

МАСШТАБНЫЙ ЭФФЕКТ В СЕЙСМОТЕКТОНИКЕ

Г.Г.Кочарян

24.04.2014 Ученый совет ИДГ РАН



Введение

1. Масштабный эффект при разломообразовании
2. О подобии характеристик очагов сейсмических событий
3. Энергетический класс и сейсмическая энергия
4. Обсуждение

Выводы

Геометрическое подобие - все линейные характеристики процесса пропорциональны (энергии)^{1/3}

$$L \sim E^{1/3}$$

Взрыв в однородной среде:

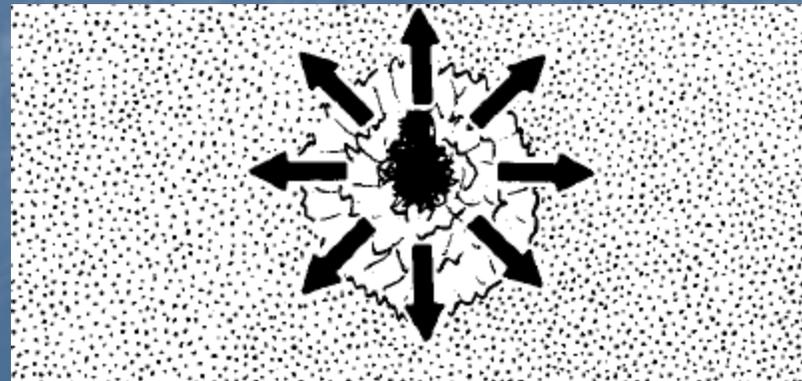
$$\frac{r_1}{q_1^{1/3}} = \frac{r_2}{q_2^{1/3}}$$

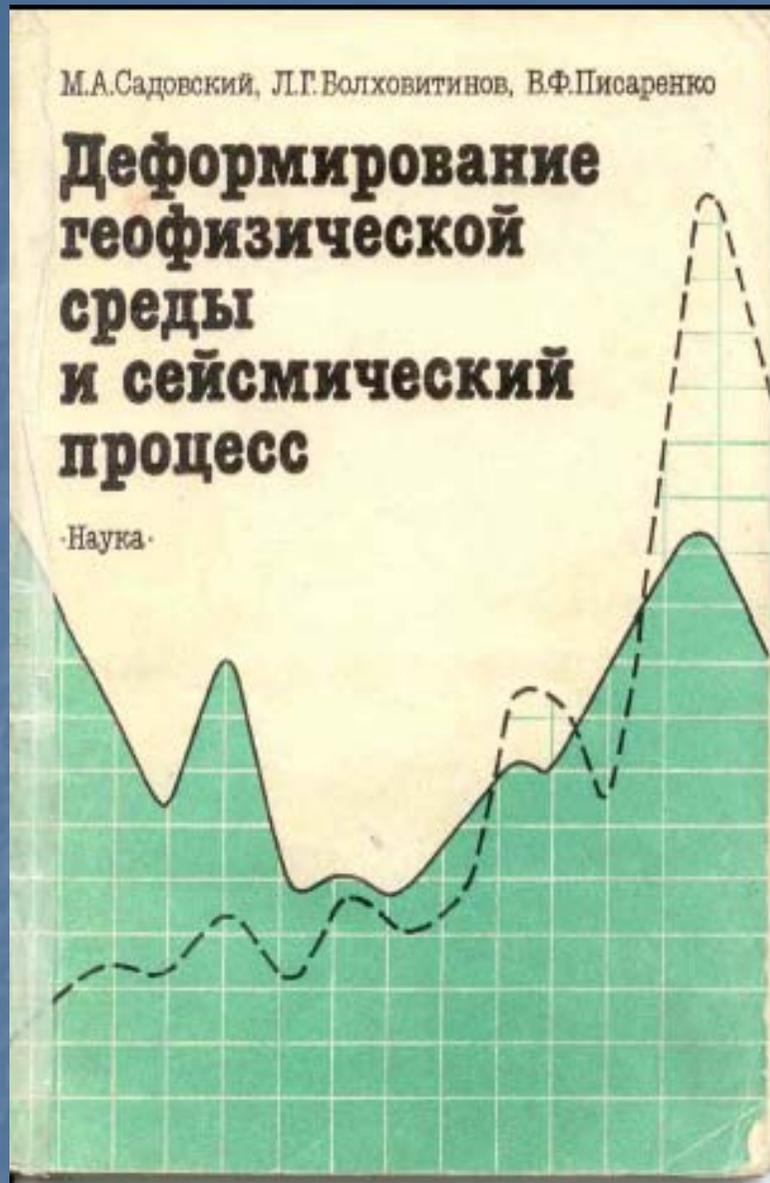
$$\frac{t_1}{q_1^{1/3}} = \frac{t_2}{q_2^{1/3}}$$

$$b_2 = b_1 \left(\frac{q_2}{q_1} \right)^{1/3}$$

$$v_1(r_1, t_1) = v_2(r_2, t_2)$$

$$\frac{u_1(r_1, t_1)}{q_1^{1/3}} = \frac{u_2(r_2, t_2)}{q_2^{1/3}}$$





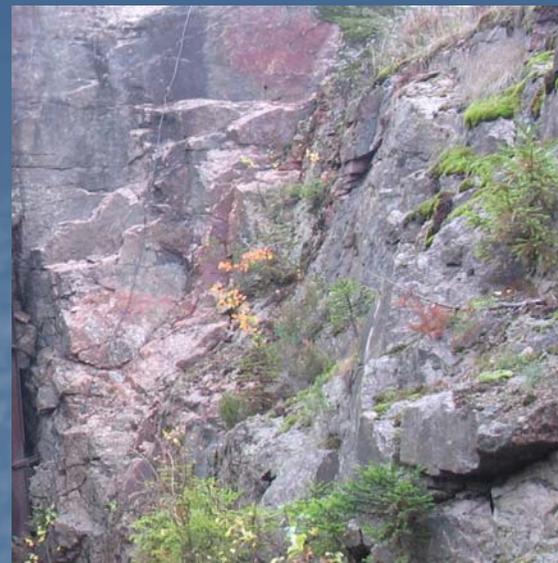
- Блочно-иерархическая модель земной коры
- Кора состоит из ряда блоков, размеры которых определяются универсальным шагом иерархической делимости среды

$$L \sim E^{1/3}$$

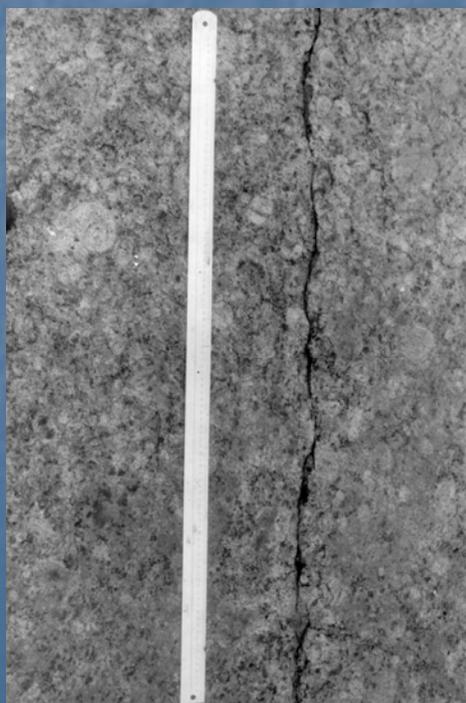
$$\tau_r \sim E^{1/3}$$



~



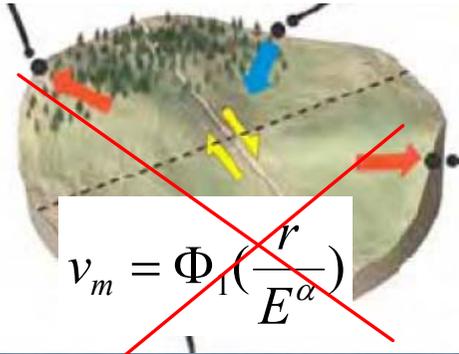
Иерархия блоков неизбежно приводит к иерархии межблоковых промежутков.



?

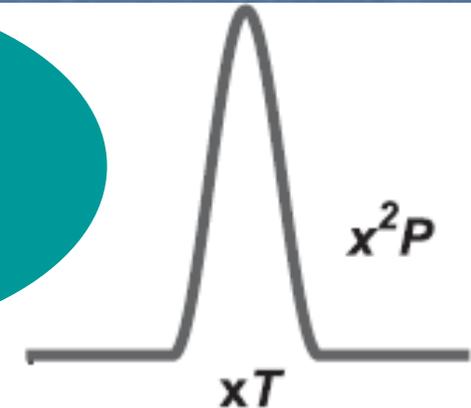
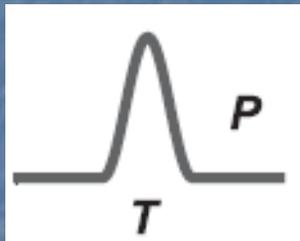


Землетрясения (подобие)



$$v_m = \Phi_1\left(\frac{r}{E^\alpha}\right)$$

$$\dot{M}_0(t)$$



Площадь источника $A \sim L^2$
 Смещение $D \approx (\Delta\sigma / \mu) \cdot L$
 Длительность $T \sim L/V_r \sim D/u$
 Момент $M_0 = \mu \cdot D \cdot A \sim \Delta\sigma \cdot L^3$
 Энергия E_s
 Приведенная энергия $e = E_s / M_0$

Площадь источника $A_B \sim X^2 A$
 Смещение $D_B = X \cdot D$
 Длительность $T_B = X \cdot T$
 Момент $M_{0B} = X^3 M_0$
 Энергия $E_{sB} = X^3 E_s$
 Приведенная энергия $e = E_{sB} / M_{0B} = const$

При подобии $\Delta\sigma, \mu, V_r, u$, - одинаковы для всех событий.

Землетрясения (самоподобие)

$$\dot{M}_0(t)$$

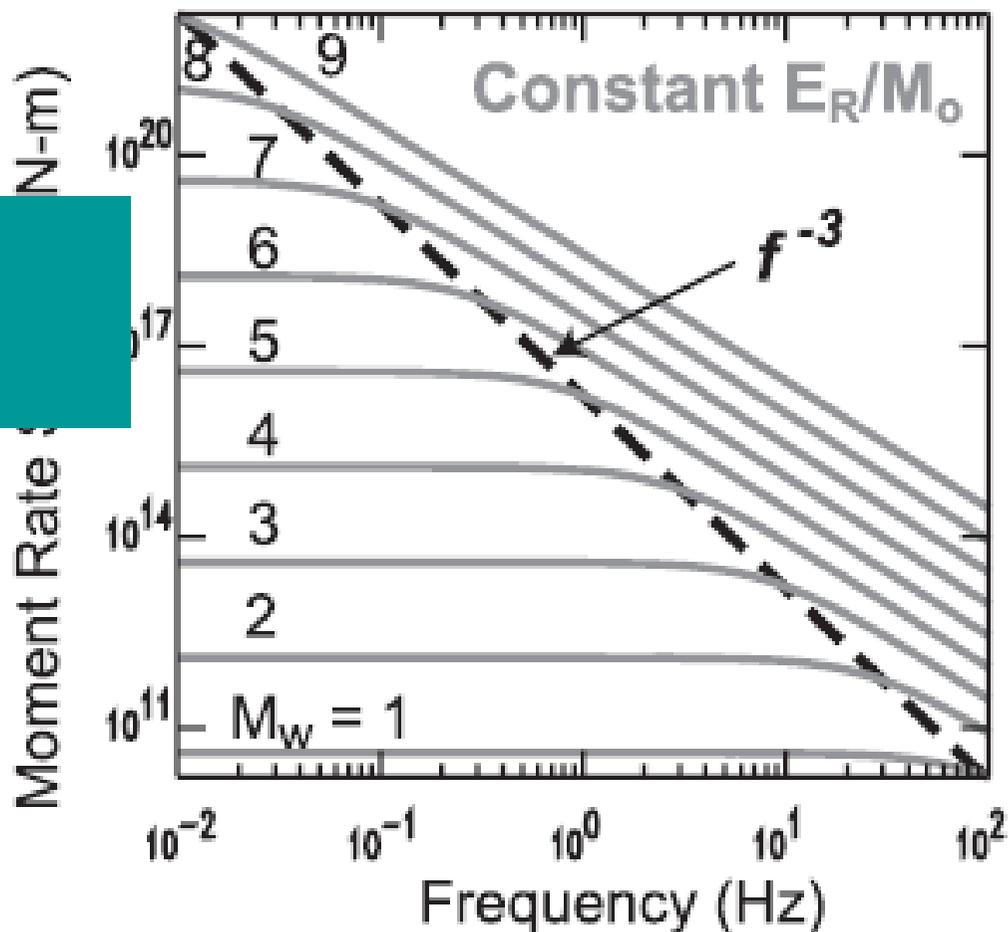


Площадь
Смещение
Длительность

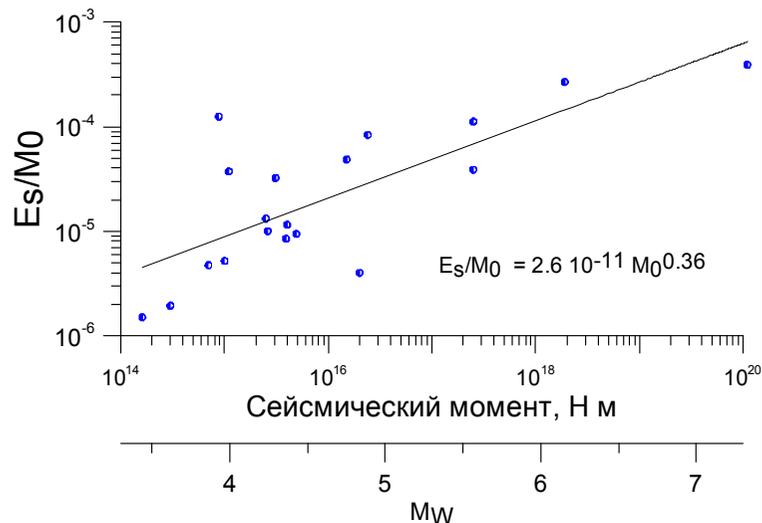
Аки, 1967

Гипотеза подобия

Момент $M_0 = \mu \cdot D \cdot A \sim \Delta\sigma \cdot L^3$
 Энергия E_s
 Приведенная энергия $e = E_s / M_0$



При подобии $\Delta\sigma, \mu, V_r, u,$



Канамори, 1993 – приведенная энергия растет с масштабом.

Причины:

1. Физика (?)
2. Плохо измеряют энергию (?).



