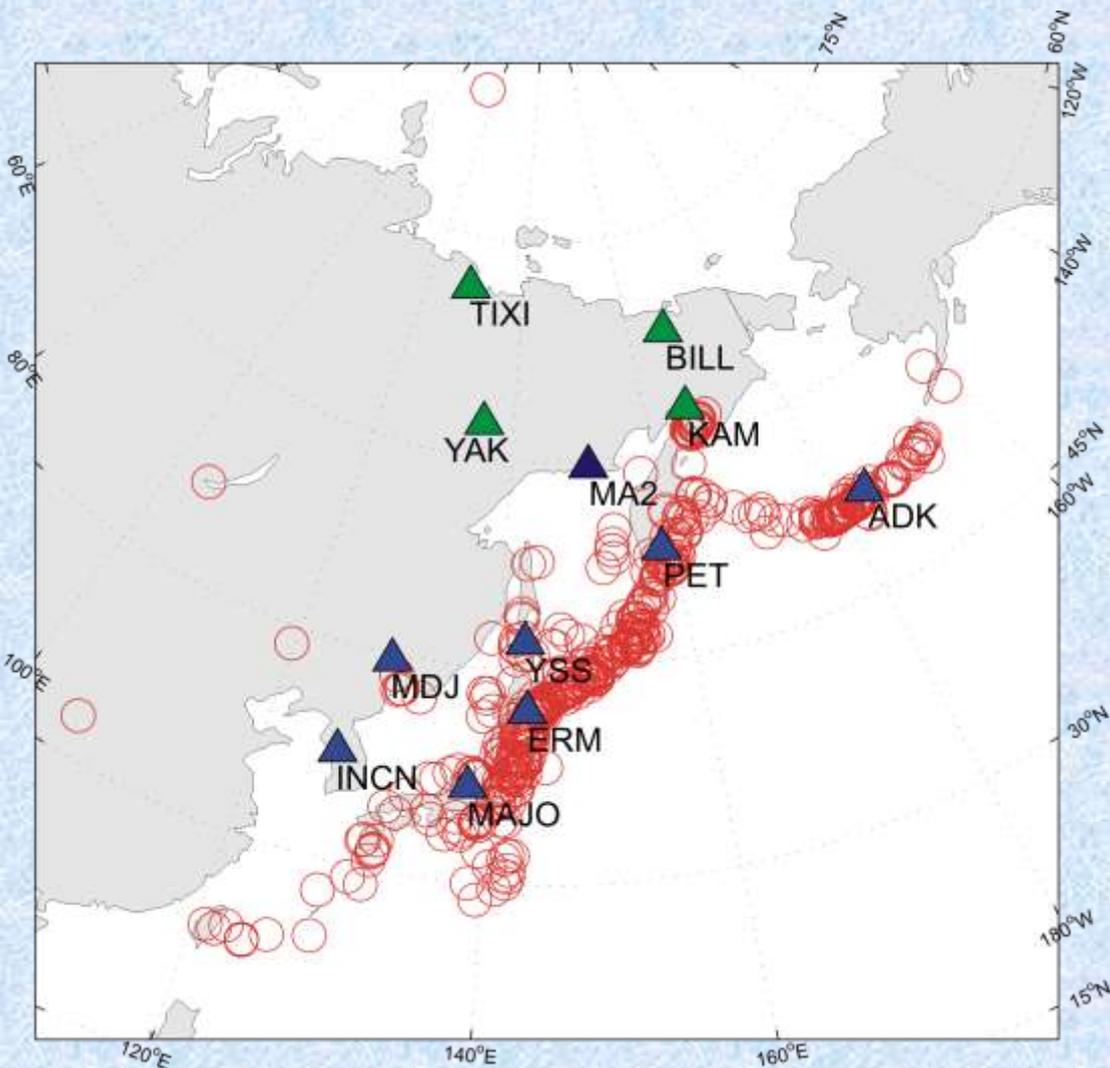
A – среднеквадратическое по трем каналам значение максимальной

«двойной амплитуды» смещения в поверхностной волне на выходе фильтра

в мкм во временном окне $[t_S, t_S+600\text{с}]$, t_S – время вступления S-волны, $T = 20$

с.

/



Предлагаются два варианта калибровочных кривых :

$S_1(\Delta)$ - для «островодужных» станций PET, ADK, MA2, YSS, MDJ, INCN, ERM, MAJO И

$S_2(\Delta)$ - для «континентальных» - КАМ(КМСК), ТИХИ, БИЛЛ, YAK.

○ - эпицентр землетрясения

Сейсмические станции:

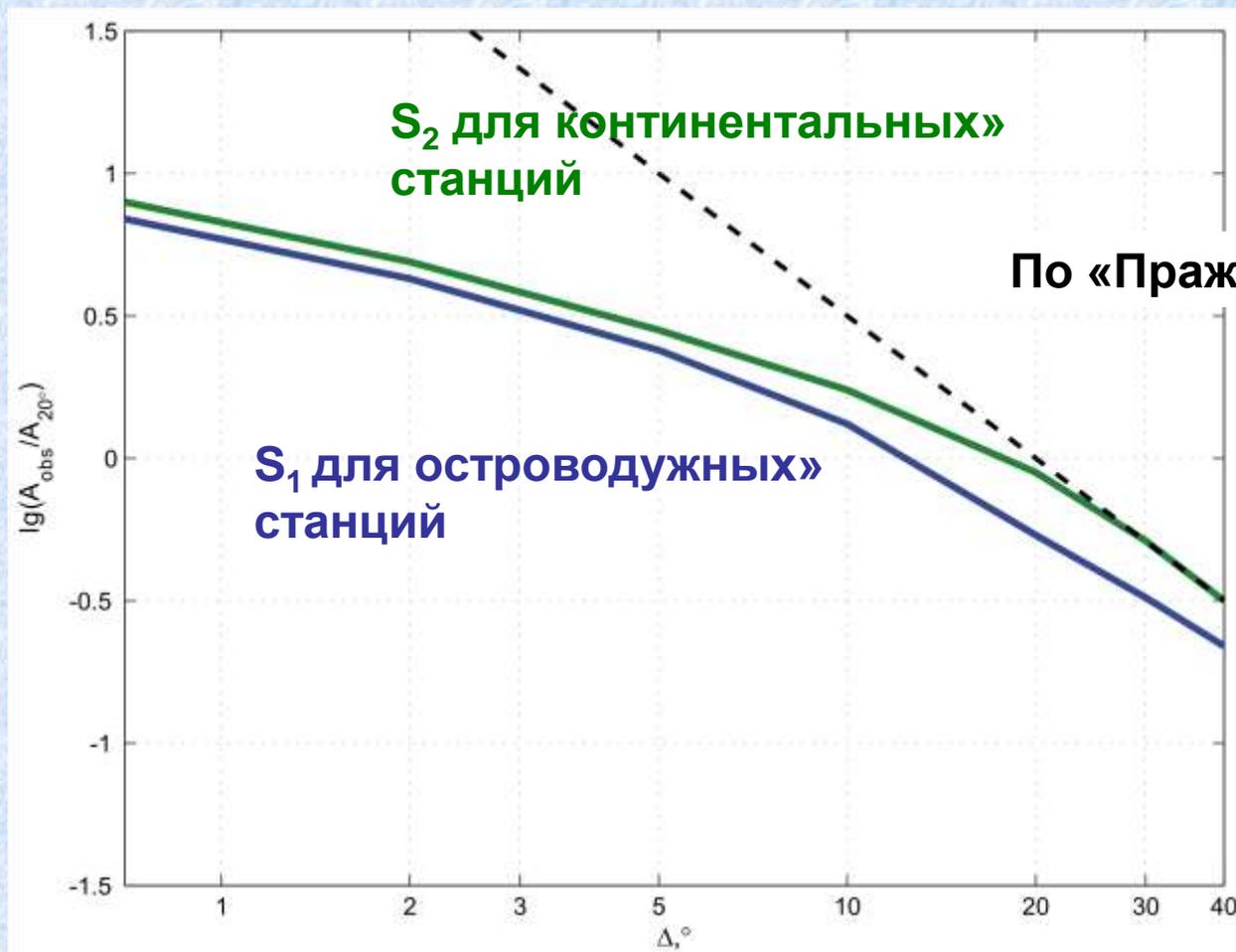
▲ - «островодужные»

▲ - «континентальные»

Для отдельной сейсмической станции численные значения калибровочных функций $S(\Delta)$ для определения магнитуды $M_S(20R)$ определяются по данным таблицы, используя линейную интерполяцию по аргументу $lg(\Delta)$.

Параметры	Δ , градусы								
	<0.7	0.7	2	5	10	20	30	40	>40
$lg(\Delta)$		-0.1549	0.3010	0.6990	1.0000	1.3010	1.4771	1.6021	
$S_1(\Delta)$	Не опред.	0.90	0.69	0.45	0.24	-0.05	-0.29	-0.50	Не опред
$S_2(\Delta)$	Не опред.	0.84	0.63	0.38	0.12	-0.27	-0.49	-0.66	Не опред

