Отделение Наук о Земле РАН
Российский фонд фундаментальных исследований
Пермьский федеральный исследовательский центр УрО РАН
Институт Физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН
Горный институт УрО РАН

XI Всероссийская школа-семинар с международным участием
«Физические основы прогнозирования разрушения горных пород»

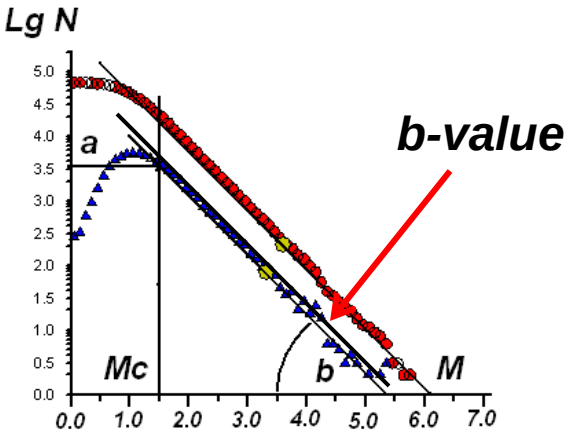
"Оценка глубины прогнозируемого сильного землетрясения по данным параметра b-value закона Гутенберга-Рихтера".

Попандопуло Г.А

Институт Физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
г. Москва, 123242, ул. Б.Грузинская, 10
Телефон: +7 495-254-9035 E-mail: gap@ ifz.ru

14-18 октября 2019 г.
г. Пермь

Lg N = a-bM ; (1)



Частотно – Магнитудное Распределение землетрясений описывается законом Гуттенберга-Рихтера, уравнение, которого, имеет вид

log N = a – b M ,

где ***log N*** логарифм числа землетрясений, ***a*** - и ***b (b-value)*** - константы.

Константа «***a***» определяет величину сейсмической активности, а «***b-value***» - угол наклона линейной части прямой ***ЧМР*** землетрясений, характеризующий соотношение числа больших и малых магнитуд.

Величина ***b-value*** – характеризует как степень неоднородности среды и так и величину относительных тектонических напряжений. [Scholz,1968; и др]. ***Именно это свойство закона Гутенберга-Рихтера позволяет нам исследовать геодинамическое изменения в земной коне <u>на любой глубине</u>***

Цель настоящей работы ***заключается в исследовании возможности оценки глубины прогнозируемых землетрясений определяемой по данным пространственно временных изменений параметра b-value.***

Для исследования мы использовали:

1.Каталог землетрясений, полученный по данным наблюдения на Гармском прогностическом полигоне в Таджикистане в период с 1955 по 1991гг.

2. Компьютерная программа FastBee (Fast Big Earthquake Estimation), используемая для вычисления трех параметров сейсмичности [Papadopoulos and Baskoutas, 2009] .

Алгоритм программы FastBee

В программе **FastBee**, строится ЧМР землетрясений, определяется параметр b-value закона Гутенберга-Рихтера и вычисляются временные ряды трех параметра сейсмичности:

1. ***Сейсмическая активность,*** которая представляется в виде логарифма числа землетрясений,.

$$\mathbf{LgN(t)} = \mathbf{lg}\left(\sum_{i=t-w}^{t} i\right) \qquad \sigma_{\lg N} = 0.4343/\sqrt{N}$$

где *i* – порядковый номер землетрясения с магнитудой M > M_c M_c– минимальная представительная магнитуда , а W – временное окно сглаживания в месяцах (t)

2. ***Параметр b_value,*** вычисляется по методу максимального правдоподобия, предложенныйле Aki (1965):

$$\mathbf{b(t)} = \frac{\mathbf{lge}}{\overline{\mathbf{M}}(\mathbf{t}) - (\mathbf{M_C} - \Delta\mathbf{M/2})} \qquad \sigma_b = 2.30b^2\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(M_i - \overline{M})^2}/n(n-1),$$