Подобие

Aki, 1967; Choy, Boatwright, 1995; Ide and Beroza, 2001; Ide et al., 2003; Yamada et al.; Kwiatek et al., 2011

Нет подобия

Kanamori et al., 1993; Abercrombie, 1995; Mayeda, Walter, 1996; Mayeda et al., 2005; Gao, 2013;

1. Масштабный эффект при разломообразовании



Соотношения между геометрическими параметрами разломов

$$W = \alpha \cdot D^a$$

$$D = \beta \cdot L^b$$

$$W = \chi \cdot L^c$$

L- длина разлома

W – ширина

D - амплитуда
смещения

$a, b, c \sim 1$

«Сформировавшиеся» разломы:

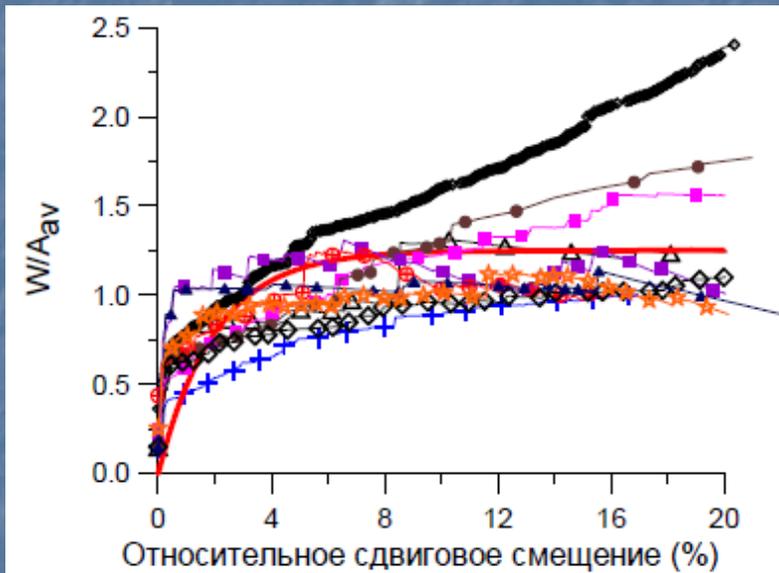
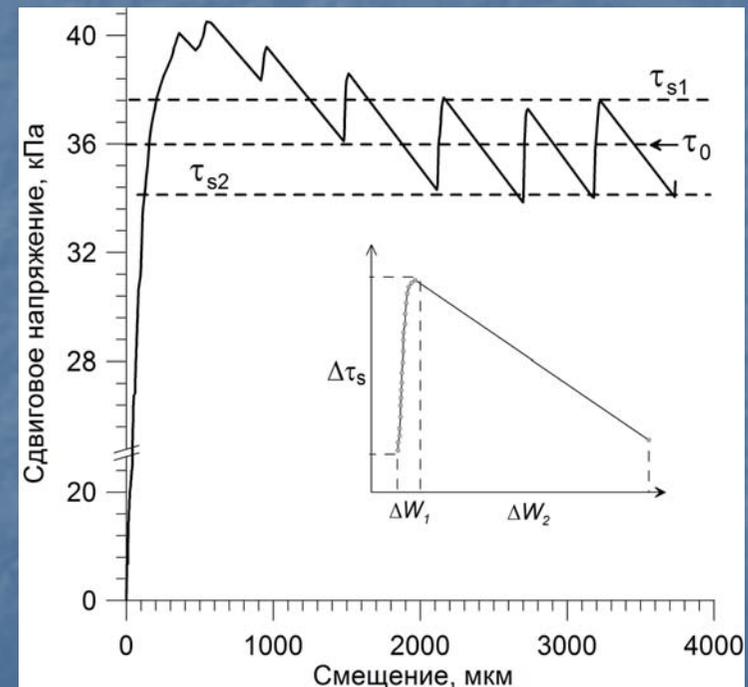


Рис. 4. Зависимость средней приведенной ширины «зоны разрушения» от амплитуды сдвига. Величина перемещения нормирована на длину трещины. Разными значками показаны резуль-



$$D > 0.05L^{2/3} \quad (*)$$

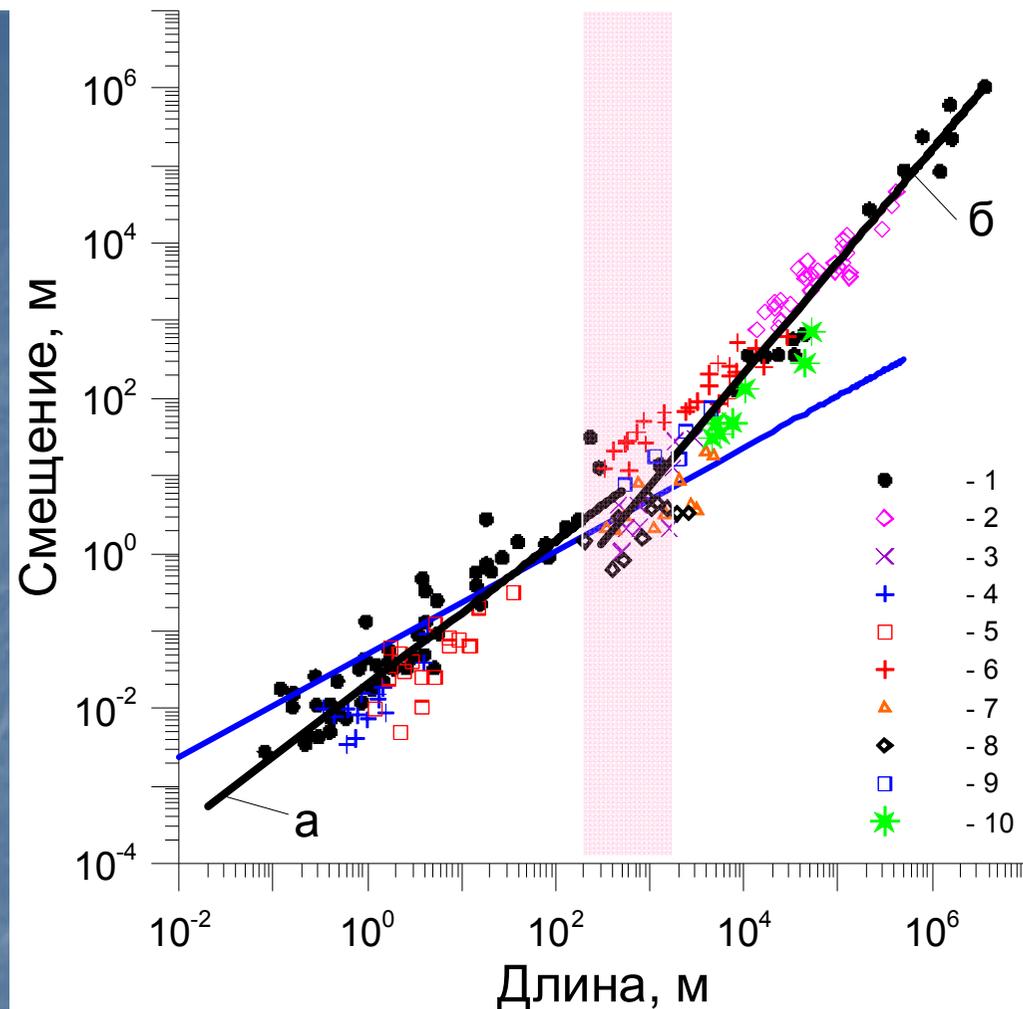
Условие для сформировавшихся»
разломов:

$$D > 0.05L^{2/3} \quad (*)$$

1 – [Ruzhich, Sherman, 1978]; 2 – [Elliott, 1976]; 3 – [Krantz, 1988]; 4 – [Muraoka, Kamata, 1983]; 5 – [Peacock, Sanderson, 1991]; 6 – [Villemin et al., 1995]; 7 – [Walsh, Watterson, 1987]; 8–10 – [Watterson, 1986].

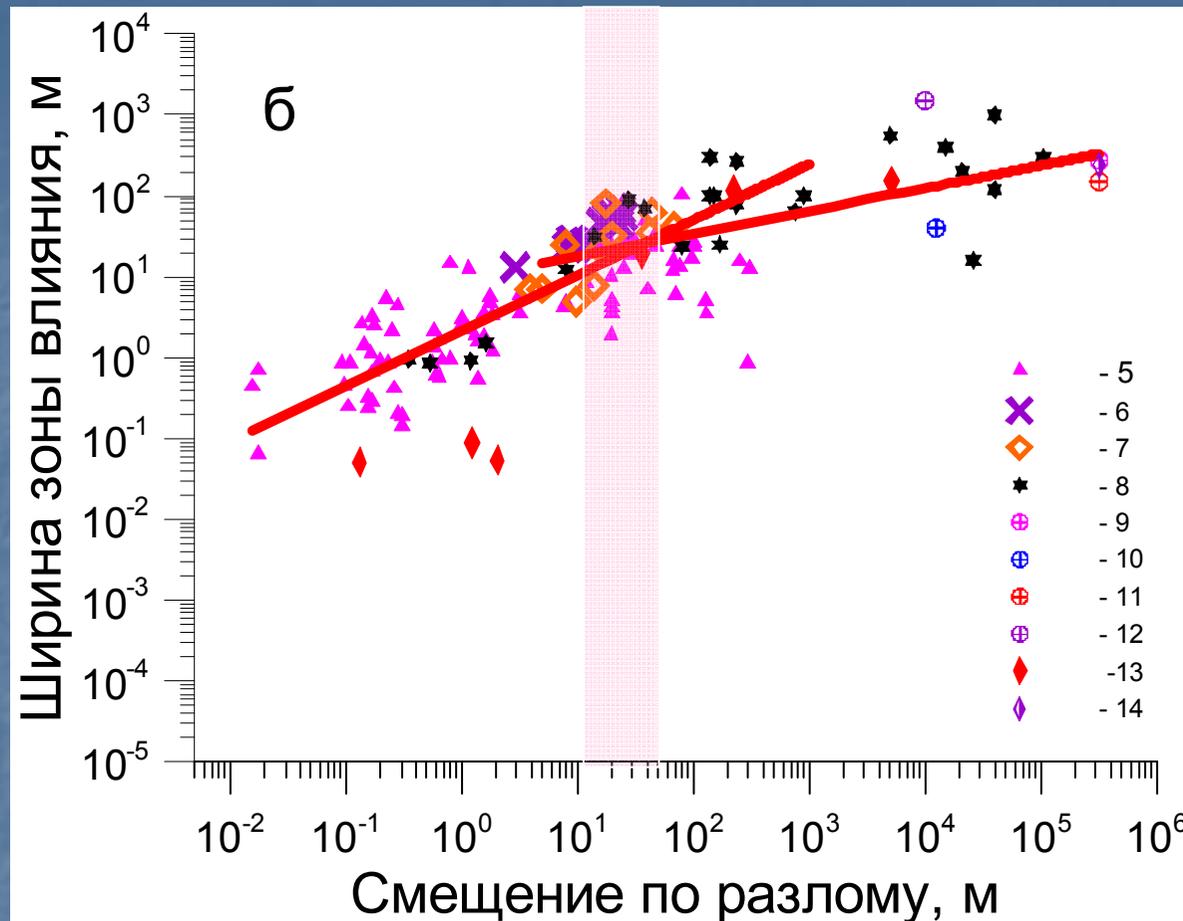
$$D = 0.02 \cdot L^{0.93} \quad (a) \quad R=0.83$$

$$D = 3 \cdot 10^{-4} \cdot L^{1.45} \quad (б) \quad R=0.91$$



Зависимость максимального смещения по разлому от его длины.

Синяя линия – соотношение (*); черные линии – наилучшее приближение данных в диапазоне $L < 500$ м (а) и $L > 500$ м (б). В первом интервале для значительной части данных не выполняется условие (*), т.е. разломы нельзя считать сформировавшимися.



5 – [Beach et al., 1999]; 6 – [Shipton, Cowie, 2001]; 7 – [Fossen, Hesthammer, 2000]; 8 – [Savage, Brodsky, 2011]; 9 – [Bradbury et al., 2007]; 10 – [Heermance et al., 2003]; 11 – [Li et al., 2004]; 12 – [Cochran et al., 2009]; 13 – [Mitchell, Faulkner, 2009]; 14 – [Zoback et al., 2008].

$D < 10-100\text{м}$

$$W = 2.18 \cdot D^{0.68}$$

$R=0.66$

$D > 10-100\text{м}$

$$W = 8.94 \cdot D^{0.29}$$

$R=0.3$

Зависимость ширины зоны влияния от амплитуды перемещения по разлому.

В области больших амплитуд перемещений в сформировавшихся разломных зонах их ширина растет существенно медленнее, чем при небольших перемещениях.

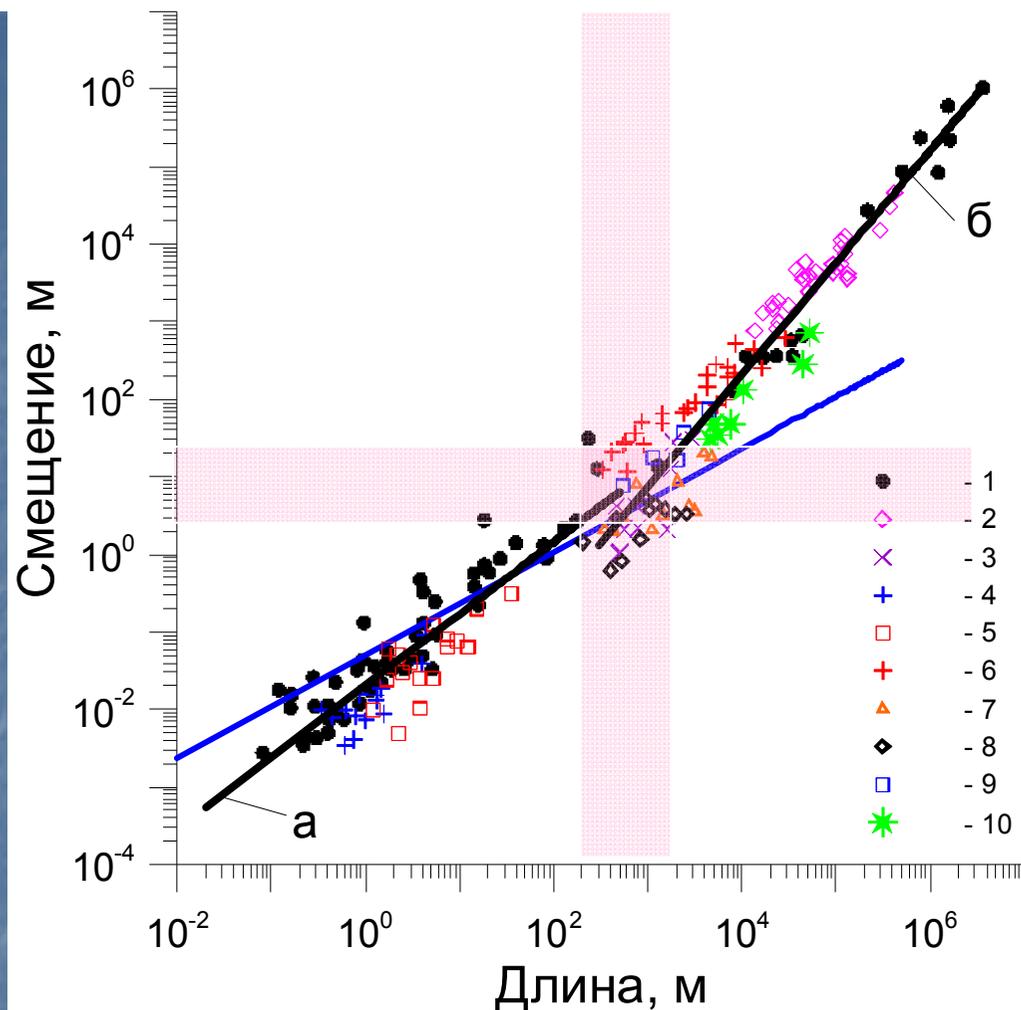
Условие для сформировавшихся»
разломов:

$$D > 0.05L^{2/3} \quad (*)$$

1 – [Ruzhich, Sherman, 1978]; 2 –
[Elliott, 1976]; 3 – [Krantz, 1988];
4 – [Muraoka, Kamata, 1983]; 5 –
[Peacock, Sanderson, 1991]; 6 –
[Villemin et al., 1995]; 7 – [Walsh,
Watterson, 1987]; 8–10 –
[Watterson, 1986].