КАЛИБРОВОЧНЫЕ КРИВЫЕ ДЛЯ МАГНИТУДЫ $M_S(20R)$

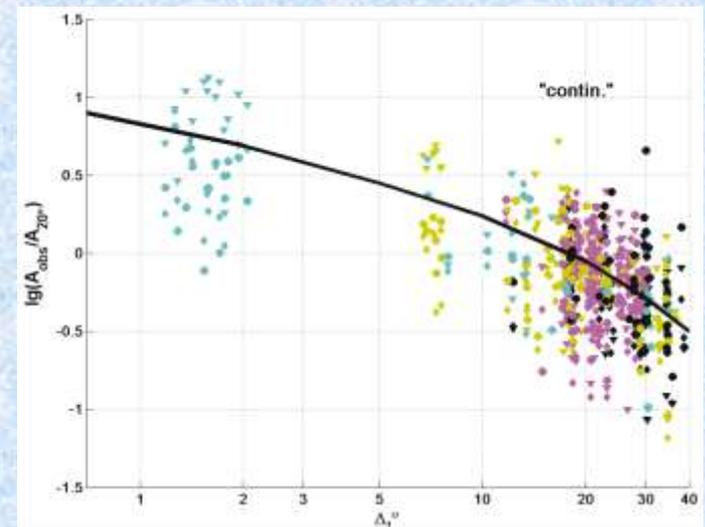
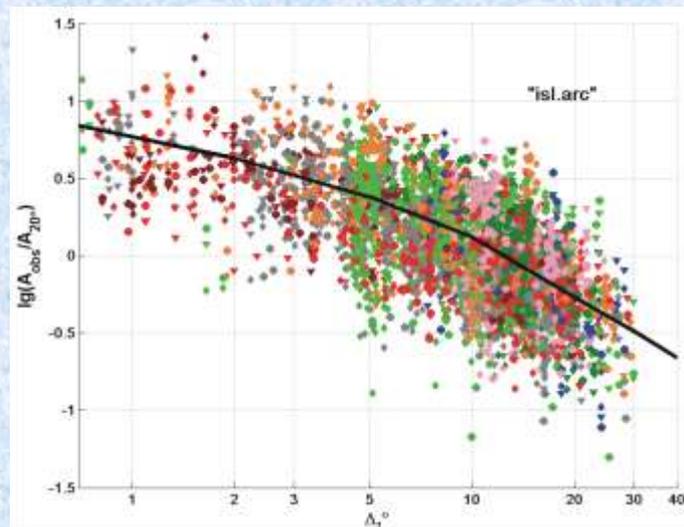
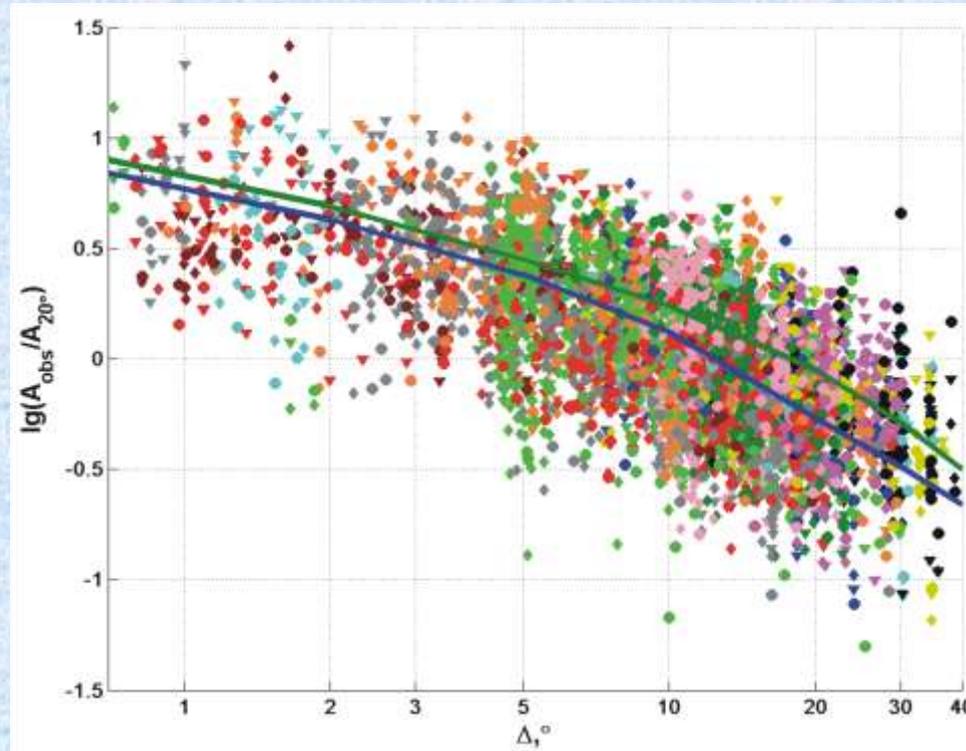


S_2 для континентальных»
станций

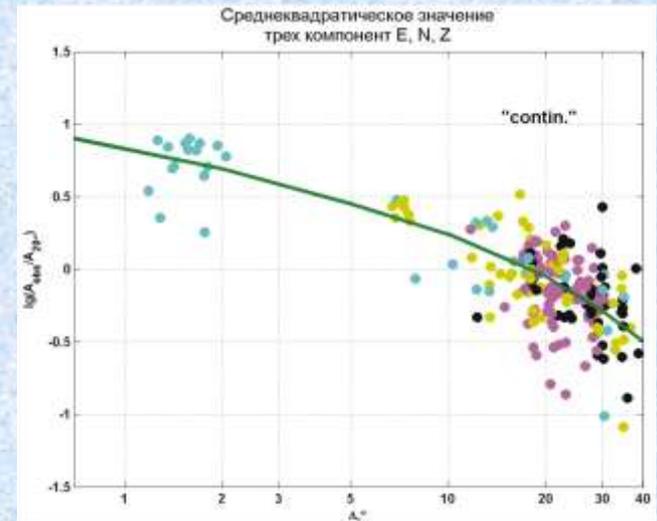
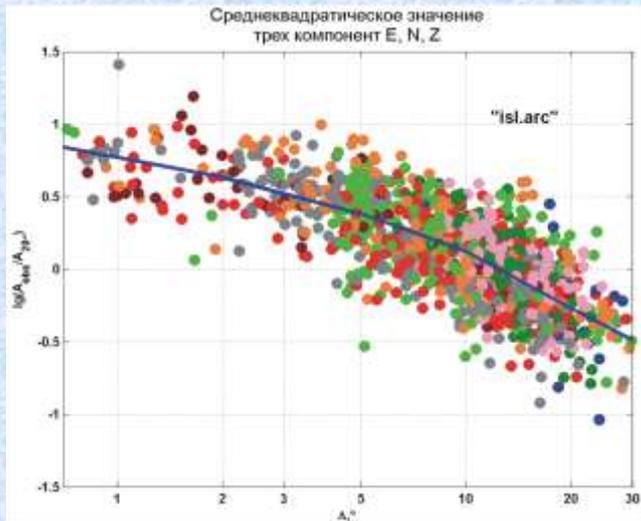
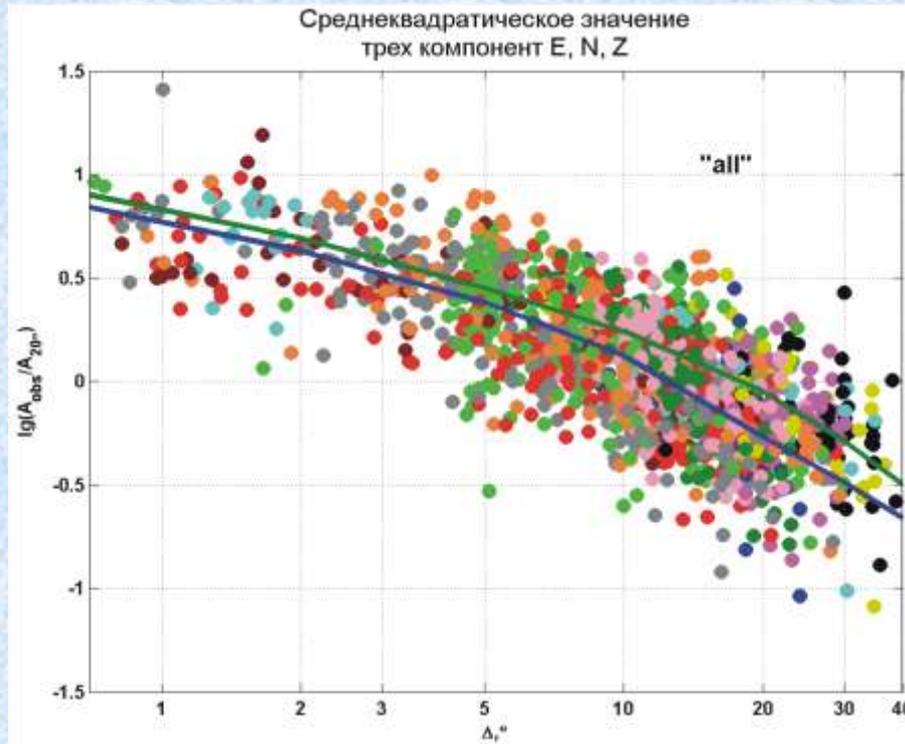
S_1 для островодужных»
станций

По «Пражской формуле»