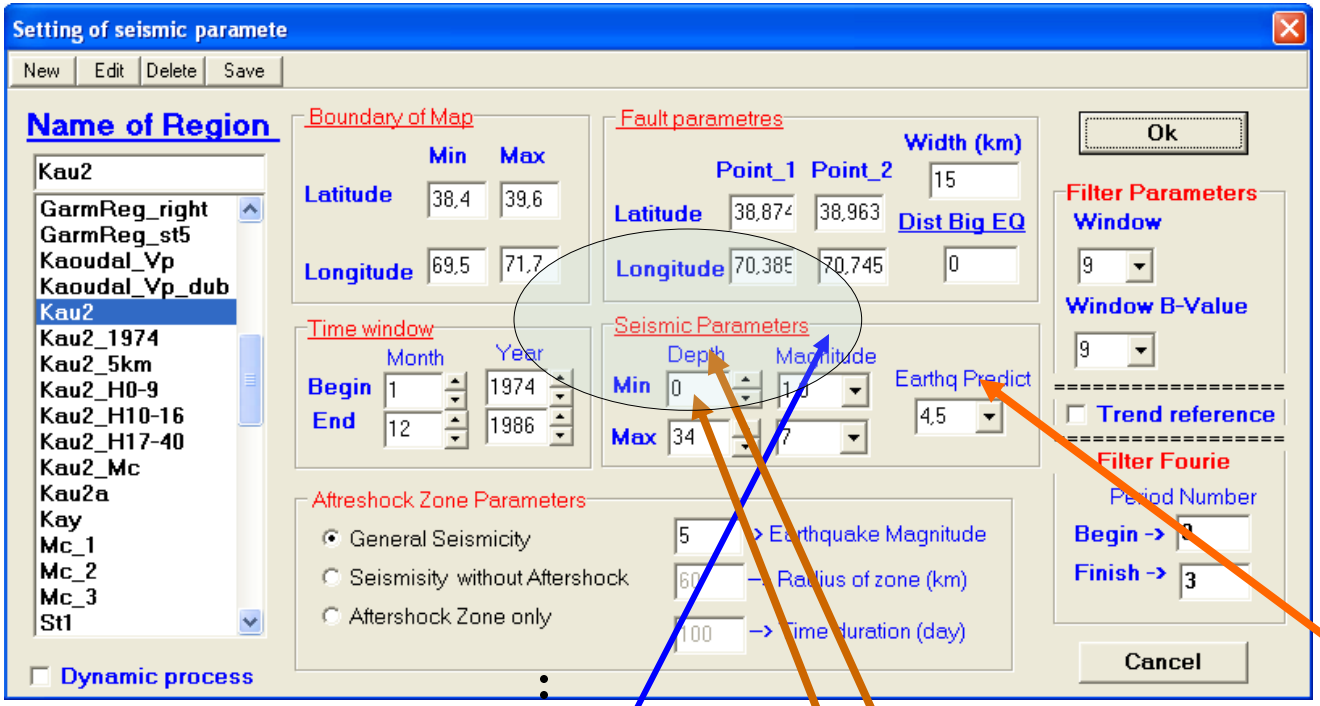
где ***log e –*** постоянная величина, ***Mc*** – минимальная представительная магнитуда и $\overline{M}(t)$ средняя магнитуда землетрясений, при **M ≥ *Mc***, ***ΔM*** – интервал ячейки группирования (binned) магнитуды, Среднеквадратическая погрешность величины ***b*** вычисляется согласно модифицированной формуле, предложенной в [Shi and Bolt, 1982]