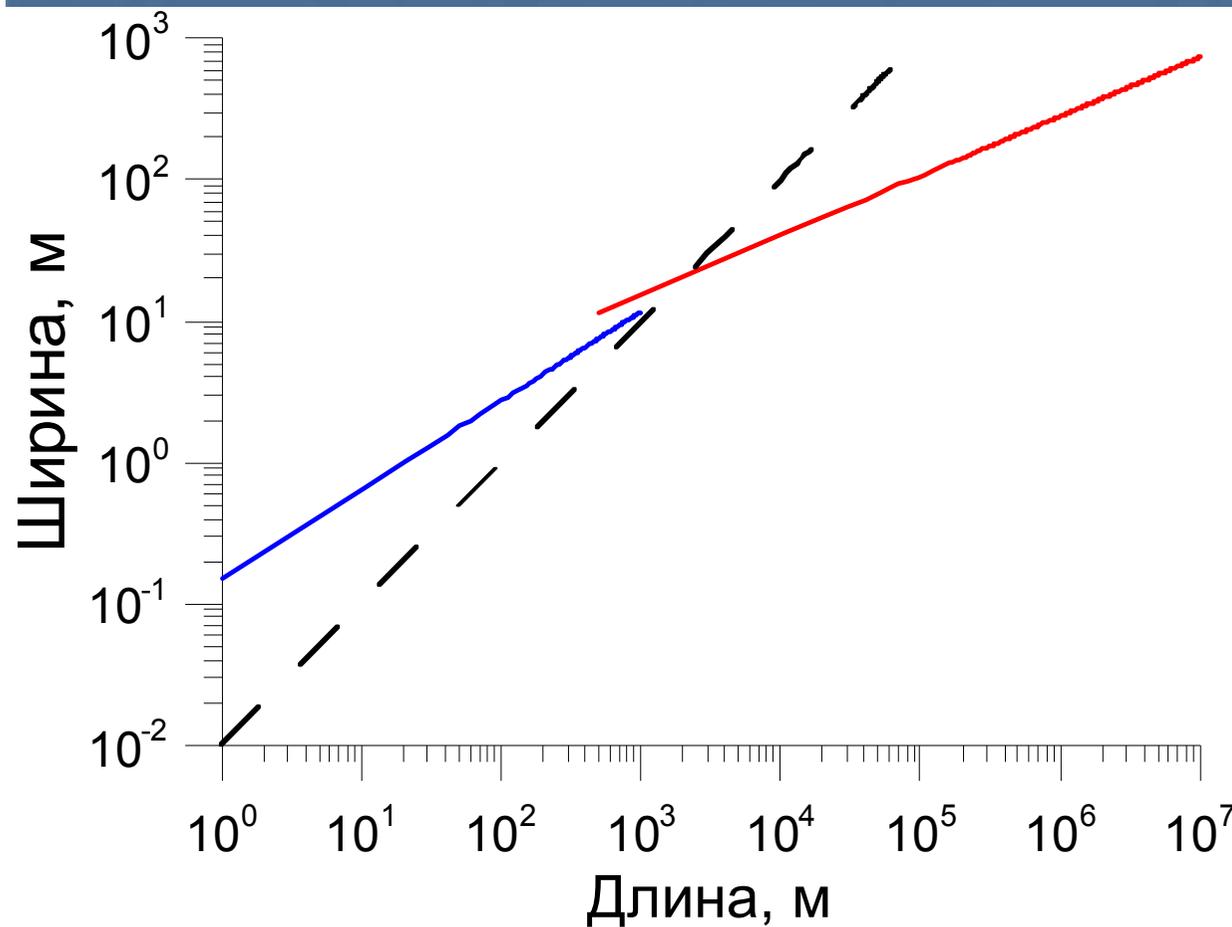
$$D = 0.02 \cdot L^{0.93} \quad (a) \quad R=0.83$$

$$D = 3 \cdot 10^{-4} \cdot L^{1.45} \quad (б) \quad R=0.91$$



Зависимость максимального смещения по разлому от его длины.

Синяя линия – соотношение (*); черные линии – наилучшее приближение данных в диапазоне $L < 500$ м (а) и $L > 500$ м (б). В первом интервале для значительной части данных не выполняется условие (*), т.е. разломы нельзя считать сформировавшимися.



$$W = \begin{cases} 0.15L^{0.63}, & L < 500 \div 1000 \text{ м} \\ 0.85L^{0.42}, & L > 500 \div 1000 \text{ м} \end{cases}$$

Независимые ряды данных дают примерно одну и ту же границу на которой происходит переход от одних масштабных соотношений к другим. Эта граница соответствует накопленному перемещению в первые десятки метров и, соответственно, длинам разломов порядка 1 км.

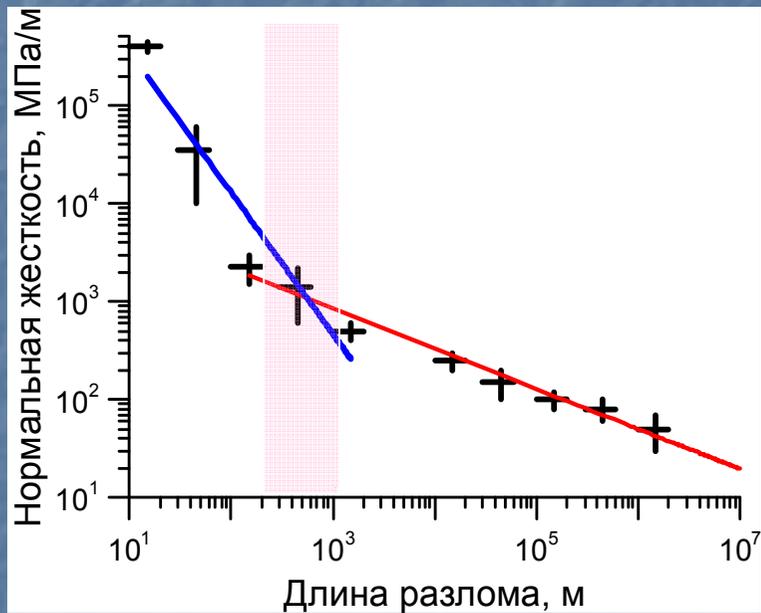
Зависимость ширины зоны влияния разлома от его длины

Пунктиром для ориентира приведена зависимость

$$W=0.01L$$

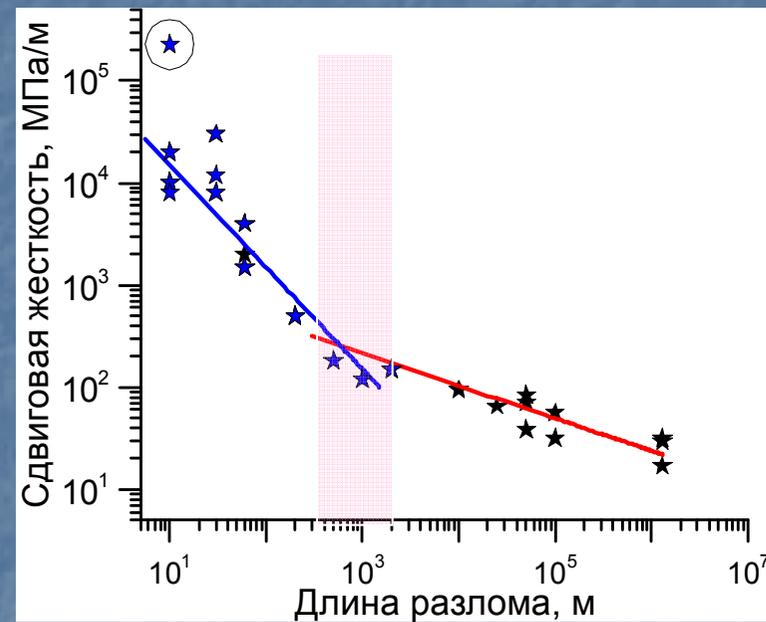
Механические характеристики разломов и трещин

При подобии: упругие модули $G - \text{const}$; жесткость $k \sim 1/L$



$$k_n = \begin{cases} (9.7) \cdot 10^{12} L^{-1.44} \text{ Па/м}, & L < 500 \div 1000 \text{ м}, \\ (1.4) \cdot 10^{10} L^{-0.41} \text{ Па/м}, & L > 500 \div 1000 \text{ м}. \end{cases}$$

Нормальная жесткость



$$k_s = \begin{cases} (1.5) \cdot 10^{11} L^{-1} \text{ Па/м}, & L < 500 \div 1000 \text{ м}, \\ (1.9) \cdot 10^9 L^{-0.32} \text{ Па/м}, & L > 500 \div 1000 \text{ м} \end{cases}$$

Сдвиговая жесткость

Промежуточные выводы

- Закономерности изменения с масштабом и геометрии разломных зон, и их механических характеристик различаются для «мелких» и «сформировавшихся» разломов.
- Переход от одних масштабных соотношений к другим происходит при длинах разломов порядка 1км, что обычно соответствует кумулятивному перемещению в первые десятки метров.

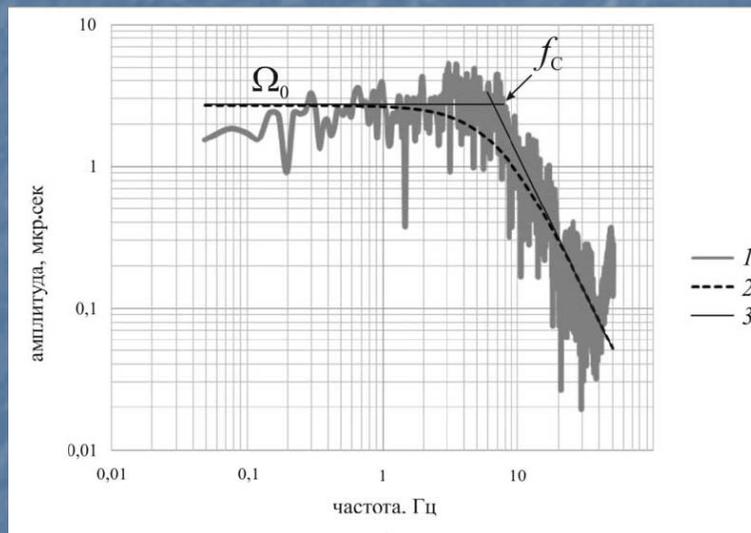
2. О подобии характеристик очагов сейсмических событий



Сейсмический момент

$$M_0 = \mu \cdot D \cdot A$$

Параметры сейсмических колебаний.



$$M_0 = \frac{4\pi \cdot r \cdot v_p^3 \rho \cdot \Omega_0}{\Theta \cdot K}$$

Величина сейсмического момента не зависит от скорости распространения разрыва в очаге !!!

Сейсмическая энергия

1. Сейсмическая энергия может быть вычислена путем интегрирования сейсмограммы.

$$E_s = 4\pi r^2 C_f^{-2} [r_0 q(r_0) / r q(r)]^2 \rho_0 \beta_0 \int \sum v^2 dt$$

2. Энергия оценивается через энергетический класс:

$$\lg E_{cK} = K$$

$$K = 1.84 \cdot (\lg(A_p + A_s) + \sigma(R))$$

E_c определяется именно интенсивностью излученных волн

Данные

1. Около 2000 землетрясений
2. Глубина очага <50км
3. Характеристика масштаба – величина M_0 или M_w
4. В каталог включались только те события, для которых надежно определен M_0 (для всех с $M_w > 4.5$ www.globalcmt.org) . Для $M_w < 4.5$ расчет по спектру.
5. Размер очага для крупных событий – инверсия; для мелких – расчет по угловой частоте.
6. Энергия (E_s) – для событий с $M_w > 5$ по neic.usgs.gov для мелких событий – расчет.
7. Для событий на территории бывшего СССР использовалась величина $E_{sk} = 10^k$.

Каталог

Регион	L, km	W, km	D, m	Глубина, Mw	M0, Нм	Garvard T/2, с	CT-ht, с	T0, с	Es, Нм		
Пакистан				15	7.1	5.2E+19		1.3	48	4E+14	
Филлипины				15	6.8	2.2E+19		6.5	30	9.4E+14	
SANTA CRUZ ISLANDS				51	7.7	4.4E+20		14.4	85	2.4E+16	
Northridge A1e, California, USA				4.60		1.00E+16				1.90E+11	
Northridge A1f, California, USA		30		4.50		7.10E+15				2.60E+11	
PRINCE EDWARD ISLANDS				15	6.7	1.5E+19		1.2	60	2.4E+14	
Мексика				15	6.9	2.8E+19		7	4.5	30	9.4E+14
Iran	120			15	7.2	7.35E+19		1	20	63	4.1E+15
Kagoshimaen-hoku-seibu (Japan)	17	10		16.2	6	1.42E+18		2.5			
Yamaguchi (Japan)	16	14		15	5.8	6.71E+17		2.1			
около центральной части Чили				15	6.8	1.9E+19		5	8.7	52	1.1E+14
около Венесуэллы				15	6.9	3.1E+19		7.4	10.2	48	3.2E+14
ТО Мексика				15	6.7	1.2E+19		4.9	9.5	36	2.5E+13
KERMADEC ISLANDS				46	7	3.5E+19		7.7	10.8	30	2.9E+14
Colfiorito Sequence # 1 (Italy)	7.5	7.5		15	5.7	3.82E+17		1.7			
Colfiorito Sequence # 2 (Italy)	12.5	7.5		15	6	1.14E+18		2.7			
Colfiorito Sequence # 3 (Italy)	9	6			5.86	6.81E+17					
китай	175	15		16.4	7.5	2.23E+20		14.7	10.8	41	1.8E+15
индонезия				29	7	4.1E+19		8.3	9.3	46	1.1E+15
Камчатка				34	7.79	6.20E+20					3.30E+15