ДАННЫЕ И КАЛИБРОВОЧНЫЕ КРИВЫЕ

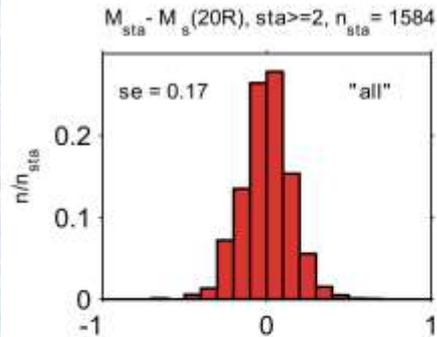


ОСРЕДНЕННЫЕ ДАННЫЕ И КАЛИБРОВОЧНЫЕ КРИВЫЕ

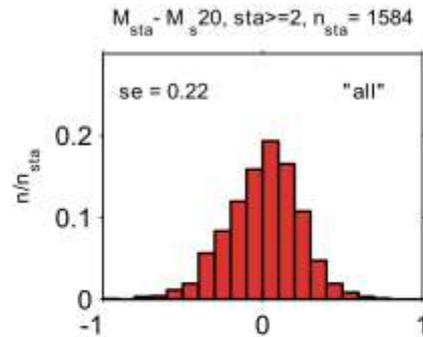


НЕВЯЗКИ ОЦЕНОК МАГНИТУДЫ $M_S(20R)$

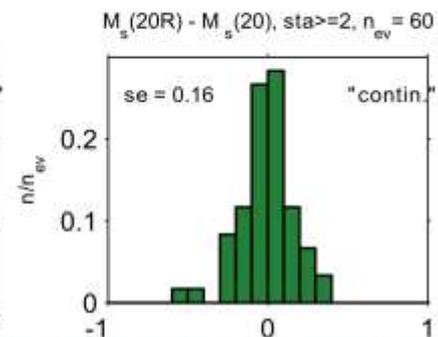
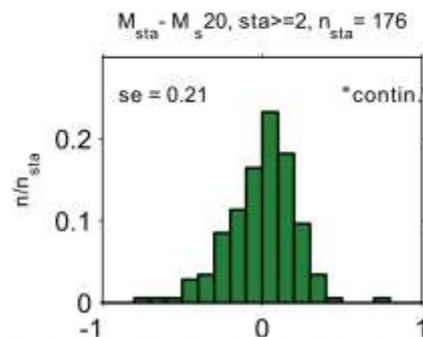
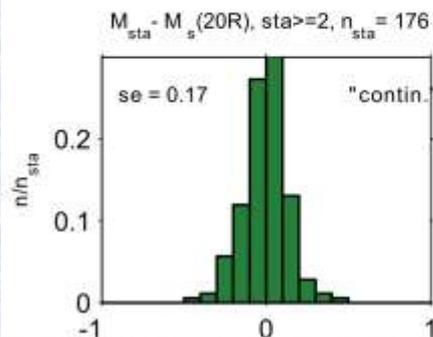
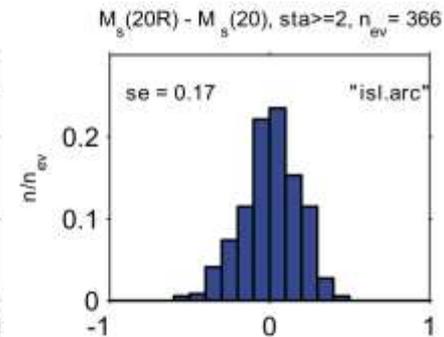
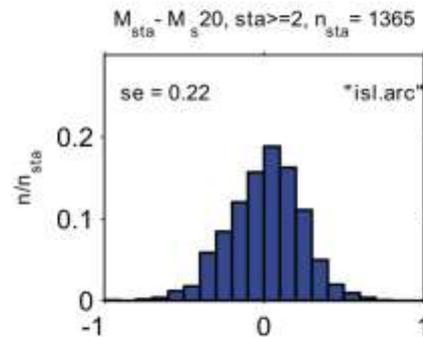
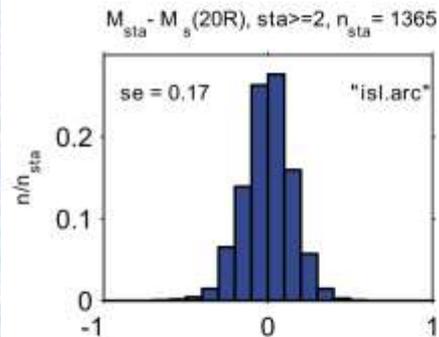
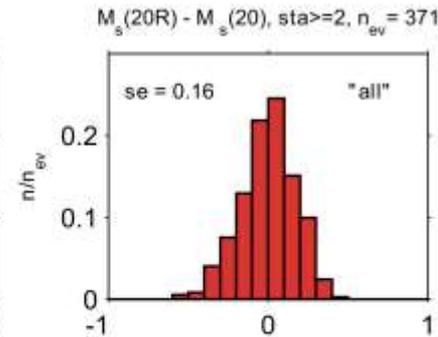
$M_{S(20R)_{sta}} - M_S(20R)$



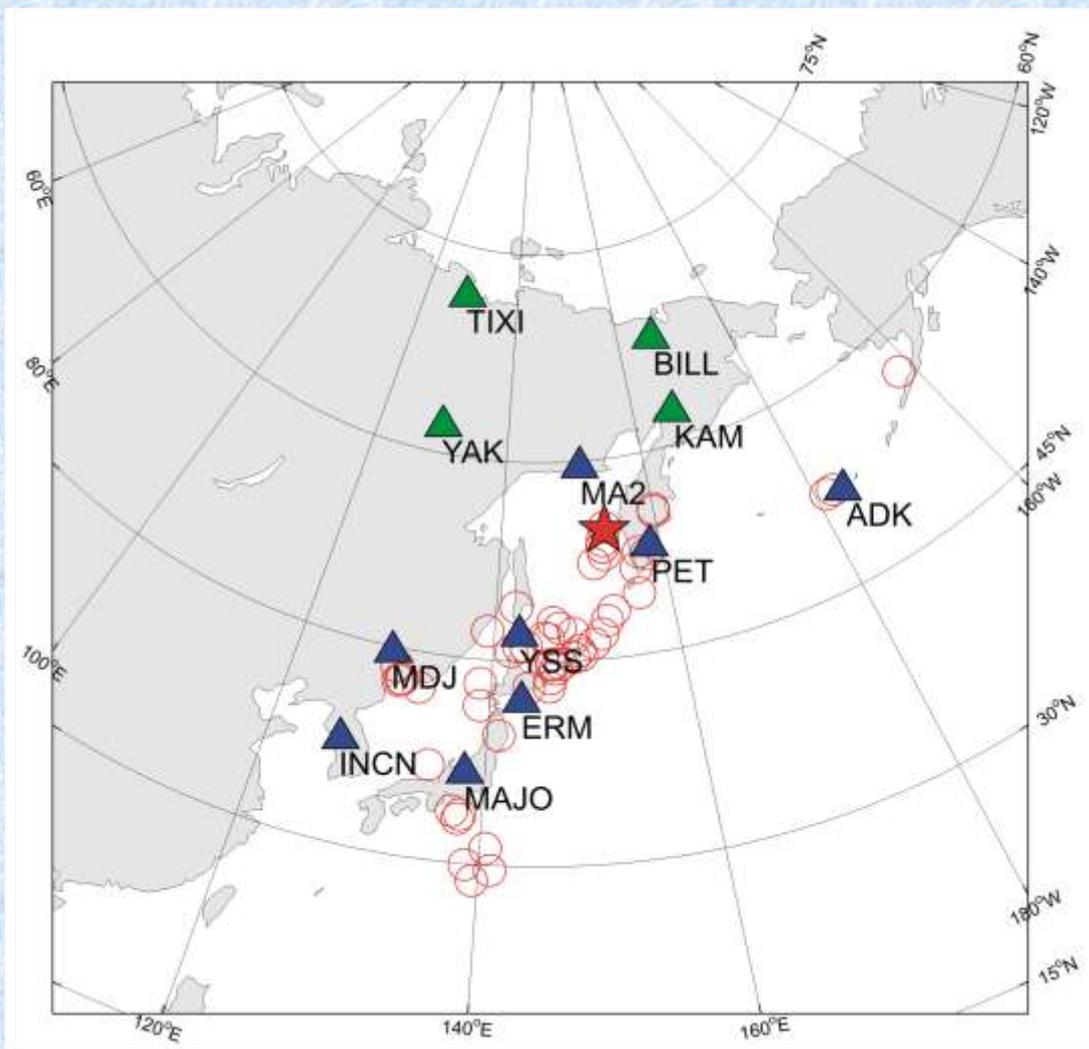
$M_{S(20R)_{sta}} - M_S(20)$



$M_S(20R) - M_S(20)$



Карта эпицентров глубоких землетрясений и цифровых сейсмических станций



55 землетрясений

$M_W = 5.4 - 8.3$

$H = 76 - 656$ км

○ - эпицентр землетрясения

★ - эпицентр землетрясения

24.05.2013, $H=608$ км, $M_W=8.3$

Сейсмические станции:

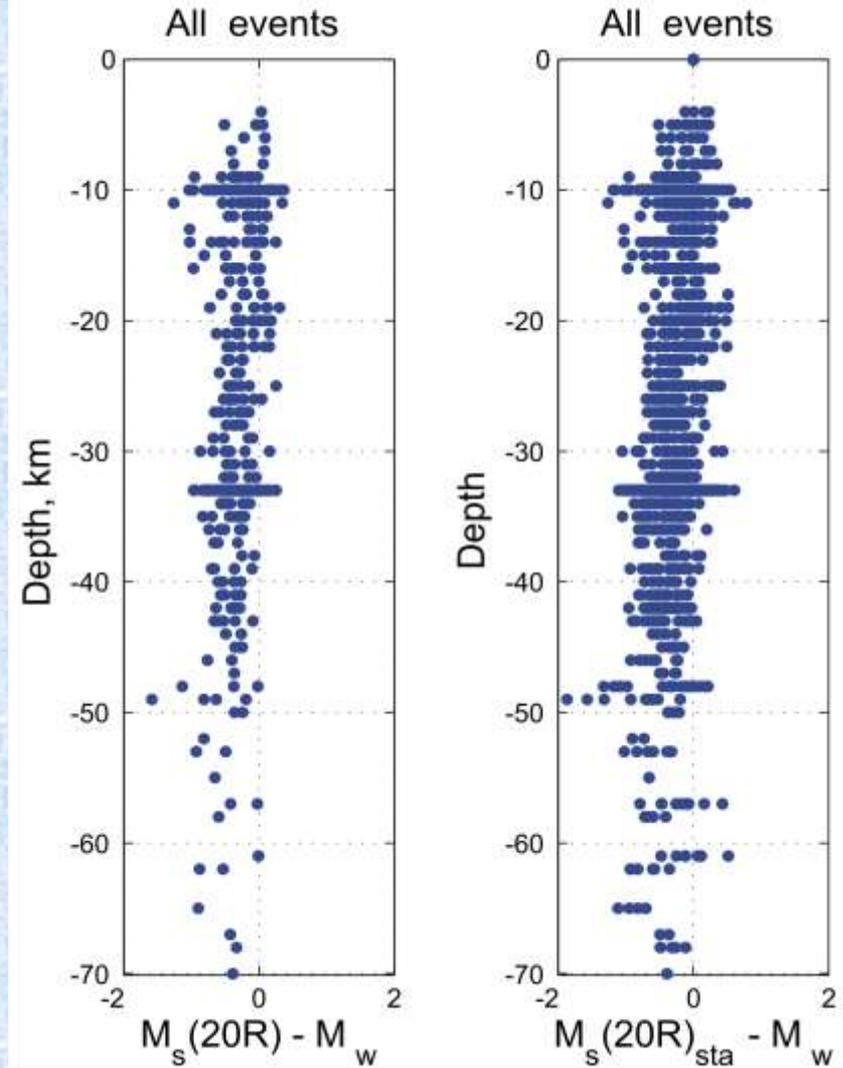
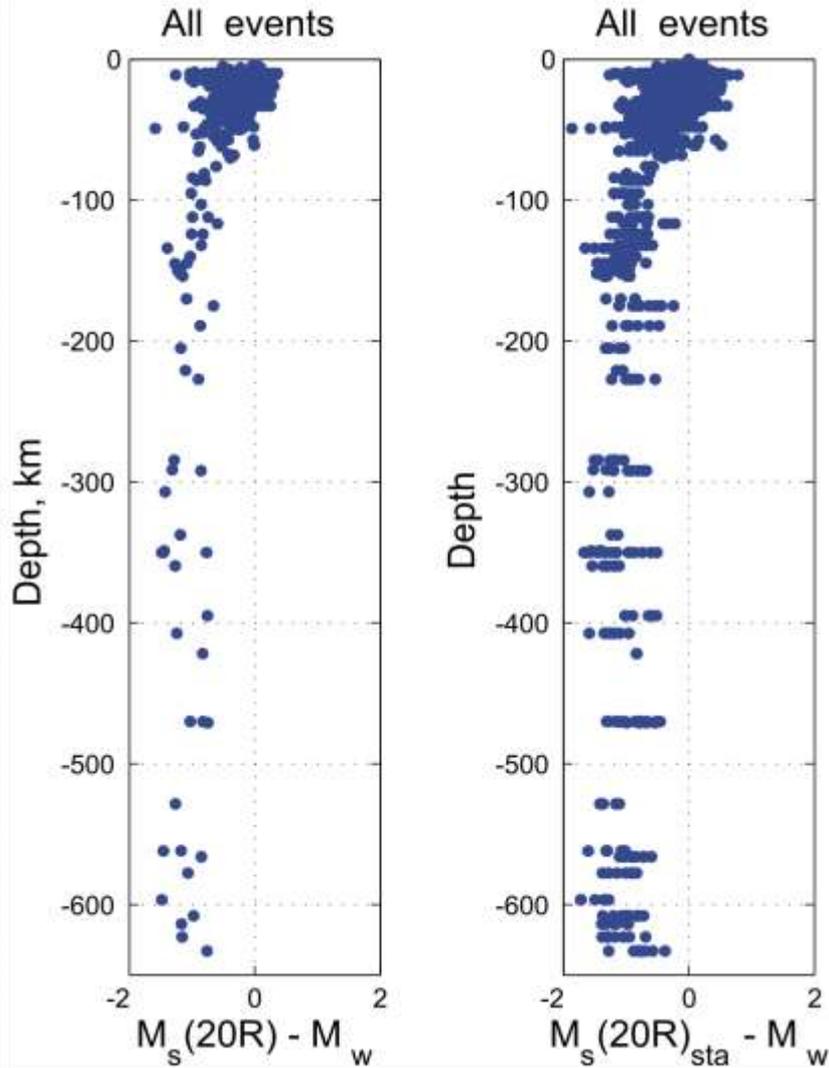
▲ - “островодужные”