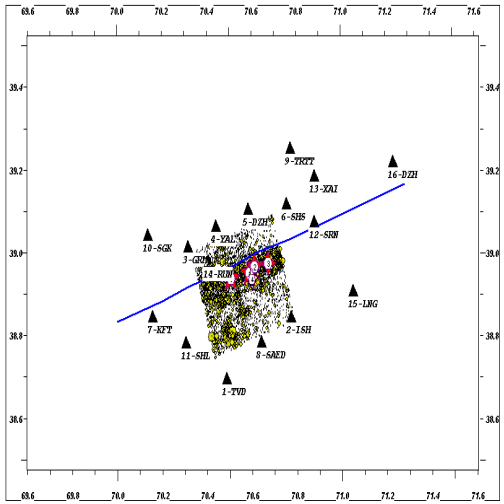
3. ***Параметр выделенной сейсмической энергии LgE2/3*** представлен в виде логарифма средней сейсмической энергии выделенной в фиксированном временном интервале

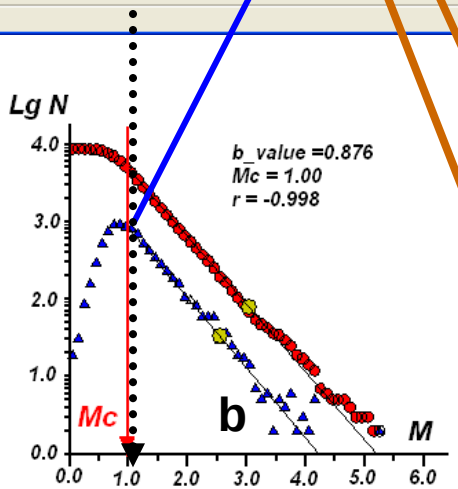
$$\mathbf{LgE^{2/3}(t)} = \mathbf{lg}\left(\sum_{i=t-w}^{t} E_i^{2/3} \Big/ \sum_{i=t-w}^{t} i\right)$$

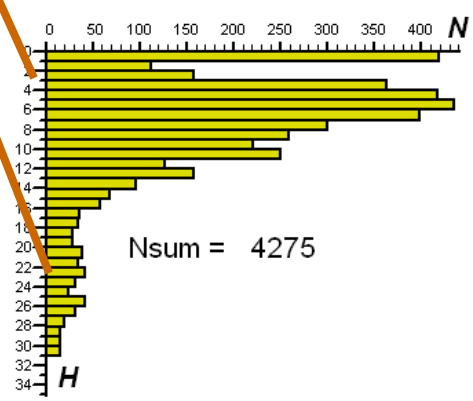
С физической точки зрения, величина выделенной сейсмической энергии $E^{2.3}$ пропорциональна сейсмотектонической деформации земной коры [Keilis-Borok, 1959; Садовский, Писаренко, 1983].

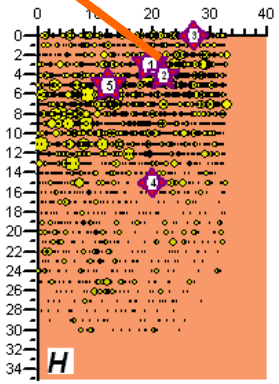
Определение параметров выборки данных слабых землетрясений и минимальной представительной магнитуды Mc