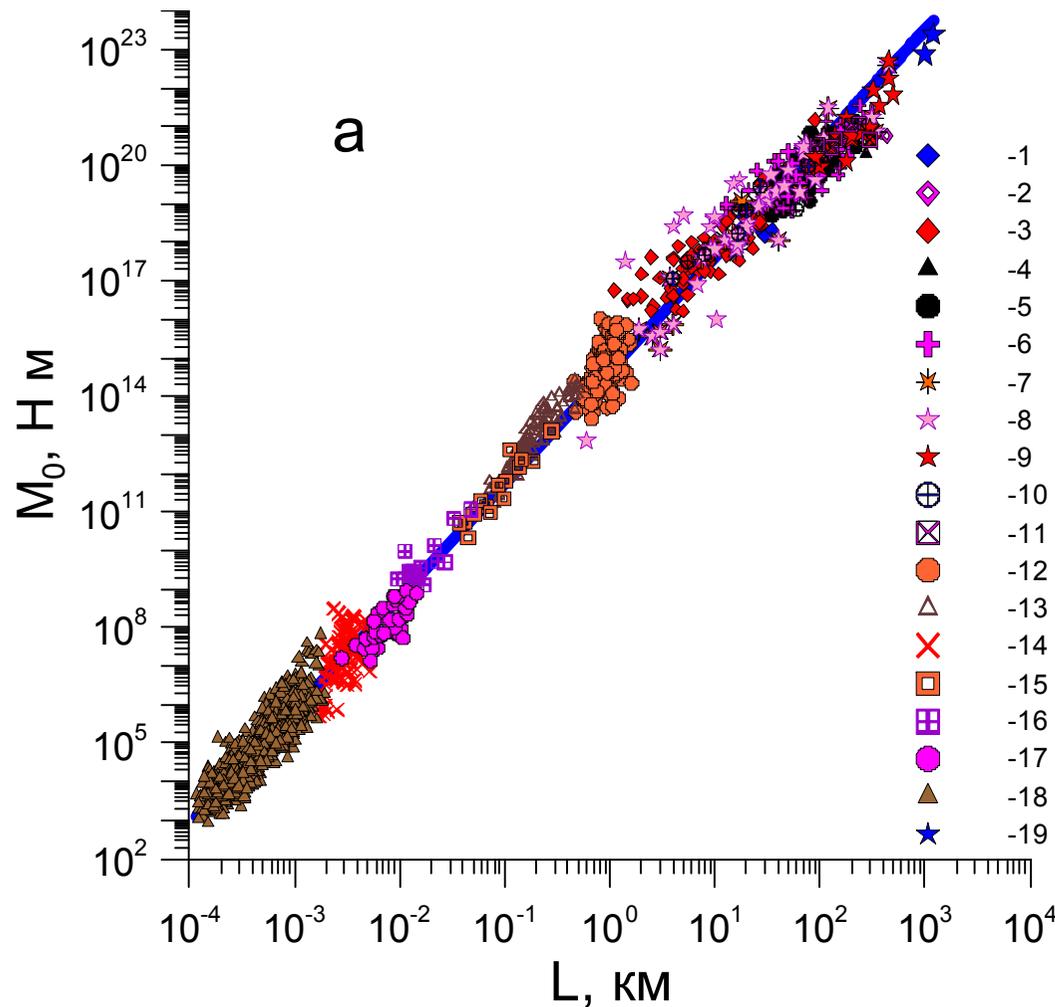
1. Worldwide

DATE	TIME	DEPTH, km	Mw	M0, H*М	Es, J	Es/M0	K	Esk	Esk/M0	Refer
07.07.87			5.23	9.00E+16			13	1.00E+13	1.11E-04	Ключевский
20.04.89	22:59:54.07	22	6.30	3.10E+18	6.00E+13	1.94E-05				BRZ
25.10.89			5.40	1.60E+17			14.3	2.00E+14	1.25E-03	Ключевский
26.10.90			5.20	7.90E+16			14.1	1.26E+14	1.59E-03	Ключевский
26.10.90	18:17:36.80	15	5.20	7.90E+16			14.1	1.26E+14	1.59E-03	BRZ
12.09.91			5.13	6.40E+16			13.6	3.98E+13	6.22E-04	Ключевский
12.09.91	00:33:30.90	32.6	5.10	6.40E+16			13.6	3.98E+13	6.22E-04	BRZ
14.02.92			5.34	1.30E+17			13.9	7.94E+13	6.11E-04	Ключевский
14.02.92	08:18:27.90	20	5.30	1.30E+17			13.9	7.94E+13	6.11E-04	BRZ
26.04.94			5.38	1.50E+17			14.7	5.01E+14	3.34E-03	Ключевский
26.04.94	18:59:30.50	17	5.40	1.50E+17			14.7	5.01E+14	3.34E-03	BRZ
21.08.94	15:56	15	6.00	1.20E+18	5.40E+12	4.50E-06	15.5	3.16E+15	2.64E-03	BRZ
29.06.95			5.74	5.20E+17			14	1.00E+14	1.92E-04	Ключевский
29.06.95	23:02:33.10	15	5.70	5.20E+17			14	1.00E+14	1.92E-04	BRZ
13.11.95	08:43:17.70	21	5.80	5.50E+17	7.10E+12	1.29E-05	15.1	1.26E+15	2.29E-03	BRZ
25.02.99	18:58:39.00	21	5.90	8.90E+17	1.60E+13	1.80E-05	14.6	3.98E+14	4.47E-04	BRZ
21.03.99	16:16	15	5.90	8.50E+17			14.5	3.16E+14	3.72E-04	BRZ
21.03.99	16:17	15	5.90	8.40E+17			14.2	1.58E+14	1.89E-04	BRZ
27.05.99	16:01:25.20	15	5.10	5.20E+16			12.7	5.01E+12	9.64E-05	BRZ
30.05.99	15:56:48.80	15	5.20	7.90E+16			13.8	6.31E+13	7.99E-04	BRZ
31.05.99	19:34:52.70	15	5.00	4.20E+16			12.6	3.98E+12	9.48E-05	BRZ
21.12.99	11:00:50.90	15	5.40	1.80E+17			13.5	3.16E+13	1.76E-04	BRZ
31.05.00	16:28	15	5.00	3.80E+17			13.4	2.51E+13	6.61E-05	BRZ
16.09.03	11:24:58.30	15	5.60	3.10E+17	7.20E+11	2.32E-06	14.3	2.00E+14	6.44E-04	BRZ
01.01.04	12:26	0.51	3.50	1.97E+14			10	1.00E+10	5.09E-05	Добрынина
02.01.04	17:11	0.52	3.54	2.27E+14			10	1.00E+10	4.41E-05	Добрынина
02.01.04	23:38	0.42	3.53	2.22E+14			9.8	6.31E+09	2.84E-05	Добрынина
03.01.04	7:23	0.35	3.05	4.20E+13			9.7	5.01E+09	1.19E-04	Добрынина
04.01.04	5:32	0.58	3.88	7.53E+14			10.7	5.01E+10	6.66E-05	Добрынина

2. Некоторые регионы России и быв. СССР (Байкал, Камчатка, Сахалин, Ср. и Ц.Азия)

	Data, Event#	Mw	M0,Nm	Es,J	Es/M0	fcHz	2R,km_Br
Yamada JPN	7/9/96	1.31	1.17E+11	4.93E+05	4.21E-06	51.9	0.0473841
Yamada JPN	8/16/96	1.15	6.74E+10	1.70E+06	2.52E-05	74.3	0.0330987
Yamada JPN	9/9/96	0.69	1.38E+10	7.53E+05	5.46E-05	115	0.0213847
Yamada JPN	5/23/96	0.59	9.62E+09	4.41E+05	4.58E-05	221	0.0111278
Yamada JPN	3/2/96	0.41	5.15E+09	3.39E+05	6.58E-05	107	0.0229835
Yamada JPN	11/4/96	0.4	4.95E+09	1.08E+05	2.18E-05	91.3	0.0269358
Yamada JPN	8/29/96	0.29	3.48E+09	1.97E+05	5.66E-05	155	0.015866
Yamada JPN	3/22/96	0.23	2.83E+09	1.43E+05	5.05E-05	180	0.0136624
Yamada JPN	3/18/96	0.23	2.74E+09	2.98E+05	1.09E-04	200	0.0122962
Yamada JPN	8/27/96	0.2	2.50E+09	2.15E+04	8.60E-06	193	0.0127422
Yamada JPN	3/22/96	0.18	2.32E+09	2.59E+05	1.12E-04	188	0.013081
Yamada JPN	3/22/96	0.13	1.96E+09	1.83E+04	9.34E-06	174	0.0141335
Yamada JPN	8/15/96	0.11	1.84E+09	5.41E+04	2.94E-05	173	0.0142152
Yamada JPN	6/1/96	0.11	1.84E+09	3.58E+04	1.95E-05	191	0.0128756
Yamada JPN	9/9/96	0.1	1.81E+09	1.25E+05	6.91E-05	220	0.0111783
Yamada JPN	8/13/96	0.1	1.78E+09	3.20E+04	1.80E-05	162	0.0151805
Yamada JPN	5/29/96	0.1	1.77E+09	5.09E+04	2.88E-05	259	0.0094951
Yamada JPN	3/19/96	0.09	1.74E+09	2.77E+04	1.59E-05	181	0.0135869
Yamada JPN	3/19/96	0.09	1.71E+09	8.49E+04	4.96E-05	197	0.0124834
Yamada JPN	2/24/96	-0.01	1.25E+09	4.31E+04	3.45E-05	145	0.0169602
Oye , Finland	1	-1.2	1.70E+07	4.00E+00	2.35E-07	261	0.0094224
Oye , Finland	2	-1.2	1.80E+07	3.30E+01	1.83E-06	492	0.0049984
Oye , Finland	3	-1.0	3.90E+07	5.80E+01	1.49E-06	363	0.0067748
Oye , Finland	4	-0.8	7.40E+07	1.50E+01	2.03E-07	149	0.0165049
Oye , Finland	5	-0.8	8.20E+07	1.50E+01	1.83E-07	141	0.0174414
Oye , Finland	6	-0.8	8.40E+07	3.90E+01	4.64E-07	189	0.0130118
Oye , Finland	7	-0.8	8.50E+07	5.40E+01	6.35E-07	207	0.0118804
Oye , Finland	8	-0.7	1.04E+08	2.00E+01	1.92E-07	134	0.0183525
Oye , Finland	9	-0.7	1.11E+08	3.40E+01	3.06E-07	153	0.0160734
Oye , Finland	10	-0.6	1.82E+08	2.50E+02	1.37E-06	212	0.0116002
Oye , Finland	11	-0.5	2.28E+08	8.90E+01	3.90E-07	128	0.0192128
Oye , Finland	12	-0.5	2.39E+08	5.31E+02	2.22E-06	223	0.011028
Oye , Finland	13	-0.4	2.95E+08	5.43E+02	1.84E-06	200	0.0122962
Oye , Finland	14	-0.3	4.12E+08	5.47E+02	1.33E-06	159	0.0154669
Oye , Finland	15	-0.3	5.20E+08	7.12E+02	1.37E-06	149	0.0165049
Oye , Finland	16	-0.2	6.32E+08	8.42E+02	1.33E-06	137	0.0179506
Oye , Finland	17	-0.2	6.54E+08	1.32E+03	2.02E-06	158	0.0155648
Oye , Finland	18	-0.2	6.58E+08	1.24E+03	1.88E-06	155	0.015866
Oye , Finland	19	-0.1	8.73E+08	1.06E+03	1.21E-06	120	0.0204936

3. Микрособытия – индуцированная сейсмичность и афтершоки

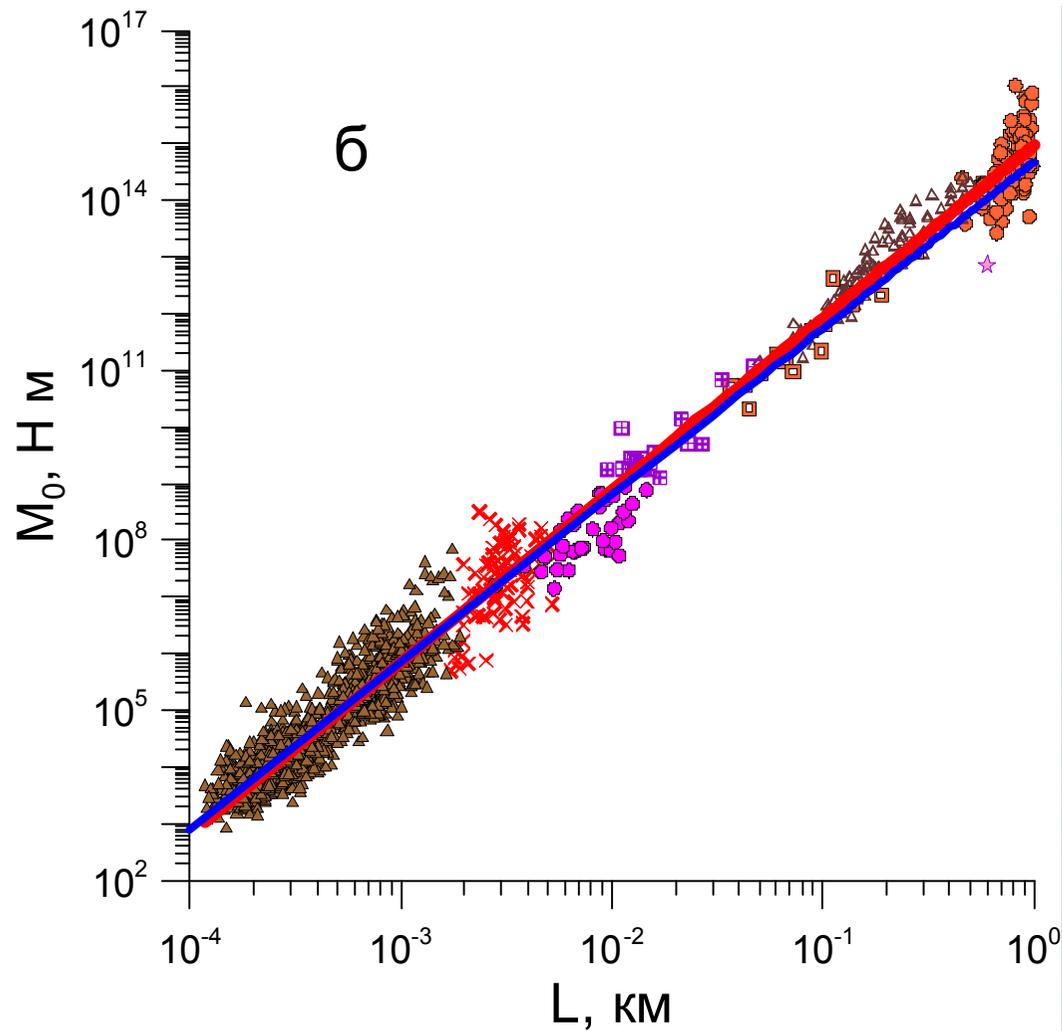


$$M_0 = 4.78 \cdot 10^{14} \cdot L^{2.94}$$

R=0.98

1- [Mai, Beroza, 2000]; 2-[Hanks, Bakun, 2008]; 3- [Wells, Coppersmith, 1994]; 4- [Scholz, 1982]; 5- [Romanowicz, Ruff, 2002]; 6- [Henry, Das, 2001]; 7- [<http://www.seismo.ethz.ch/>]; 8- [Manighetti et al., 2007]; 9- [<http://earthquake.usgs.gov/>]; 10- [Mayeda, Walter, 1996]; 11- [Venkataraman, Kanamori, 2004]; 12- [Dobrynina, 2011]; 13- [Domanski, Gibowicz, 2008]; 14- [Urbancic, Young, 1993]; 15- [Ide et al, 2003]; 16- [Yamada et al. 2007]; 17- [Oye et al., 2005]; 18- [Kwiatek et al., 2011]; 19- [Kanamori, Andersson, 1975]