▲ - “континентальные”

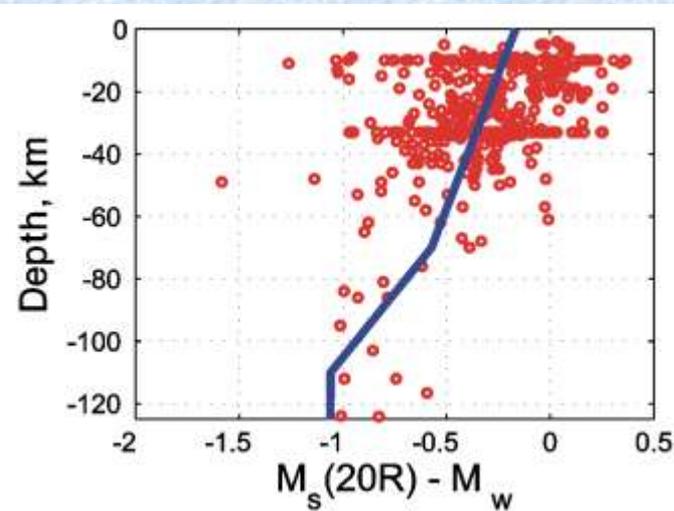
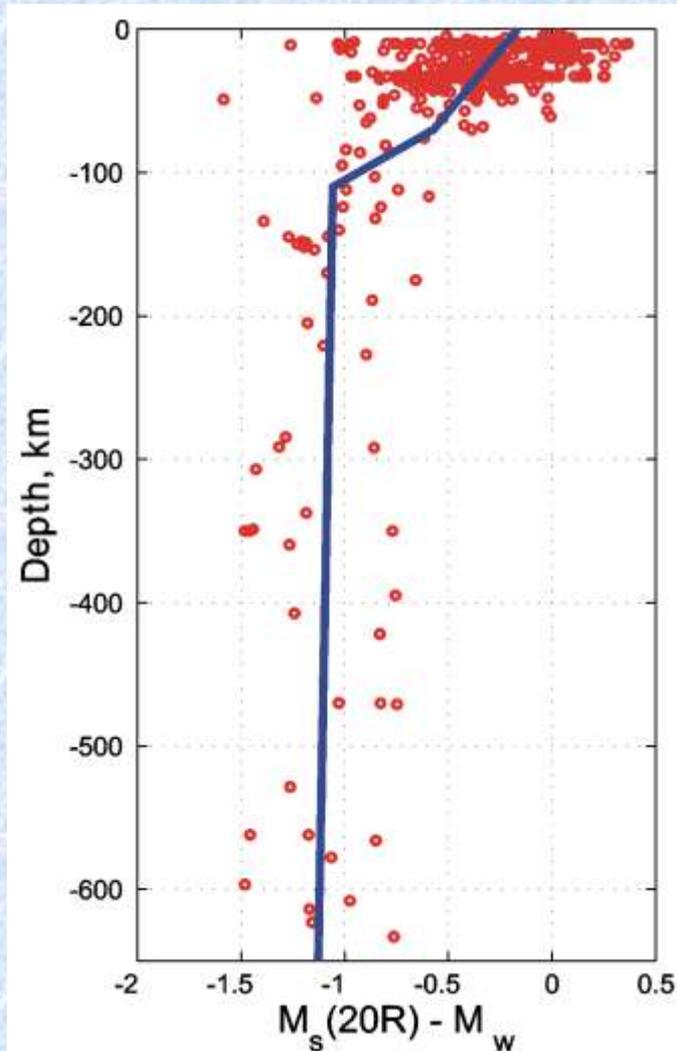
ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ГЛУБИНЫ РАЗНОСТИ МАГНИТУД $M_S(20R)$ И M_W

H= 0 – 650 км

H= 0 – 70 км



ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ГЛУБИНЫ РАЗНОСТИ МАГНИТУД $M_S(20R)$ И M_W



Узлы – 0, 70, 110, 650 км

$\Delta_{0-70} = 0.4$ $\Delta_{110-650} = 0.07$

$M_W \sim M_S(20R) + 1, H > 110$ км

Параметры регрессии

10 < h < 80 km

$$\Delta M_S(h) = 0.0174h - 0.52$$

(Panza et al, 1989)

h ≤ 70, N = 429

$$\Delta M_S(20R)(h) = 0.0056h - 0.1704$$

H > 110, N = 48

$$\Delta M_S(20R)(h) = 0.000178h - 1.0266$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Шкала магнитуд $M_s(20R)$ позволяет получить устойчивую при обмере, спектрально четко определенную оценку магнитуды на региональных расстояниях, и позволяет сохранить историческую преемственность с классической шкалой Гутенберга M_s .

Использование новой шкалы $M_s(20R)$ для изученного региона в интервале эпицентральных расстояний 2200 – 4500 км может быть рекомендовано как уточнение стандартной шкалы $M_s(20)$.

Шкала $M_s(20R)$ позволяет делать оперативные оценки магнитуды, тесно связанные со значением спектра сейсмического момента на частоте $1/T=0.05$ Гц.

Определена зависимость от глубины оценок магнитуды $M_s(20R)$, однако ее масштаб оказался ограниченным, по-видимому за счет существенного вклада поперечных волн в оценки $M_s(20R)$. Выявленные особенности целесообразно учитывать при оценке возможности возбуждения опасных волн цунами.

Авторы признательны Г.М. Бахтиаровой , С.А. Викулиной, М.Я. Малкиной, А.Ю. Чебровой и В.А. Зубовой за участие в подборе и подготовке данных.

Спасибо!

Параметры регрессии

$H \leq 70$

number of events $N = 429$

$ae(1) = -0.17044$

$ae(2) = 0.0055786$

$s2e = 0.072717$

$se = 0.26966$

$H > 110$

number of events $N = 48$

$ae(1) = -1.0266$

$ae(2) = 0.0001775$

$s2e = 0.05797$

$se = 0.24077$

$$\Delta M_S(h) = 0.0174 h - 0.52$$

Romanelli, F. and Panza, G.F.

Effect of source depth correction on the estimation of earthquake size

// Geoph. Res. Lett., 1995, NO. 9, pp.1017 – 1019.