Зависимость величины сейсмического момента от линейного масштаба события

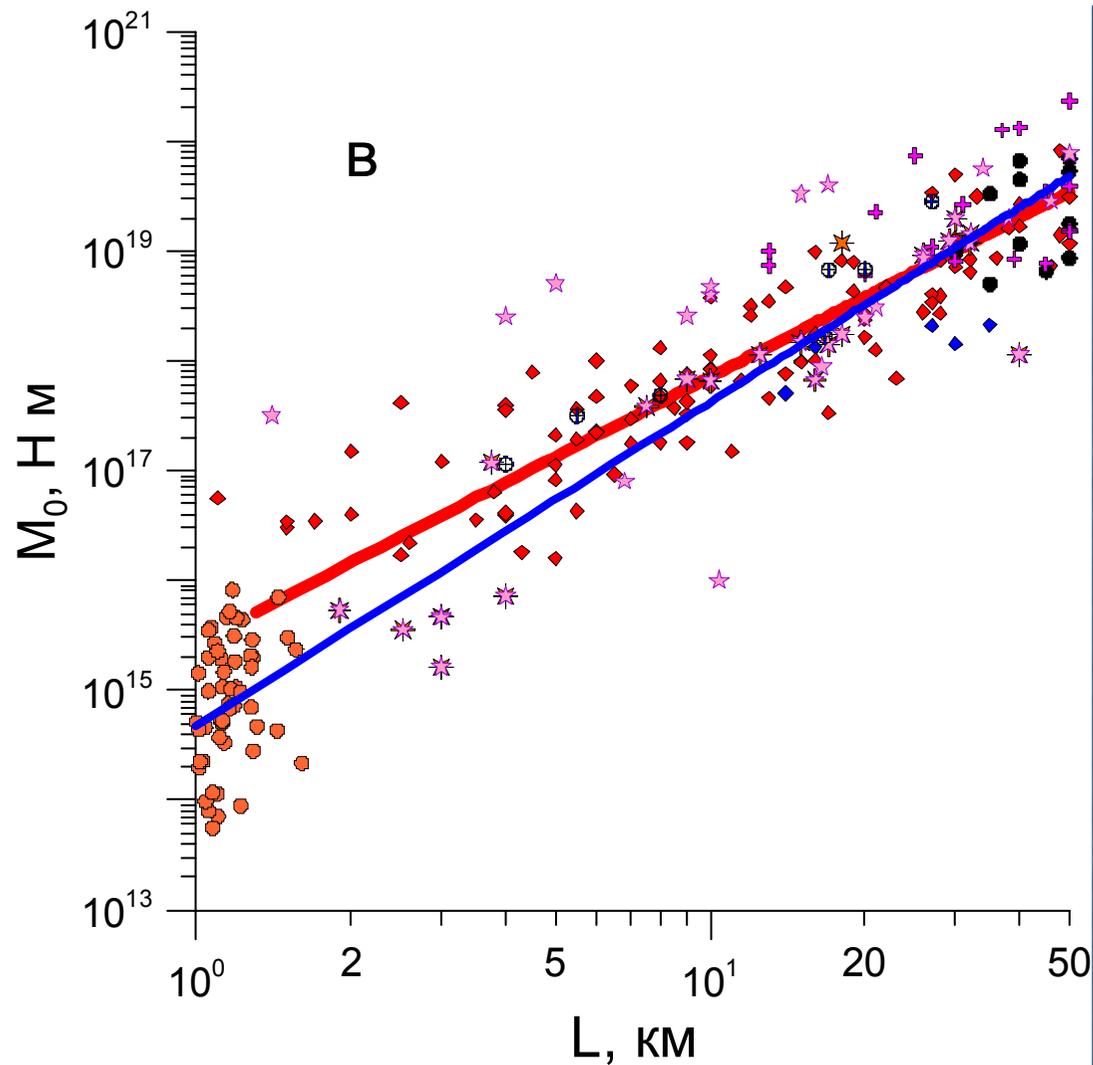


$$-4 < M_w < 3.5 \div 4$$

$$M_0 = 9.2 \cdot 10^{14} \cdot L^{3.0}$$

$$R=0.98$$

Зависимость величины сейсмического момента от линейного масштаба события



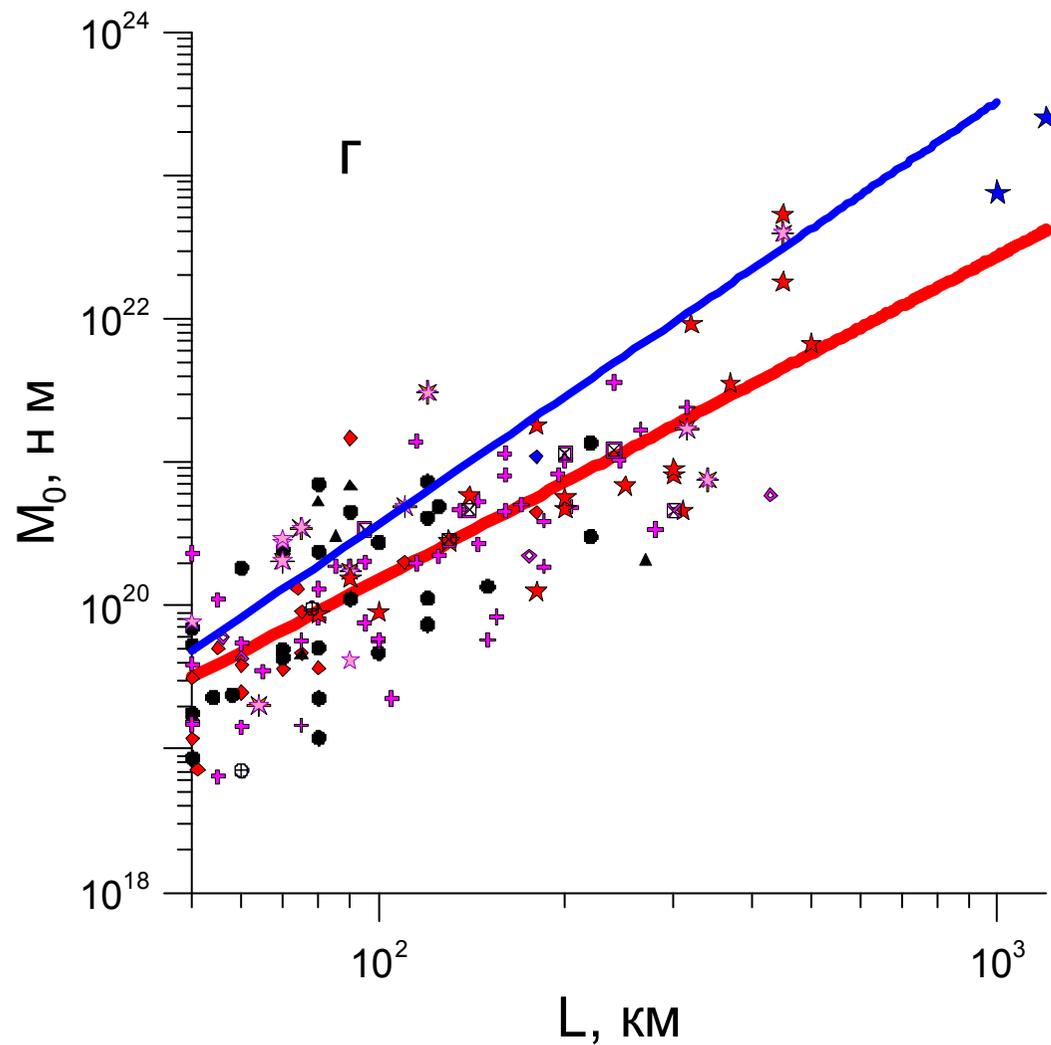
$$3.5 \div 4 < M_w < 7$$

$$M_0 = 2.90 \cdot 10^{15} \cdot L^{2.39}$$

$$R=0.87$$

Зависимость величины сейсмического момента от линейного масштаба события

Снова – подобие выполняется до характерного размера $L \sim 1$ км



$M_w > 7$

$$M_0 = 4.57 \cdot 10^{15} \cdot L^{2.26}$$

$R=0.63$

Зависимость величины сейсмического
момента от линейного масштаба события

Связь сейсмического момента (моментной магнитуды) с геометрией очага.

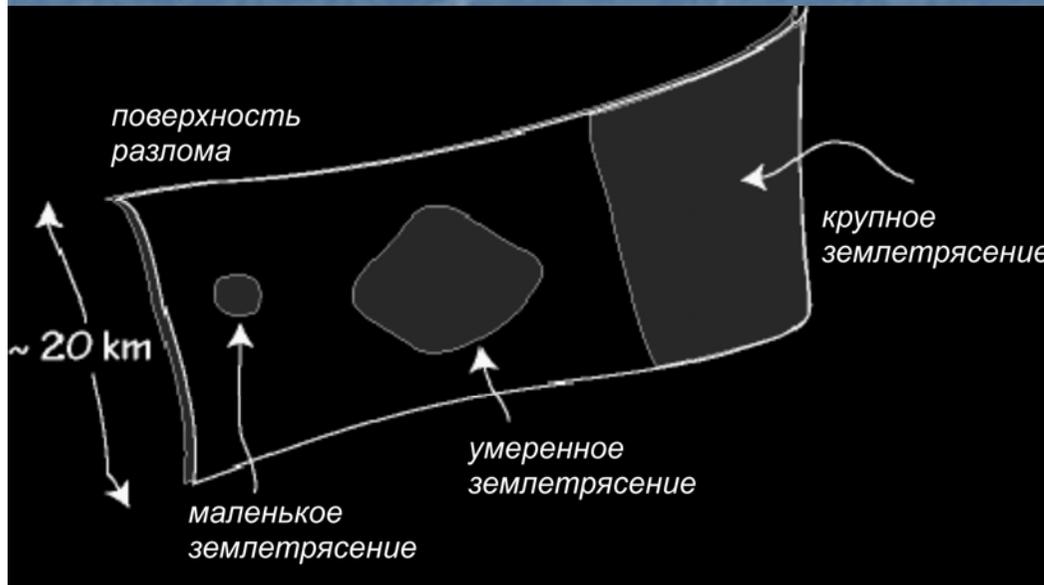
В предположении самоподобия:

а) Мелкие события (линейный размер <15-20км)

$$M_0 \sim L^3$$

б) Крупные события ($M_w > 7-7.5$)

$$M_0 \sim L^2$$



Энергия - момент

Приведенная энергия:

В предположении подобия

$$e = E_s / M_0 = const$$

В противном случае:

$$e = \Phi(M_0); \Phi'(M_0) > 0$$

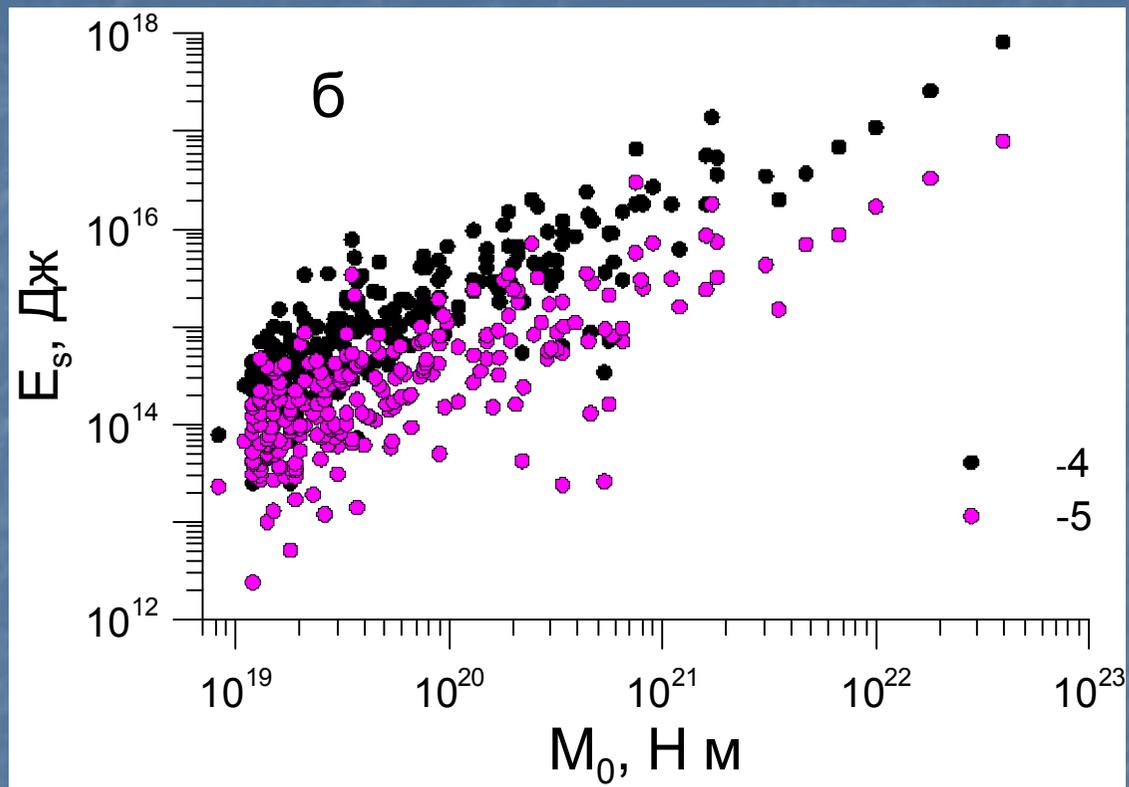
$$\frac{E_s}{M_0} = \frac{2}{\rho C_s^5} M_0 f_0^3 = \frac{2\mu D \cdot L^2 V_r^3}{\rho C_s^5 L^3} \approx \frac{2\mu}{\rho C_s^2} \frac{D}{L} \frac{V_r^3}{C_s^3}$$

$$\mu / \rho C_s^2 \sim 1$$

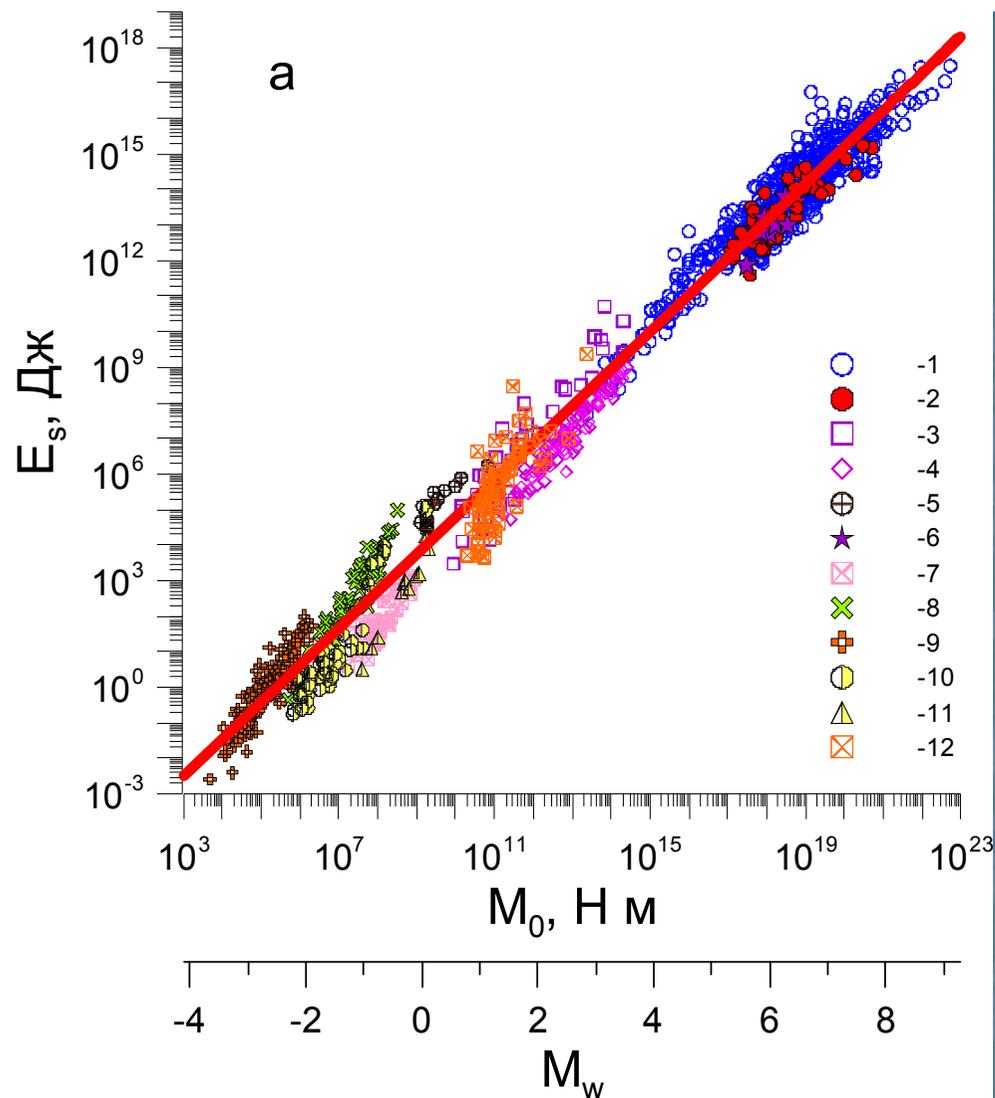
$$D / L \approx 5 \cdot 10^{-4}$$

$$\left(\frac{V_r}{C_s}\right)_{\max} \leq 1$$

$$E_s / M_0 < \sim 10^{-3}$$



Расчет сейсмической энергии одних и тех же событий по результатам обработки широкополосных и короткопериодных датчиков по данным [Convers and Newton, 2011]; 4- широкополосные датчики; 5 – короткопериодные, отфильтрованные в диапазоне 0,5-2Гц.