H>110

number of events N = 48

slope par ae(1) ae(2) -1.0266 0.0001775

ae(1) = -1.0266

ae(2) = 0.0001775

s2e = 0.05797

se = 0.24077

y650 = -1.142 knot650=-1.1279

y110 = -1.0391 knot110= -1.0577

y110-y650 = 0.0959 knot110 - knot650 = 0.0702

H<=70

number of events N = 429

slope par ae(1) ae(2) -0.17044 0.0055786

ae(1) = -0.17044

ae(2) = 0.0055786

s2e = 0.072717

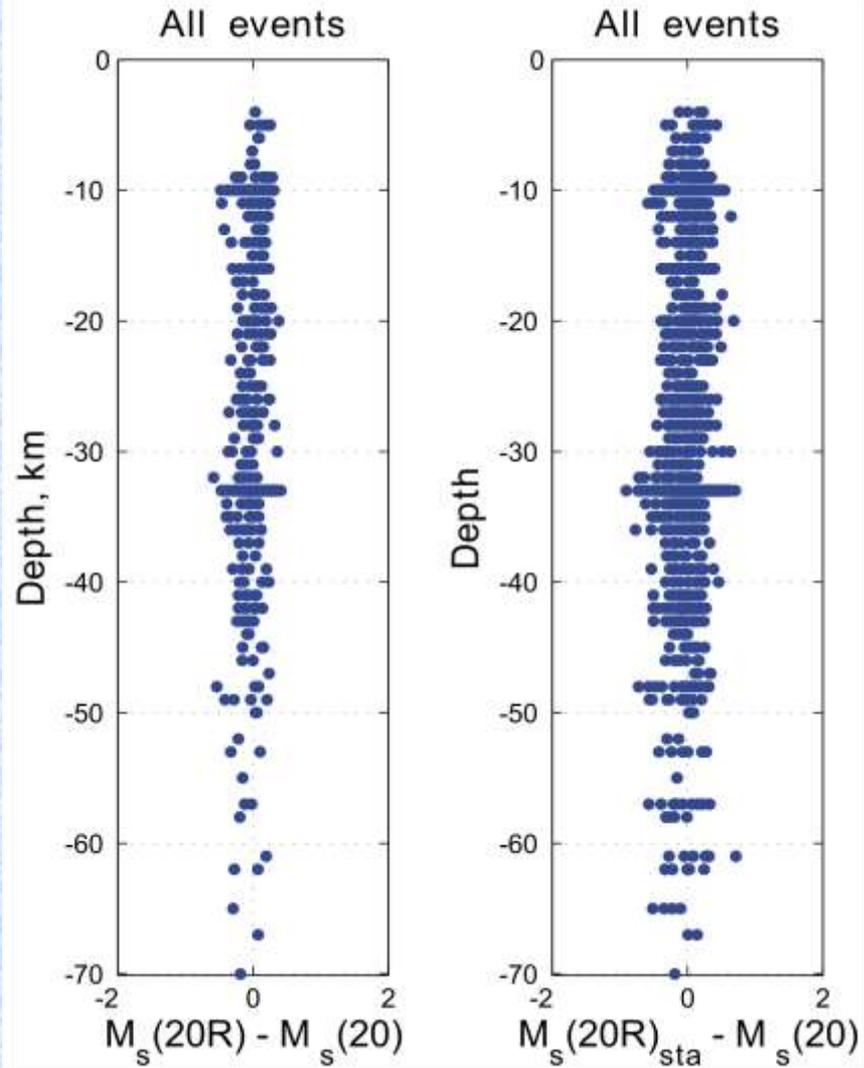
se = 0.26966

y70 = -0.56094 knot70= -0.5711

y0 = -0.17044 knot0= -0.1656

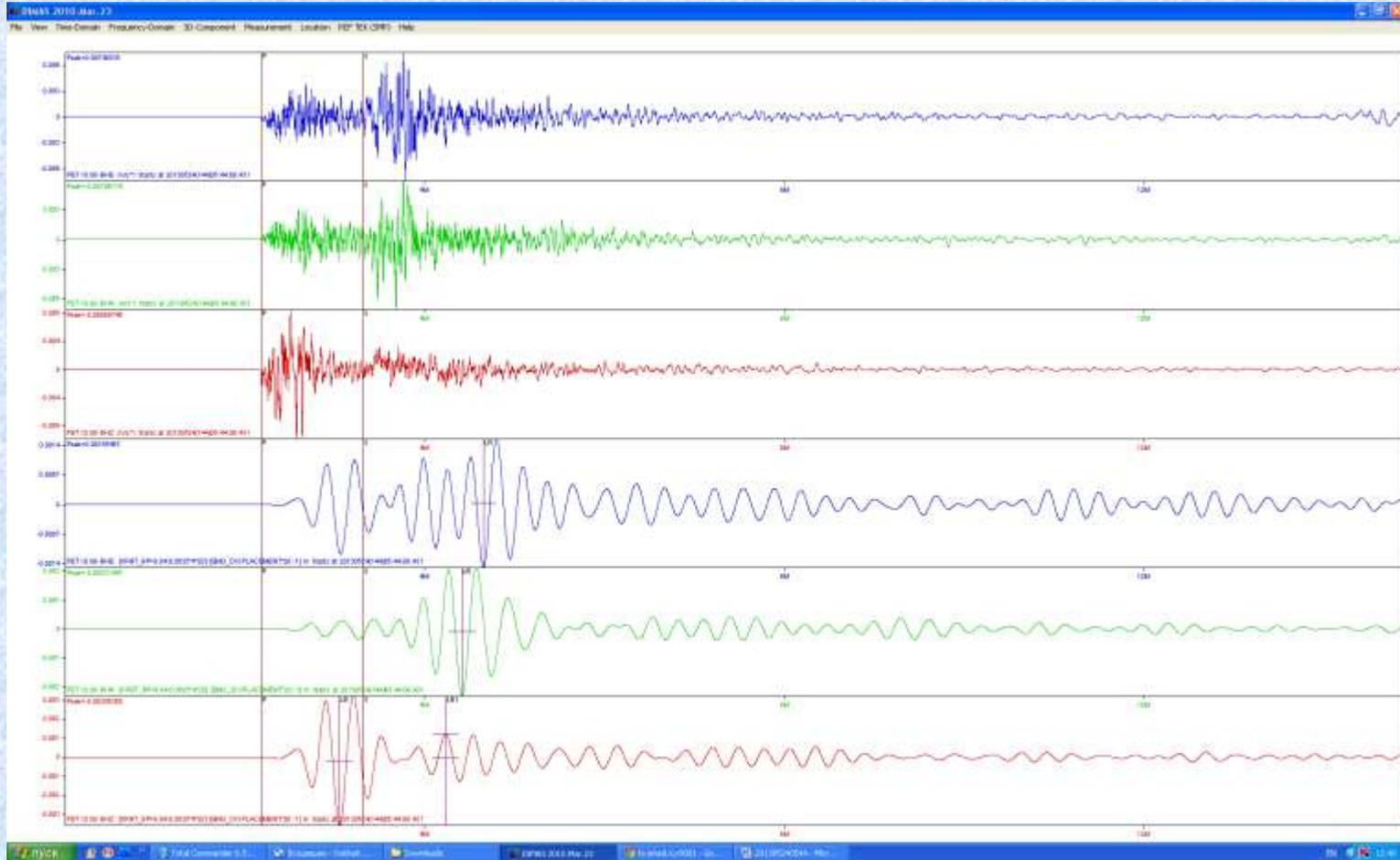
y0-y70 = 0.3905 knot0 - knot70 =0.4055

H= 0 – 70 км



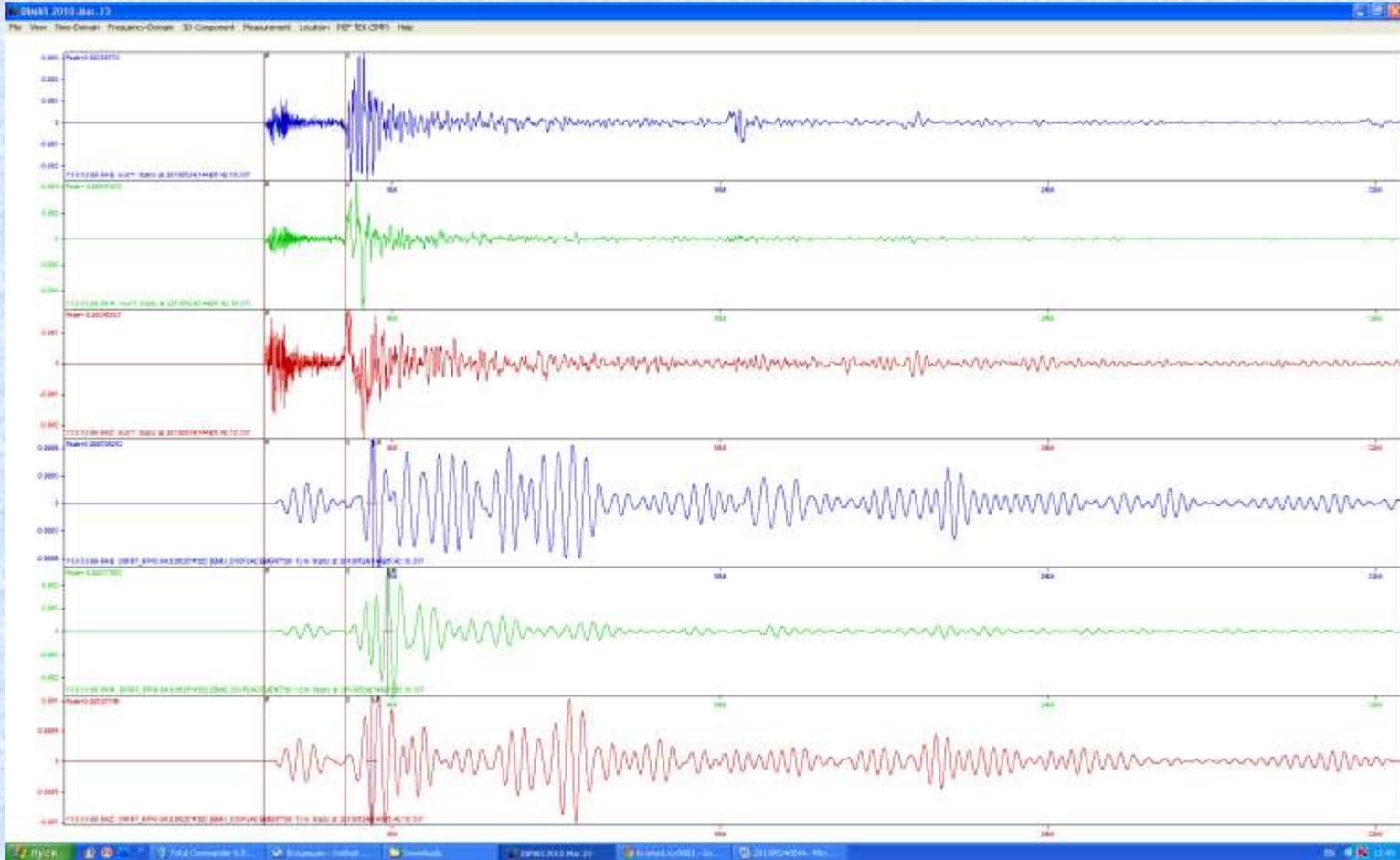
PET

$M_S(20R) = 6.9$



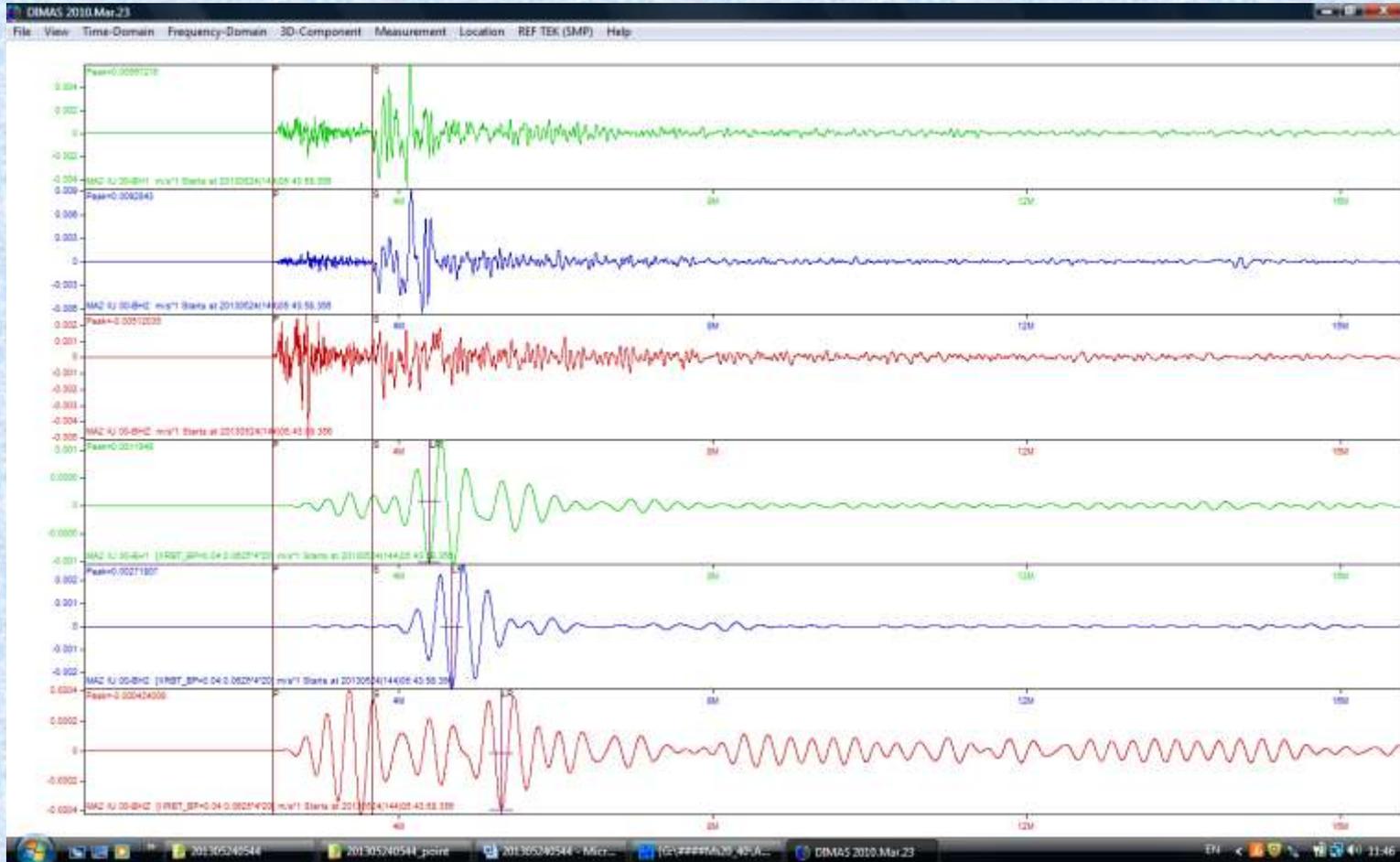
YSS

$M_S(20R) = 7.3$



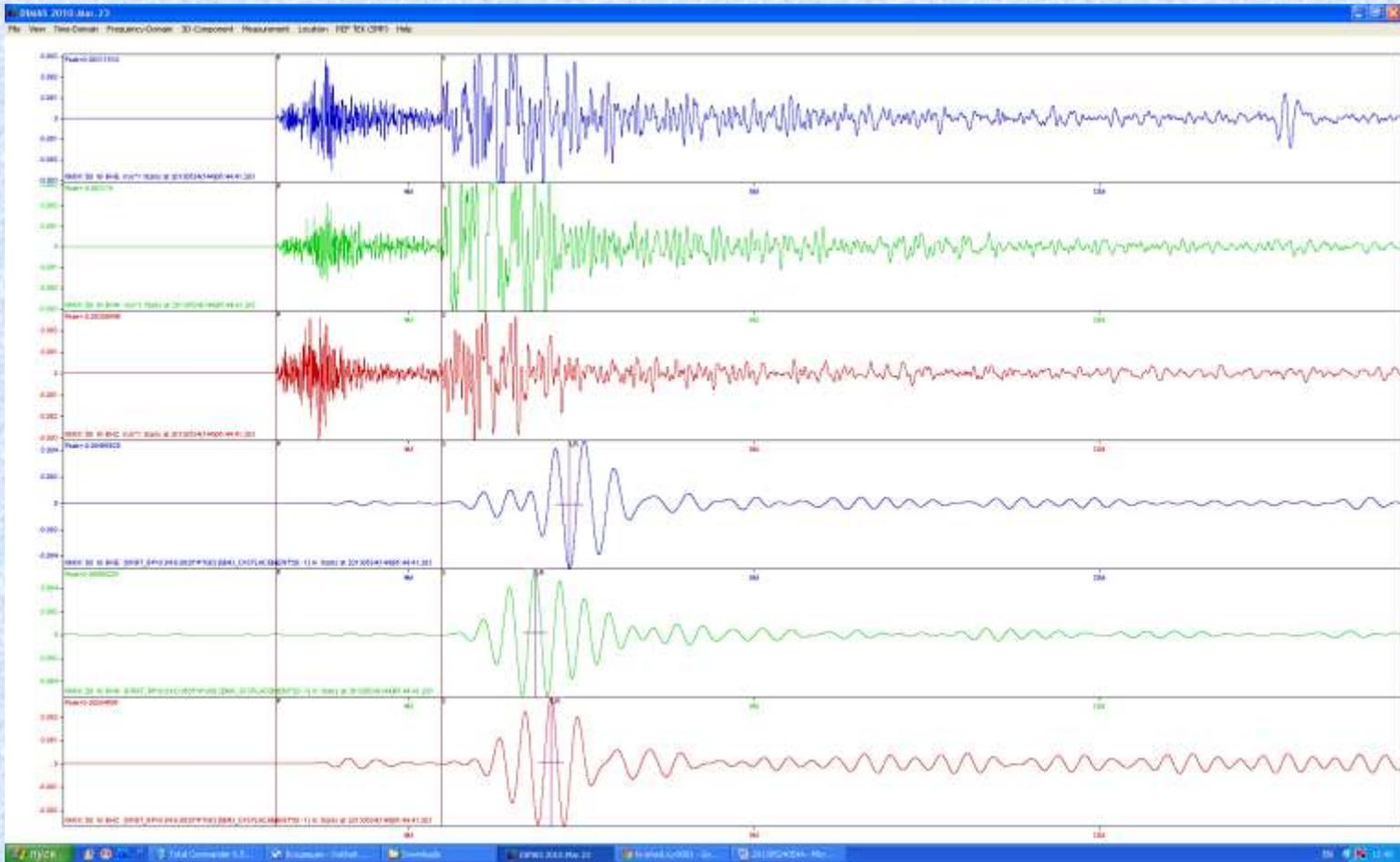
MA2

$M_S(20R) = 7.5$



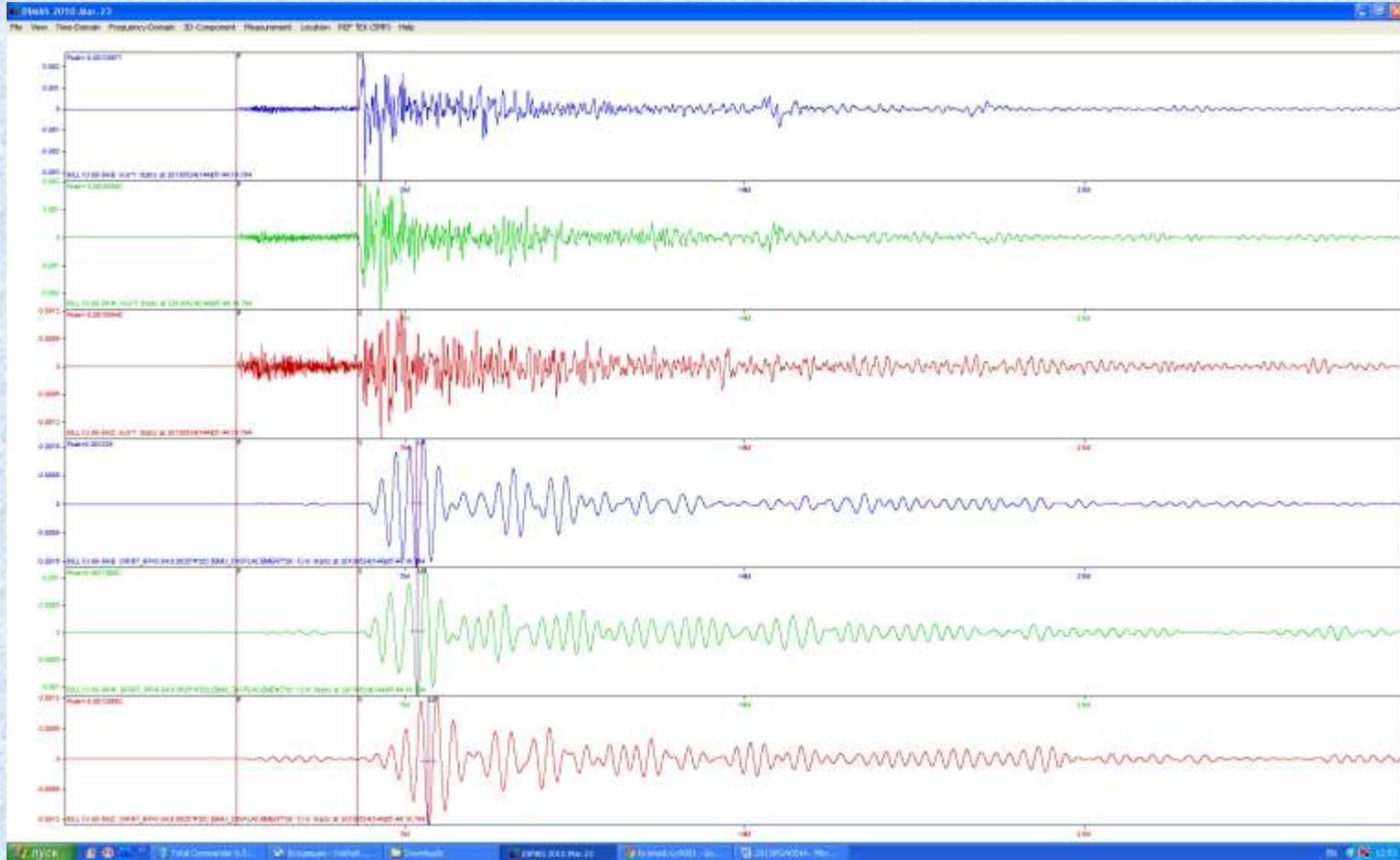
KMSK

$M_S(20R) = 7.6$



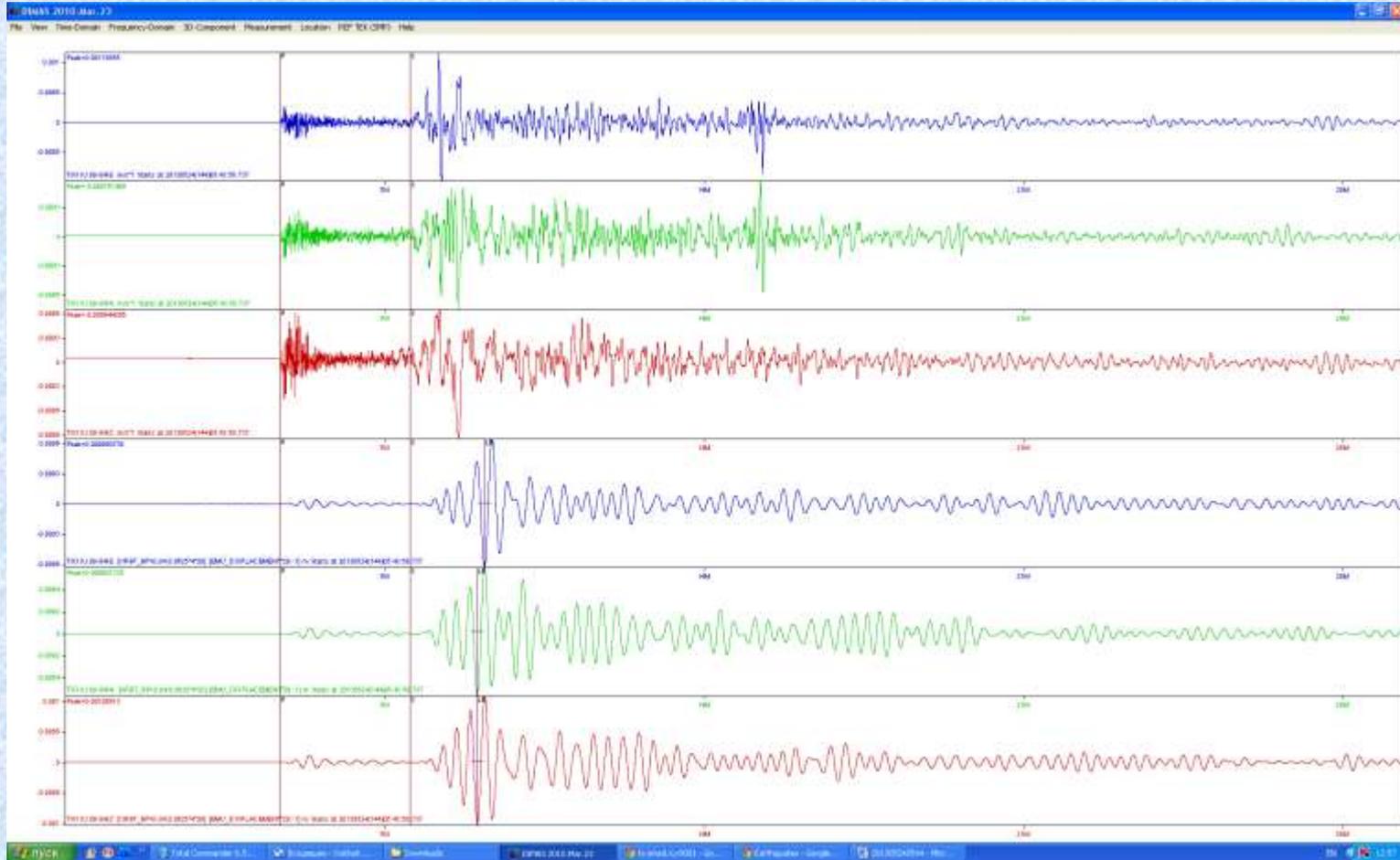
BILL

$M_S(20R) = 7.2$



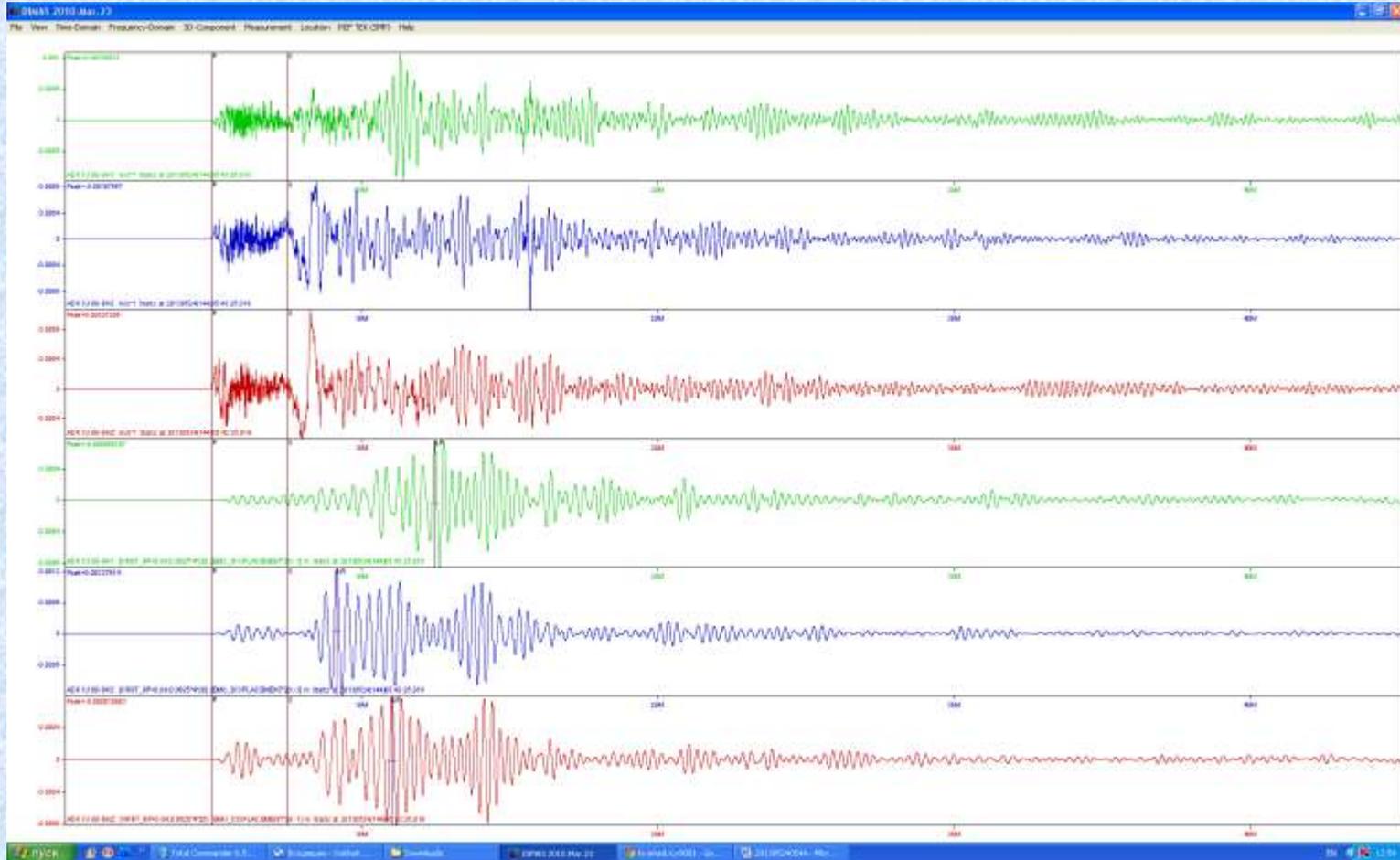
TIXI

$M_S(20R) = 7.1$



ADK

$M_S(20R) = 7.4$

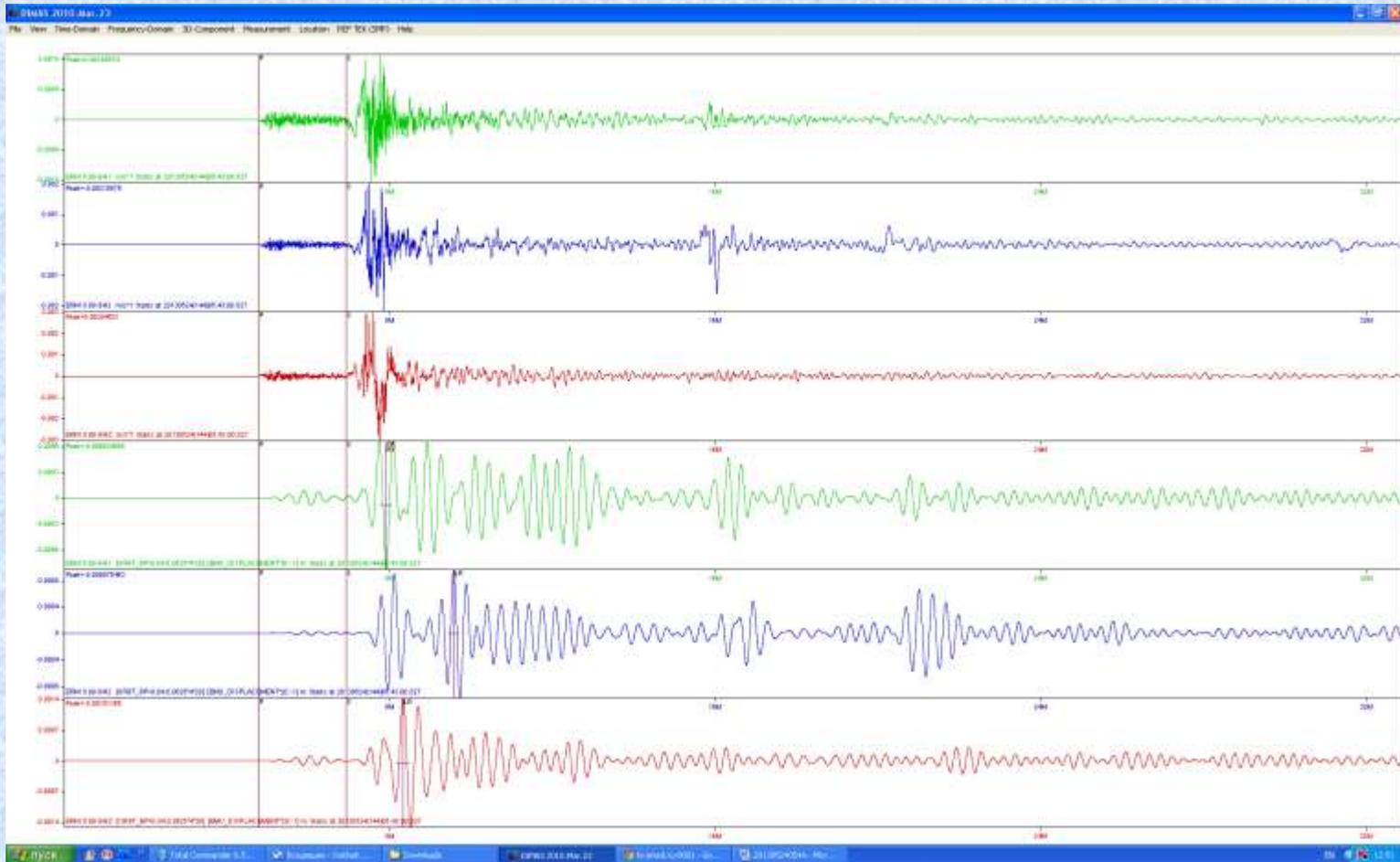


2013/05/24 05:44:49 54.87 153.28 H=608

$M_W = 8.3$

ERM

$M_S(20R) = 7.3$

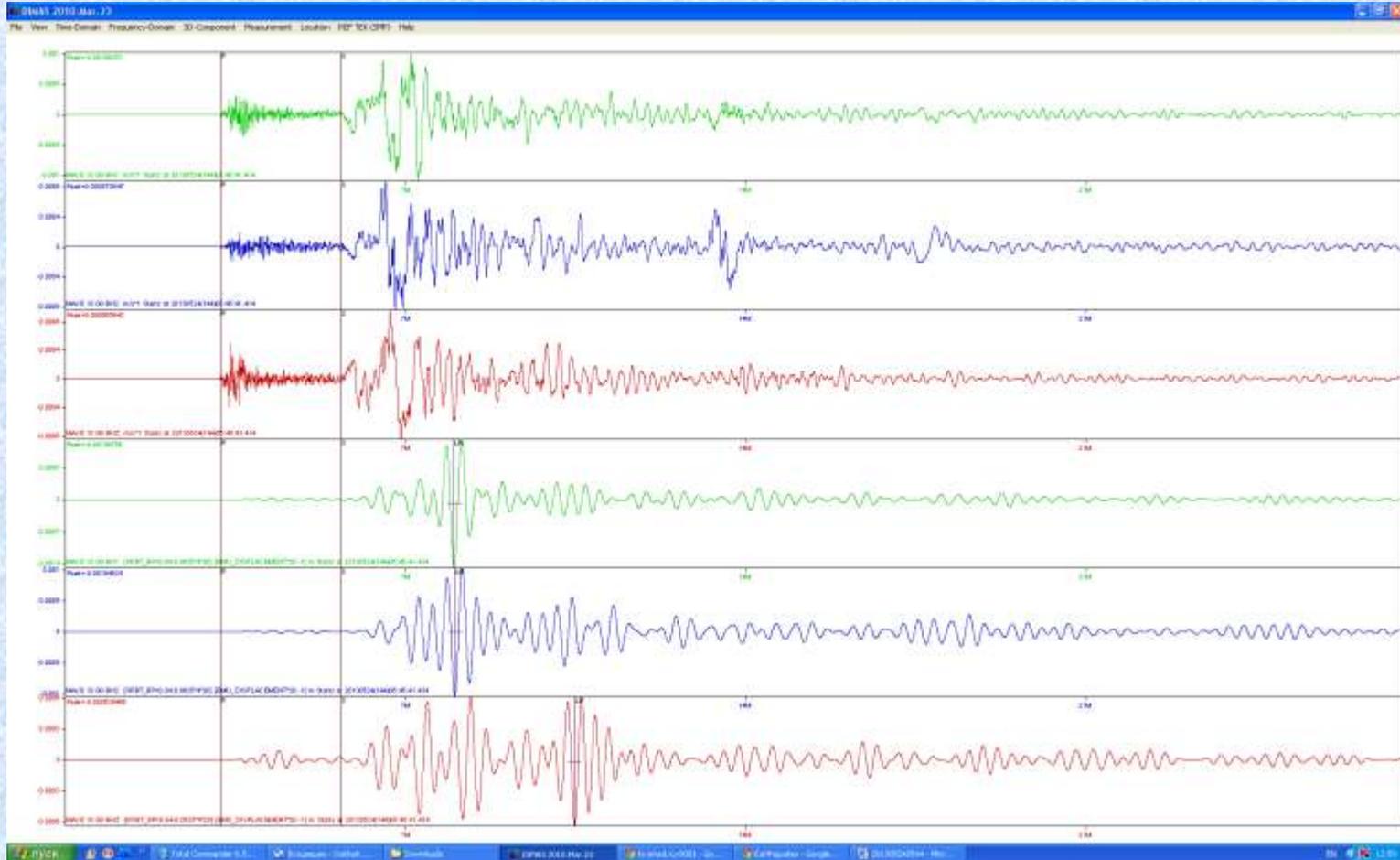