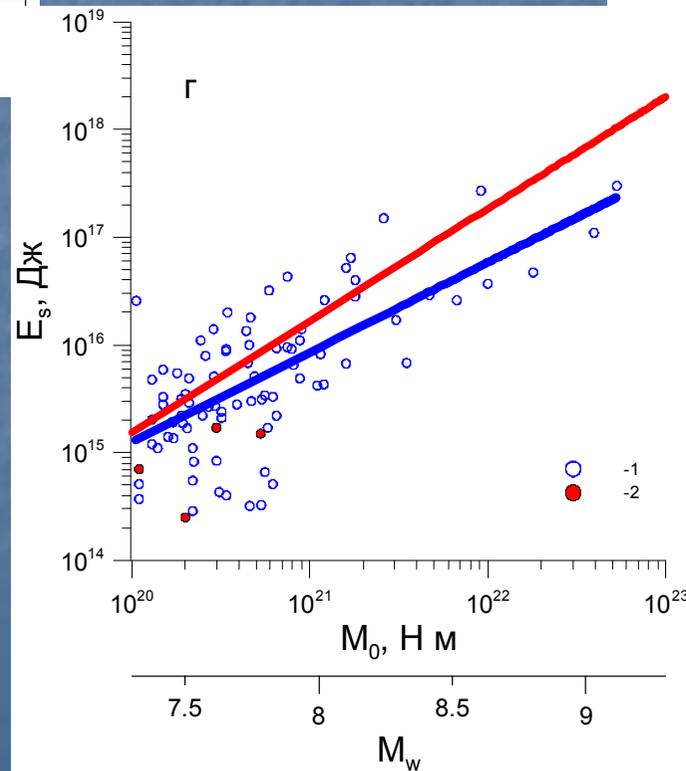
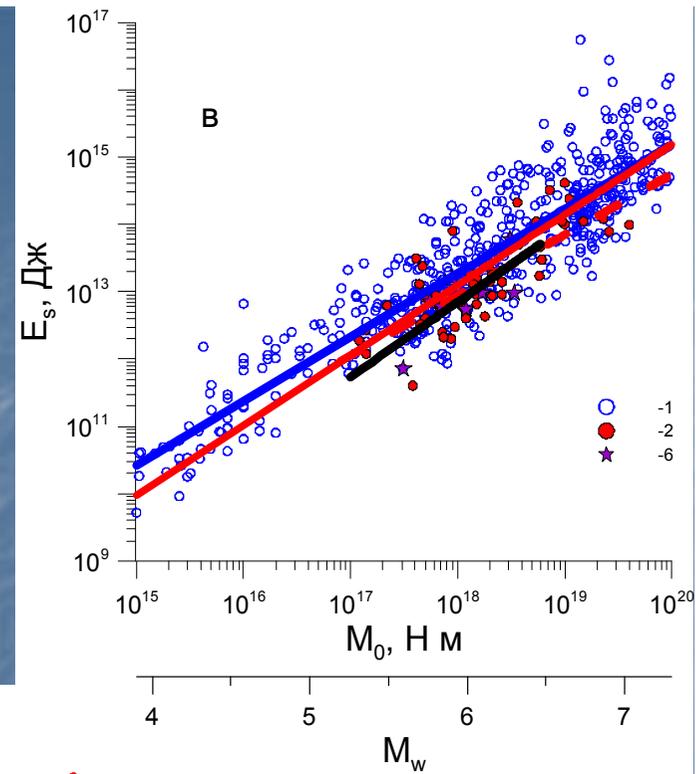
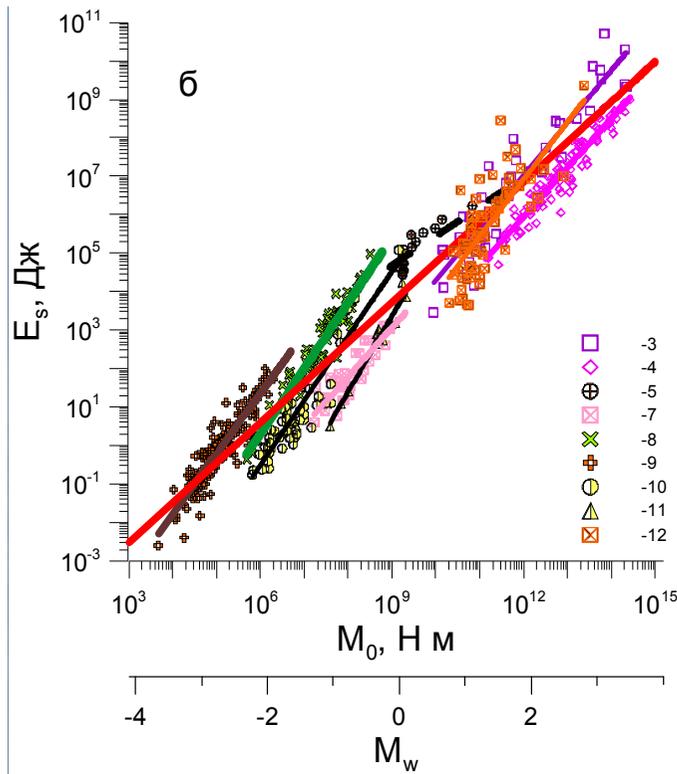
1- [www.globalcmt.org] и [neic.usgs.gov]; 2 – Камчатка [www.emsd.ru]; 3- [*Ide et al*, 2003]; 4- [*Domański, Gibowicz*, 2008]; 5- [*Yamada et al.*, 2007]; 6- БРЗ [neic.usgs.gov]; 7- [*Oye et al.*, 2005]; 8- [*Urbancic, Young*, 2003]; 9 – [*Gibowicz et al*, 1991]; 10, 11 – СУБР [*Malovichko & Malovichko*, 2010]; 12 – [*Stork, Ito*, 2004]

$N=1308$

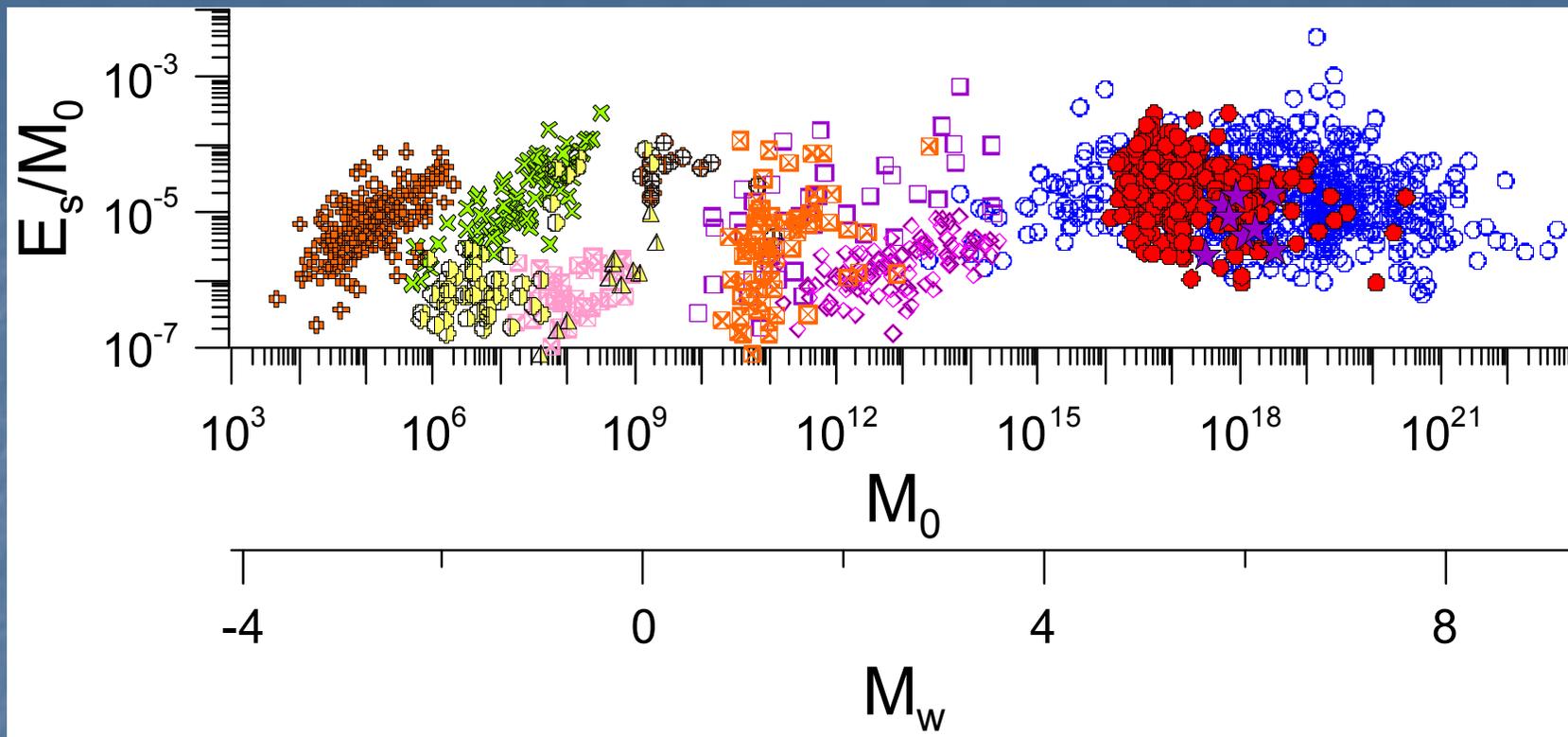
$$E_s = 2.33 \cdot 10^{-6} \cdot M_0^{1.04}$$

$R=0.99$

Зависимость сейсмической энергии от величины сейсмического момента.



$$E_s \sim M_0^{0.8}$$

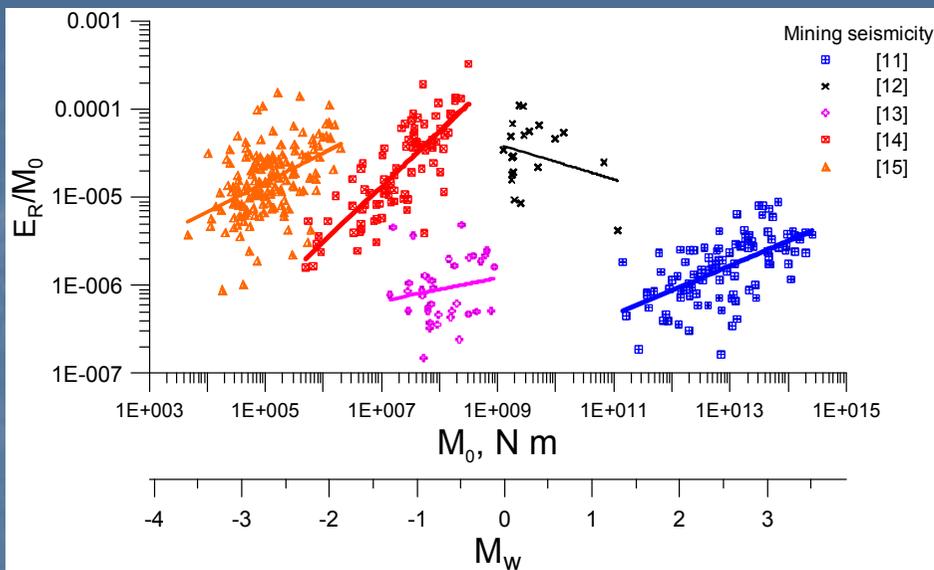


Зависимость приведенной сейсмической энергии от масштаба события.

$$\bar{e} = 2.82 \cdot 10^{-5}$$

N=1308

Шахтная сейсмичность



$$\frac{E_s}{M_0} \sim M_0^{0.33}$$

$$\frac{E_s}{M_0} \sim M_0^{0.28}$$

$$\frac{E_s}{M_0} \sim M_0^{0.13}$$

$$\frac{E_s}{M_0} \sim M_0^{0.63}$$

$$\frac{E_s}{M_0} \sim \text{const}$$

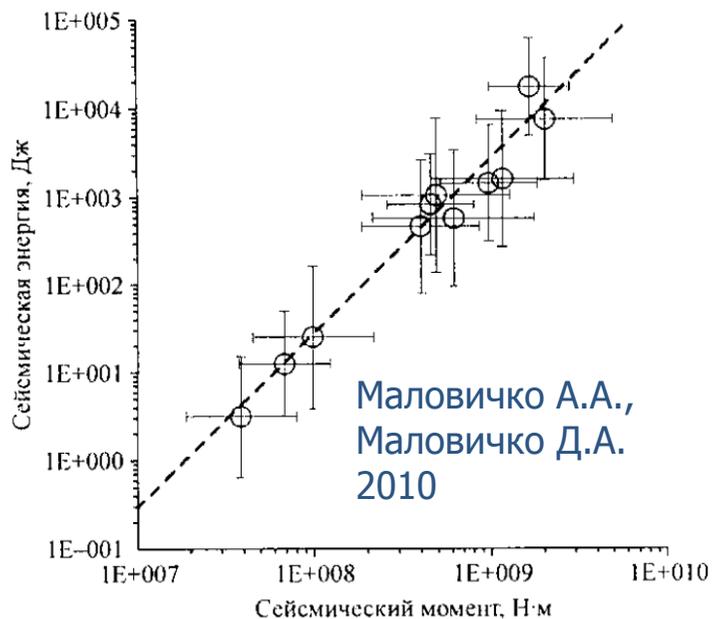
[Gibowicz et al., 1991],

[Domański, Gibowicz, 2008]

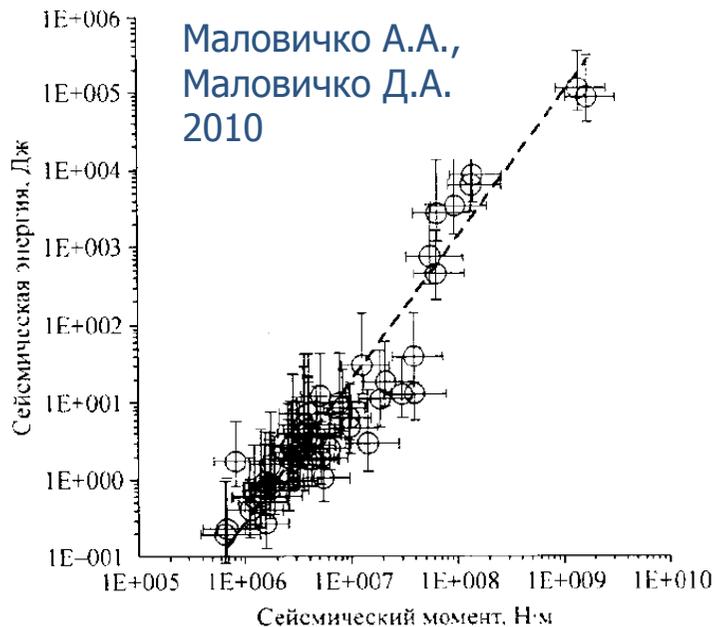
[Oye et al. 2005],

[Urbancic, Young, 1993]

Kwiatek et al. 2011



Маловичко А.А.,
Маловичко Д.А.
2010



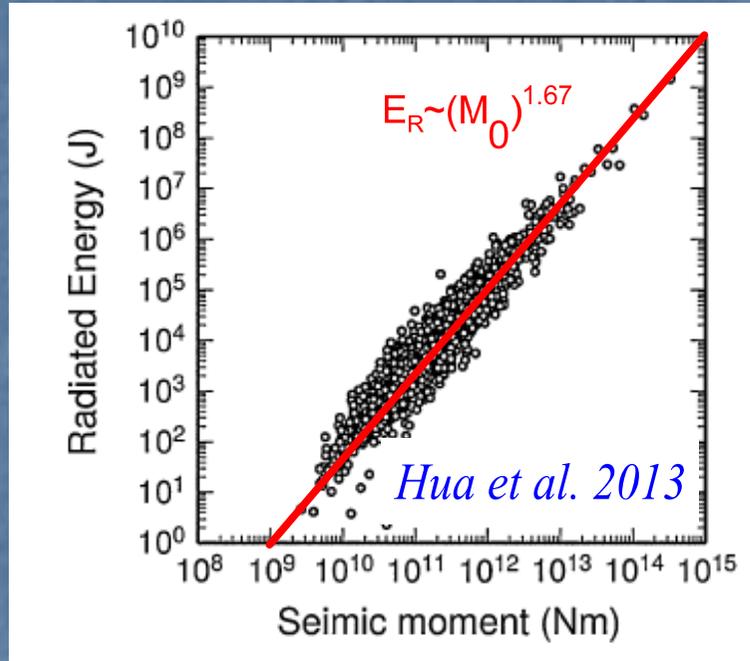
Маловичко А.А.,
Маловичко Д.А.
2010

СУБР:

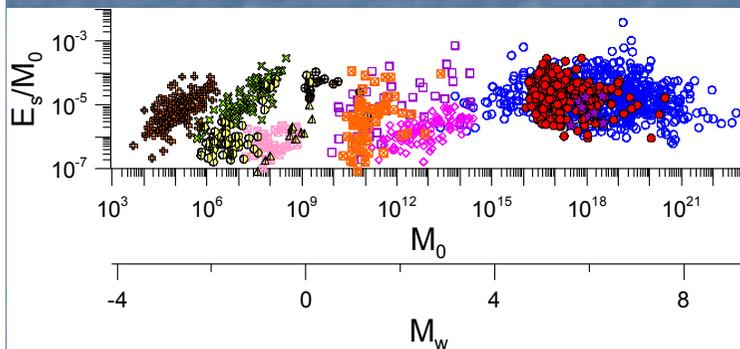
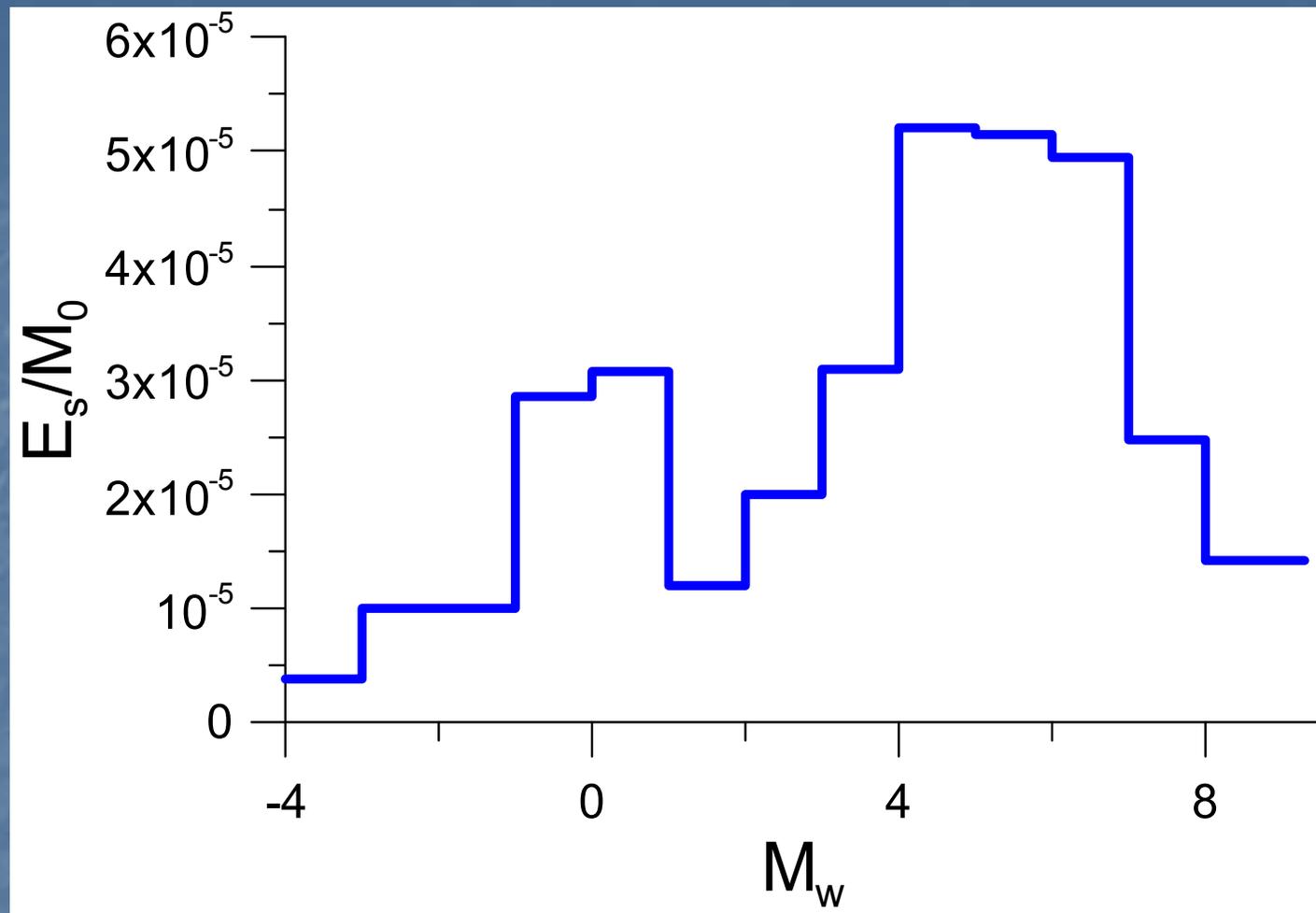
$$E_R \sim M_0^{1.9}$$

$$\frac{E_s}{M_0} \sim M_0^{0.9}$$

Сейсмичность, наведенная заполнением водохранилищ



$$\frac{E_s}{M_0} \sim M_0^{0.67}$$



Зависимость величины приведенной энергии от моментной магнитуды события

3. Энергетический класс и сейсмическая энергии землетрясения

$$K_E = 1.84 \cdot (\lg(A_P + A_S) + \sigma(R))$$

$$M = \frac{K_E - 4}{1.8}$$

$$E_{sk} = 10^K$$

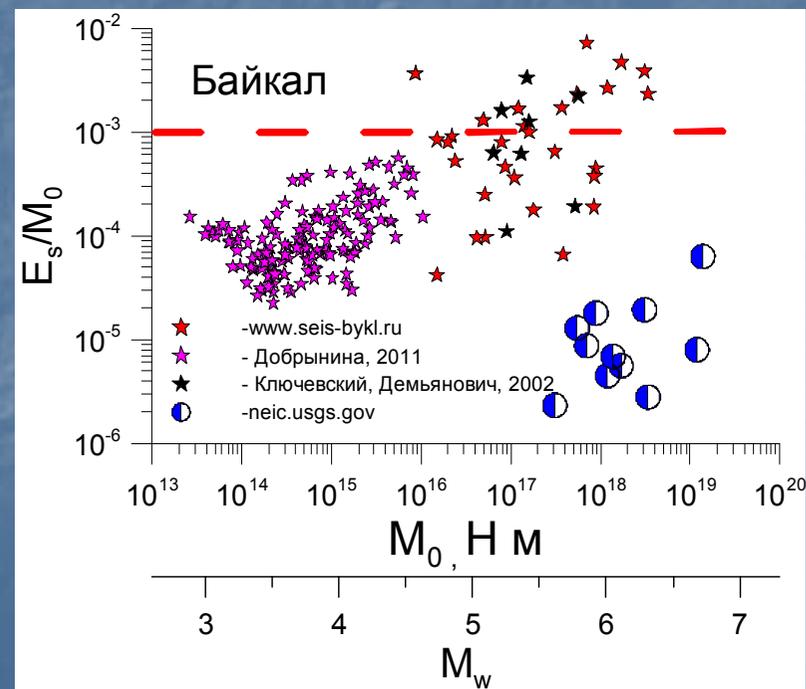
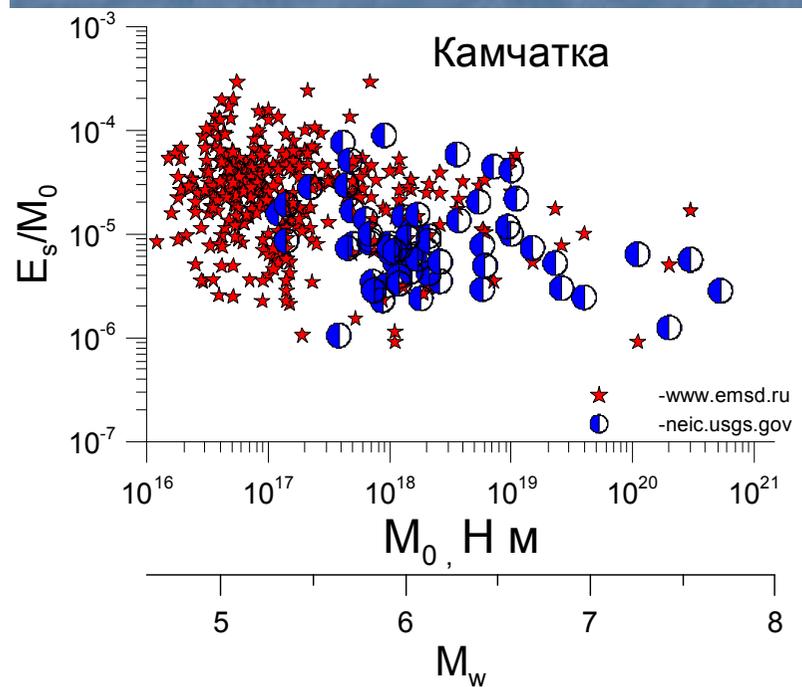
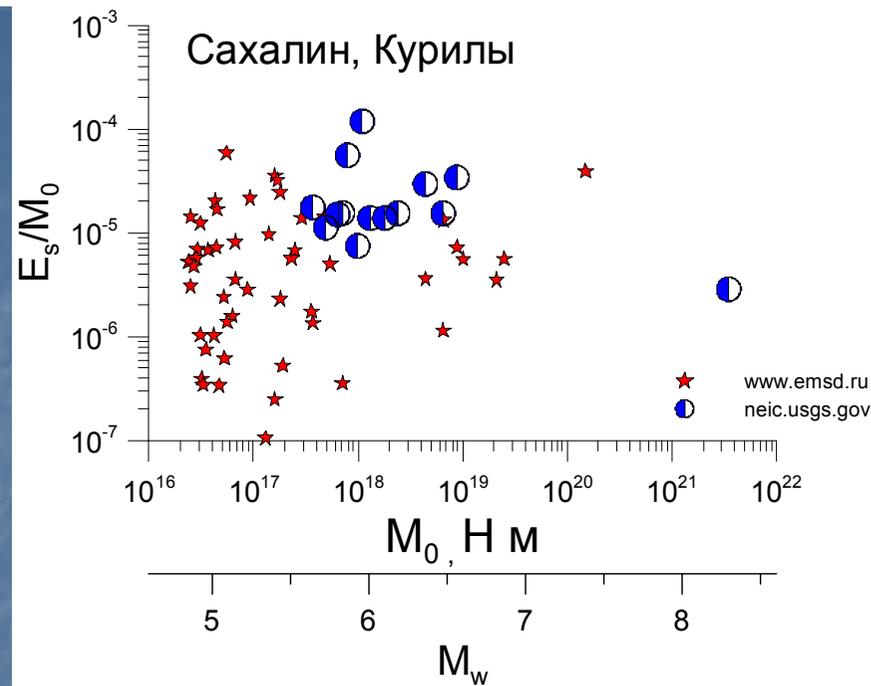
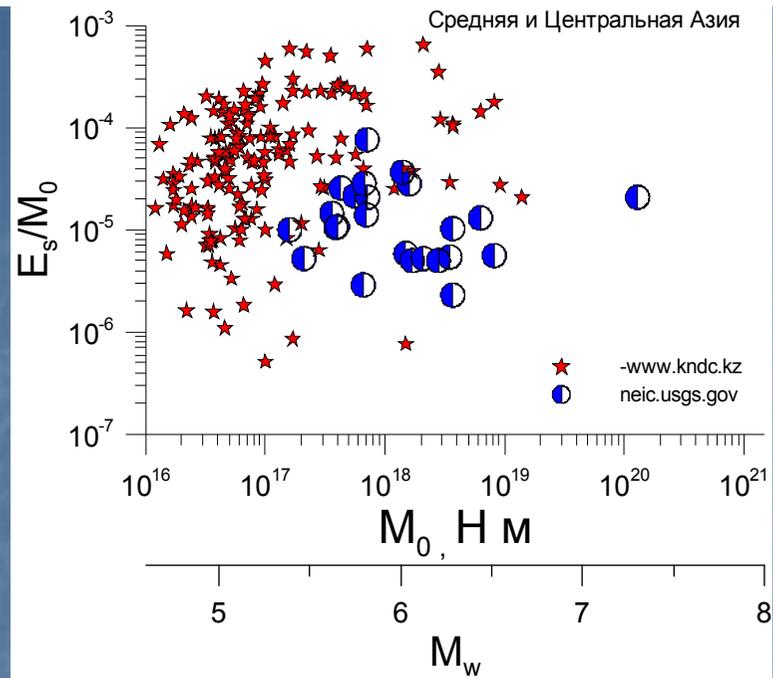
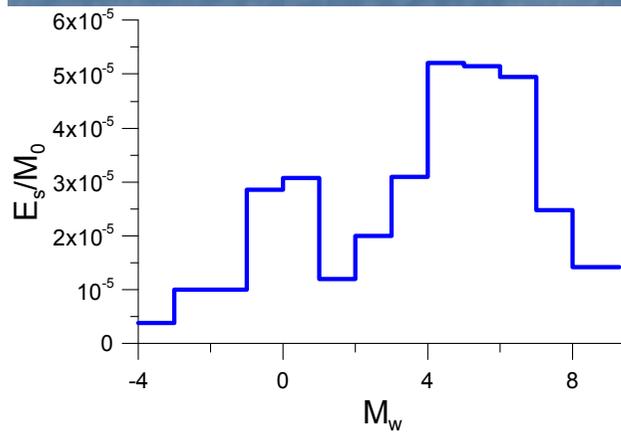
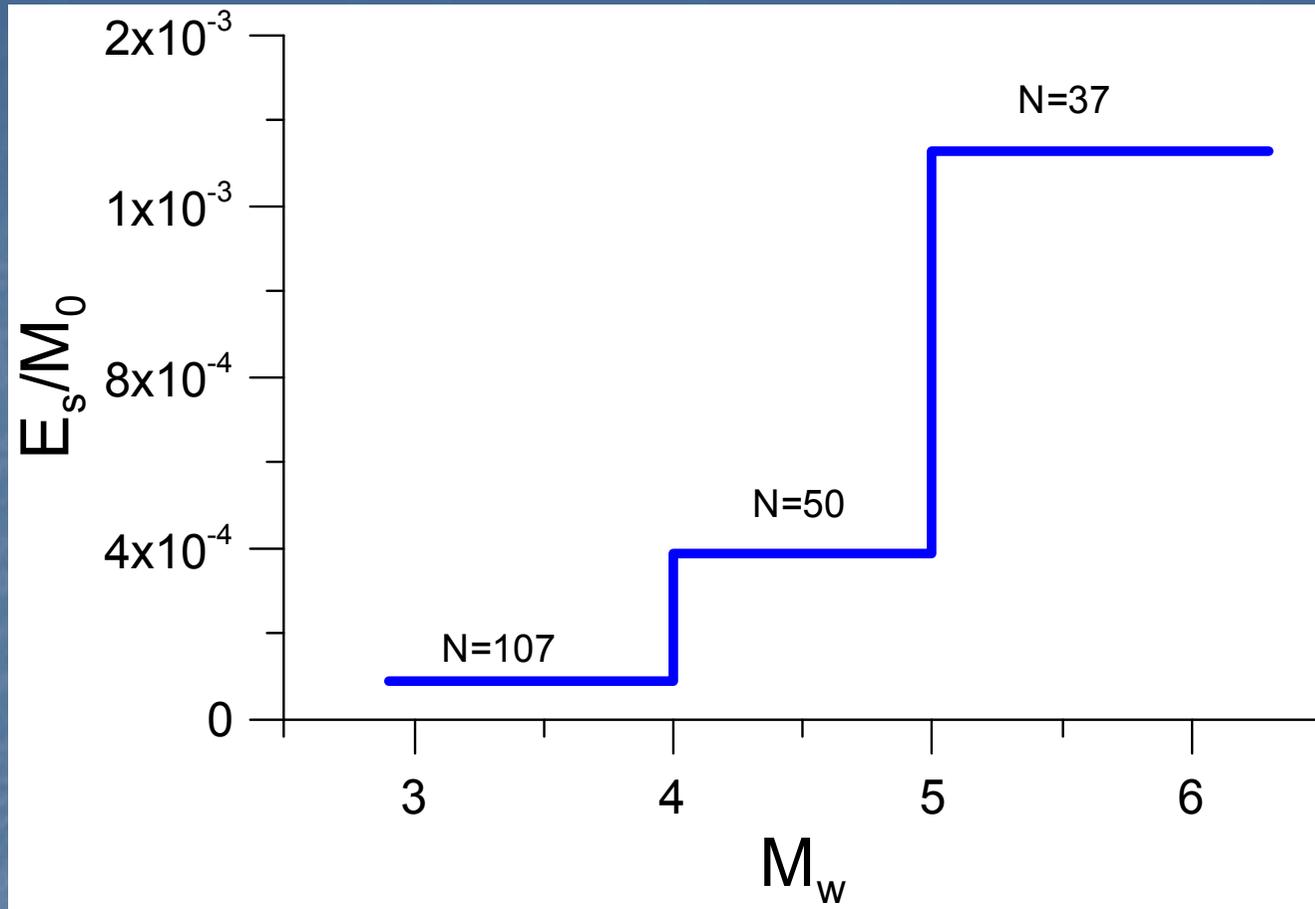


Таблица 1. Сведения о некоторых землетрясениях Прибайкалья и соседних регионов

Дата	Регион	M_0 , Н м ¹	E_s , Дж ²	$e_s = E_s/M_0$	K ³	$E_{sk} = 10^K$, Дж	$e_k = E_{sk}/M_0$	e_k/e_s
20.04.89	БРЗ	$3,1 \cdot 10^{18}$	$6,0 \cdot 10^{13}$	$1,94 \cdot 10^{-5}$				
21.08.94	БРЗ	$1,2 \cdot 10^{18}$	$5,4 \cdot 10^{12}$	$4,50 \cdot 10^{-6}$	15,5	$3,2 \cdot 10^{15}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	586
13.11.95	БРЗ	$5,5 \cdot 10^{17}$	$7,1 \cdot 10^{12}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	15.1	$1,3 \cdot 10^{15}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	177
25.02.99	БРЗ	$8,9 \cdot 10^{17}$	$1,6 \cdot 10^{13}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	14.6	$4,0 \cdot 10^{14}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	25
16.09.03	БРЗ	$3,1 \cdot 10^{17}$	$7,2 \cdot 10^{11}$	$2,3 \cdot 10^{-6}$	14.3	$2,0 \cdot 10^{14}$	$6,4 \cdot 10^{-4}$	277
10.11.05	БРЗ	$7,0 \cdot 10^{17}$	$6,1 \cdot 10^{12}$	$8,7 \cdot 10^{-6}$	15.7	$5,0 \cdot 10^{15}$	$7,2 \cdot 10^{-3}$	822
27.08.08	БРЗ	$1,7 \cdot 10^{18}$	$9,5 \cdot 10^{12}$	$5,6 \cdot 10^{-6}$	15.9	$7,9 \cdot 10^{15}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$	836
27.08.08	БРЗ	$3,4 \cdot 10^{18}$	$9,5 \cdot 10^{12}$	$2,8 \cdot 10^{-6}$	15.9	$7,9 \cdot 10^{15}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	836
27.09.03	Алтай	$9,4 \cdot 10^{19}$	$5,1 \cdot 10^{15}$	$5,4 \cdot 10^{-5}$	17	$1,0 \cdot 10^{17}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	20
27.09.03	Алтай	$4,5 \cdot 10^{18}$	$6,4 \cdot 10^{14}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	16.6	$4,0 \cdot 10^{16}$	$8,8 \cdot 10^{-3}$	62
01.10.03	Алтай	$1,1 \cdot 10^{19}$	$2,7 \cdot 10^{15}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$	16.4	$2,5 \cdot 10^{16}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	9
14.10.11	Амур	$1,4 \cdot 10^{18}$	$9,5 \cdot 10^{12}$	$6,9 \cdot 10^{-6}$	15.7 ⁴	$5,0 \cdot 10^{15}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$	517
27.12.11	Тува	$1,4 \cdot 10^{19}$	$8,7 \cdot 10^{14}$	$6,3 \cdot 10^{-5}$	15.3 ⁵	$2,0 \cdot 10^{15}$	$1,45 \cdot 10^{-4}$	2
26.02.12	Тува	$1,2 \cdot 10^{19}$	$9,5 \cdot 10^{13}$	$7,98 \cdot 10^{-6}$	15.7 ⁶	$5,0 \cdot 10^{15}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	53

1-по данным [globalcmt.org]; 2- по данным [neic.usgs.gov]; 3 – по данным [seis-bykl.ru] для БРЗ и [[Malovichko\(Ed\)., 2006](#)] для Алтая; 4- по данным ЦСС, г.Иркутск [www.kp.ru]; 5 - по данным [[Baranov et al., 2013](#)]; 6 – [www.newsru.com]



Зависимость величины приведенной энергии, осредненной поинтервально, от магнитуды события. Около графика написано количество событий в каждом интервале.