2013/05/24 05:44:49 54.87 153.28 H=608

$M_W = 8.3$

MAJO

$M_S(20R) = 7.5$

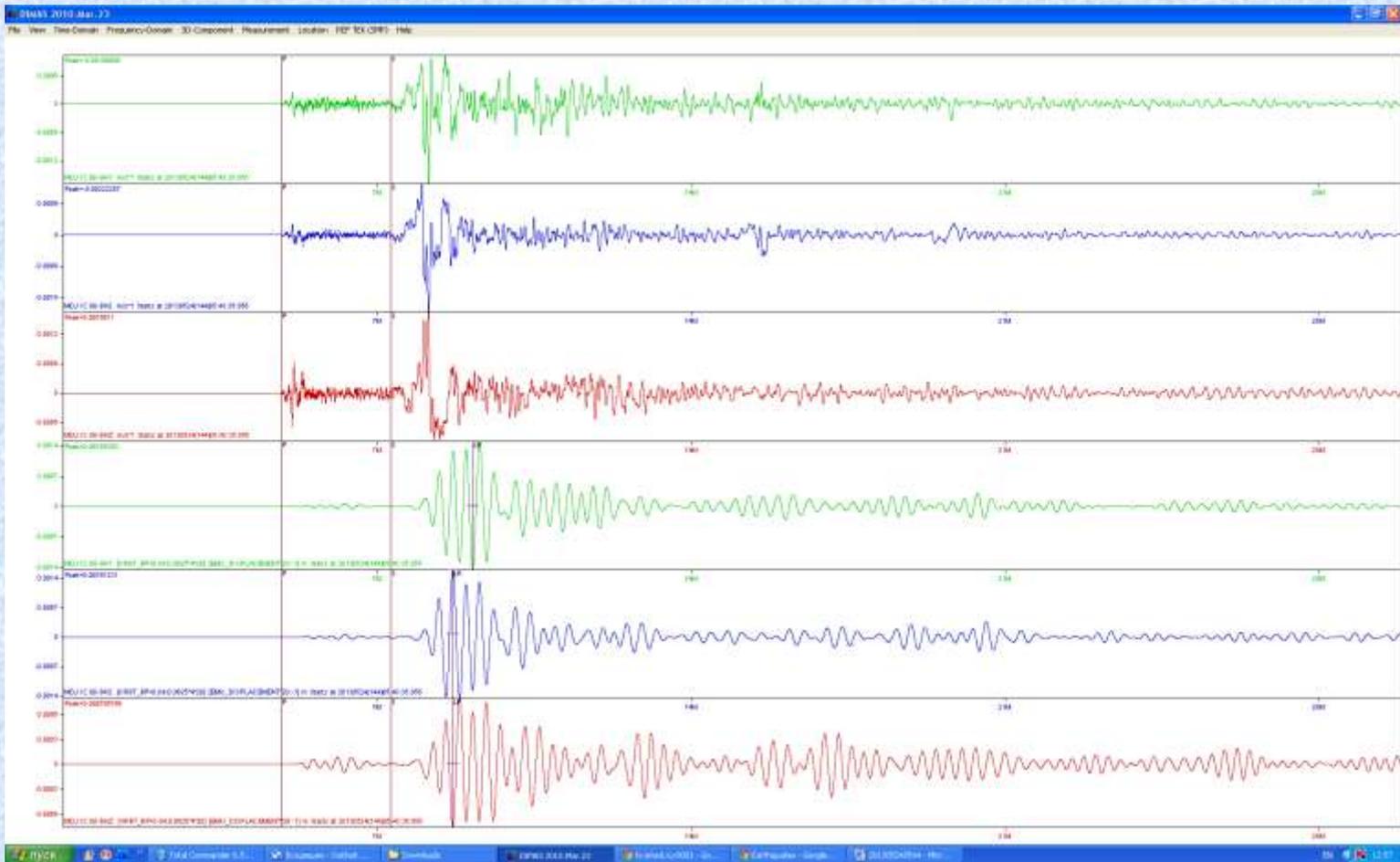


2013/05/24 05:44:49 54.87 153.28 H=608

$M_W = 8.3$

MDJ

$M_S(20R) = 7.5$



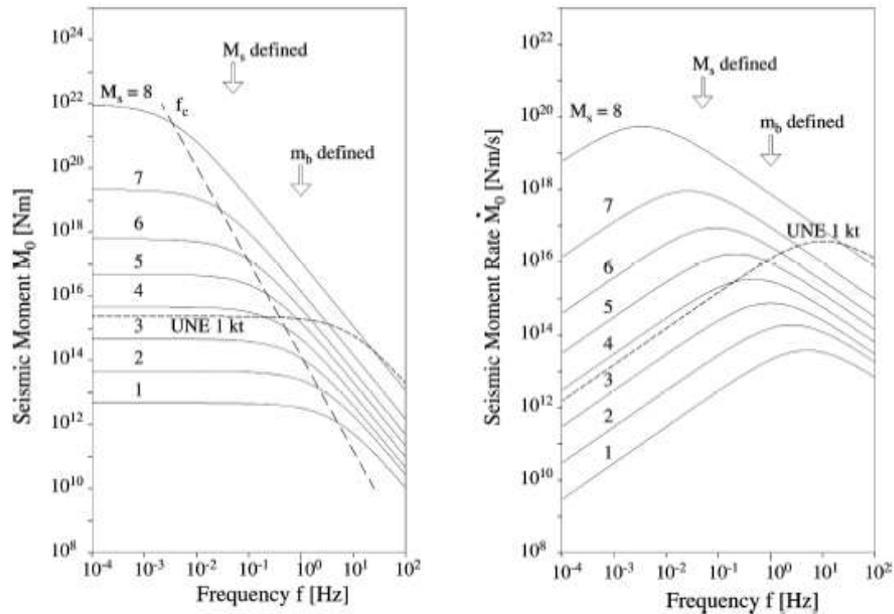


Fig. 3.5 "Source spectra" of ground displacement (left) and velocity (right) for a seismic shear source. "Source spectrum" means here the attenuation-corrected ground displacement $u(f)$ or ground velocity $\dot{u}(f)$ respectively, multiplied by the factor $4\pi d \rho v_{p,z}^3 / R_{\theta,0}^{p,s}$. The ordinates do not relate to the frequency-dependent spectra proper but rather to the low-frequency scalar seismic moments or moment rates that correspond to the depicted spectra. The broken line (long dashes) shows the increase of corner frequency f_c with decreasing seismic moment of the event, the short-dashed line gives the approximate "source spectrum" for a well contained underground nuclear explosion (UNE) of an equivalent yield of 1 kt TNT. Note the plateau ($u_0 = \text{const.}$) in the displacement spectrum towards low frequencies ($f < f_c$) and the high-frequency decay $\sim f^{-2}$ for frequencies $f > f_c$.