4. Обсуждение



Четыре причины нарушения подобия:

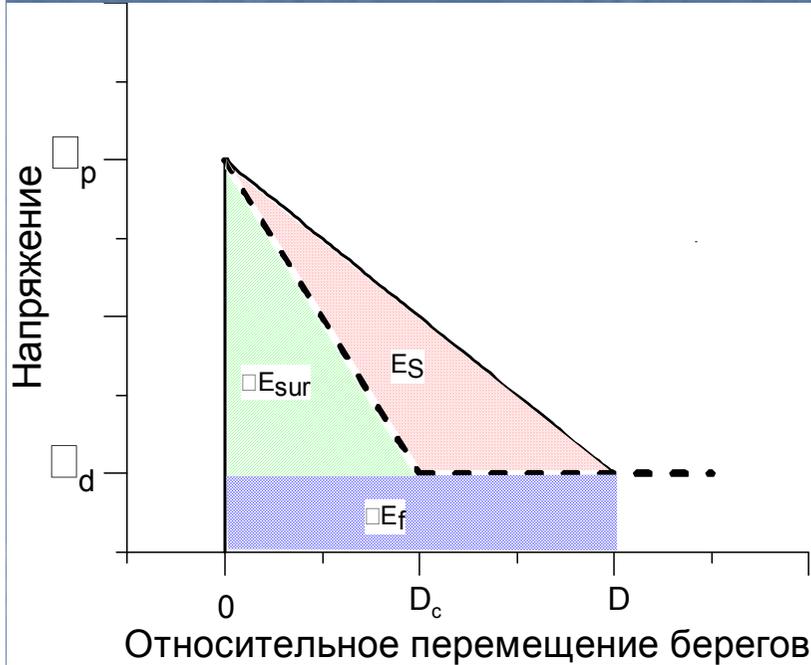
I. Артефакты:

1. Эффект ограниченной полосы пропускания аппаратуры на оценку энергии (80% E_s лежит в диапазоне выше угловой частоты спектра; $M_w=1$; $f_c > \sim 25\text{Гц}$; $M_w=-1$; $f_c > \sim 200\text{Гц}$)
2. Эффект поглощения высоких частот.

II. Объективные причины, имеющие природное происхождение:

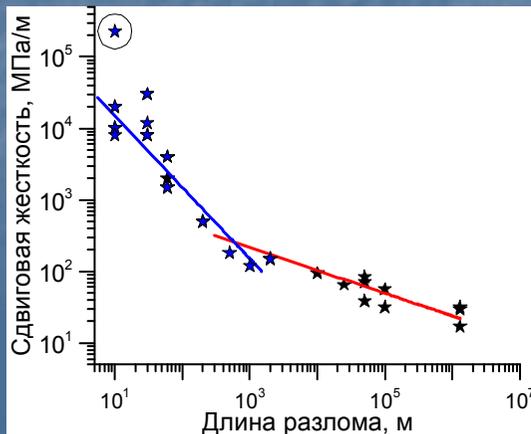
3. Зависимость механических свойств разломов и трещин от масштаба.
4. Зависимость упругих свойств горной породы от масштаба.

3. Масштабный эффект механических свойств разломов и трещин.

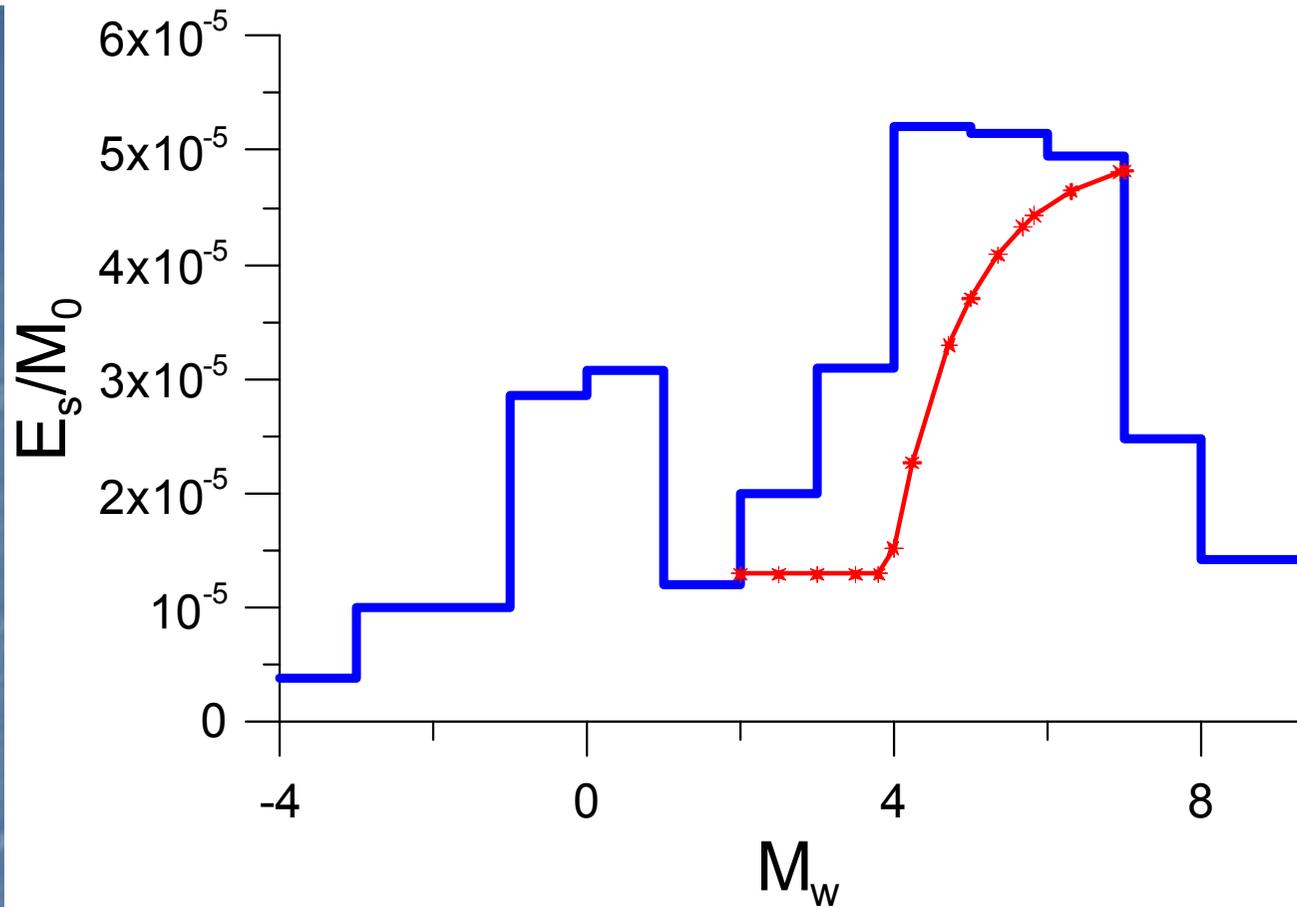


$$\frac{E_s}{M_0} = \frac{\Delta\sigma}{2\mu} \cdot \frac{E_s}{E_s + \Delta E_{sur}} = \frac{\Delta\sigma}{2\mu} \left[1 - \frac{(3 \div 4)\mu}{L \cdot k_f} \right]$$

[Кочарян, 2013, 2014]



$$\frac{E_s}{M_0} = \frac{\Delta\sigma}{2\mu} \begin{cases} 1 - (1.5 \div 2) \cdot 10^{-9} \cdot \mu \cdot L^{-0.68}, & L \geq 500 \text{ м} \\ 1 - (2 \div 2.7) \cdot 10^{-11} \cdot \mu, & L < 500 \text{ м} \end{cases}$$



$\Delta\sigma=3\text{MПа}$

$\mu = 3 \cdot 10^{10}\text{Па}$

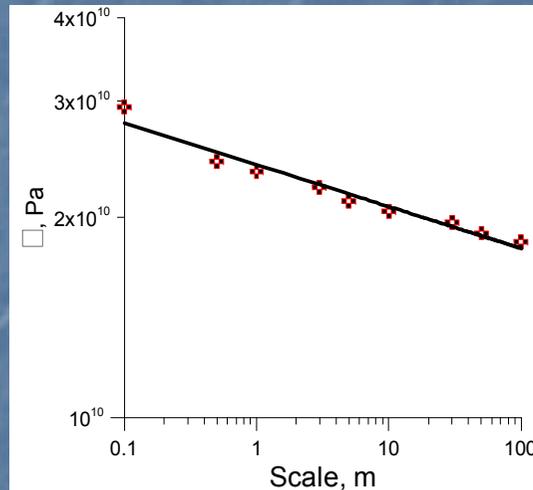
$$\frac{E_s}{M_0} = \frac{\Delta\sigma}{2\mu} \begin{cases} 1 - (1.5 \div 2) \cdot 10^{-9} \cdot \mu \cdot L^{-0.68}, & L \geq 500\text{ м} \\ 1 - (2 \div 2.7) \cdot 10^{-11} \cdot \mu, & L < 500\text{ м} \end{cases}$$

4. Зависимость упругих характеристик породы от масштаба

Для мелких событий расположенных на малых глубинах, (шахтная сейсмичность) эффект снижения модуля сдвига с масштабом становится существенным.

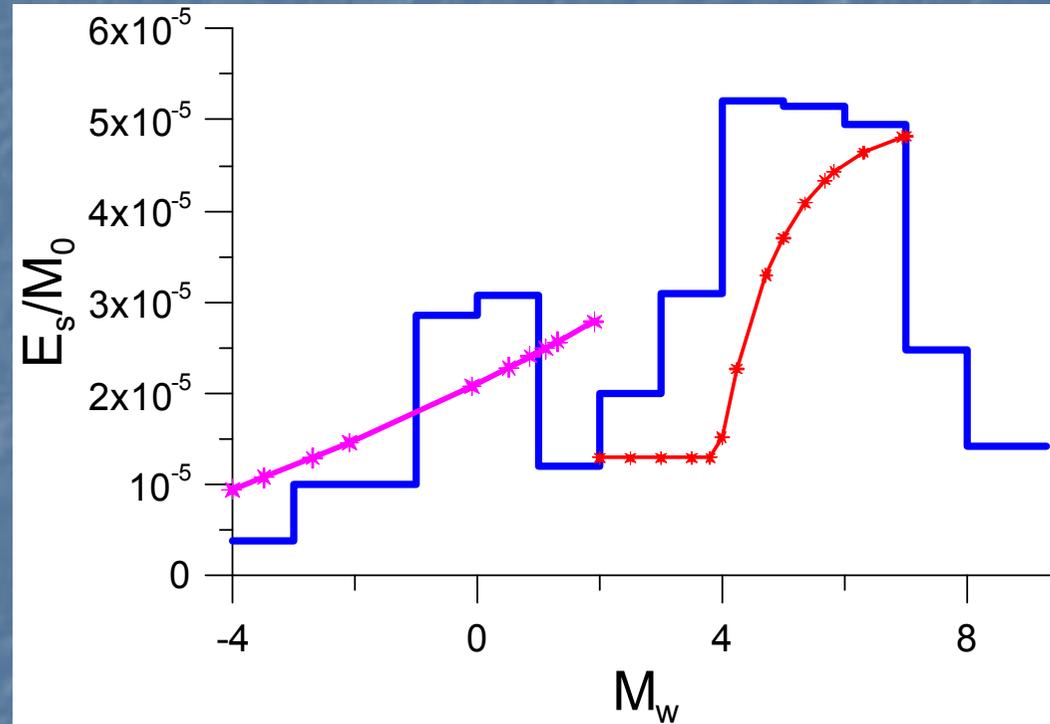
Пример :

Измерения в массиве кварцита на глубине 1000-1200м



$$\mu = 2.4 \cdot 10^{10} \cdot L^{-0.06} \text{ Pa}$$

$$0.1 \text{ m} < L < 200 \text{ m}$$



$$\eta_R = (1 - (0.48 \div 0.65)L^{-0.06}) \cdot \frac{\Delta\sigma}{2.4 \cdot 10^{10} L^{-0.06}}$$

Выводы

В процессе разломообразования и излучения сейсмических волн существуют несколько иерархических уровней, в которых изменение параметров событий с масштабом происходит по разным законам.

I – сейсмичность индуцированная горными работами или заполнением водохранилищ ($M_w < 1-2$), расположенные на небольших глубинах. В этом интервале $k_s \sim L^{-1}$, что соответствует законам подобия. Отклонения от подобия связаны с зависимостью эффективного модуля сдвига среды от масштаба.

II - мелкие землетрясения $M_w \sim 0 \div 3$ на сейсмогенных глубинах.

Если гипоцентры приурочены к мелким трещинам, расположенным в стороне от магистральной зоны крупного разлома, то их параметры подчиняются законам подобия, а . Если же последовательности повторных событий происходят непосредственно на участках крупных разломных зон, то наблюдаются значительные отклонения от закона подобия, проявляющиеся, в частности, в аномальной зависимости рекуррентного времени между событиями от масштаба.

III Характерные линейные размеры $L \sim 500-1000$ м являются некоторой переходной областью, после которой изменяются масштабные соотношения, как для характеристик разломов, так и для параметров очагов землетрясений.

IV Эффективная мощность зоны влияния сформировавшегося разлома, его жесткость, величина сейсмического момента землетрясений изменяются с масштабом заметно медленнее, чем в самоподобной среде. Нелинейная зависимость жесткости разлома от длины приводит к быстрому росту в несколько раз среднего значения эффективности сейсмического источника в диапазоне магнитуд $M_w 3 \div 5$.

V Для более крупных землетрясений этот эффект практически не заметен. В диапазоне $M_w 4-7$ –подобие.

VI Для крупнейших землетрясений с $M_w > 7-7.5$ наблюдается замедление роста сейсмического момента с увеличением длины разрыва и некоторое снижение величины приведенной сейсмической энергии.

БАЙКАЛ -?