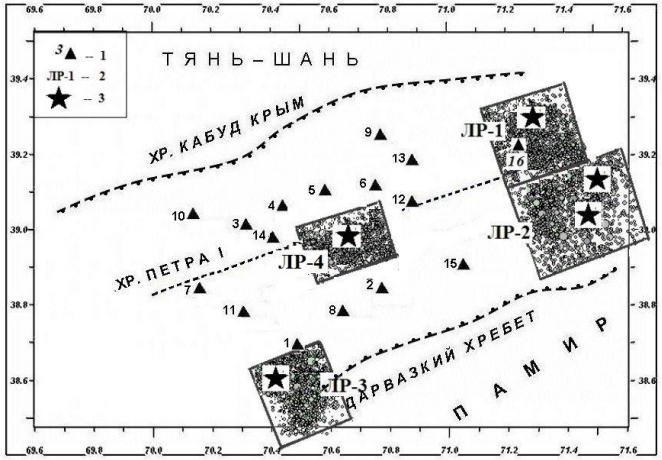




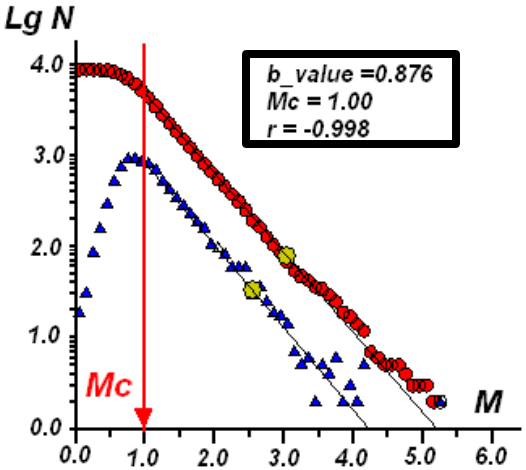


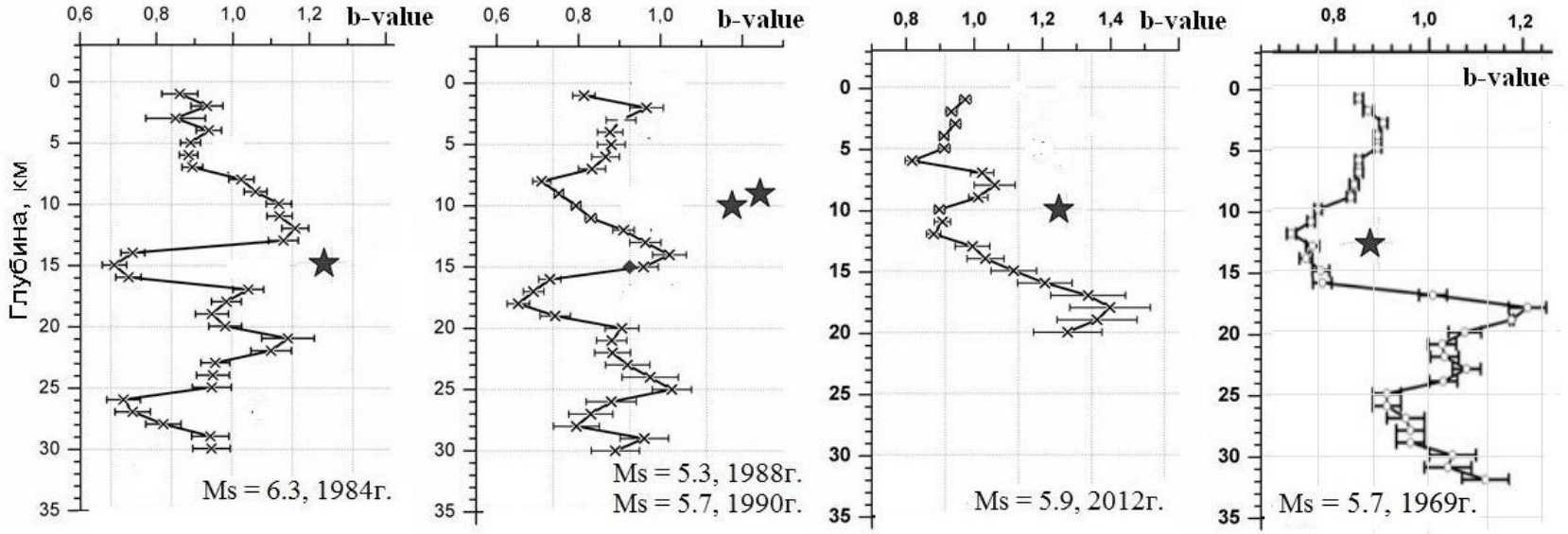


ОЦЕНКА ГЛУБИНЫ ВОЗМОЖНОГО СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ПО РАСПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРА b-value С ГЛУБИНОЙ



ΔH=3км ,
step 1 км.

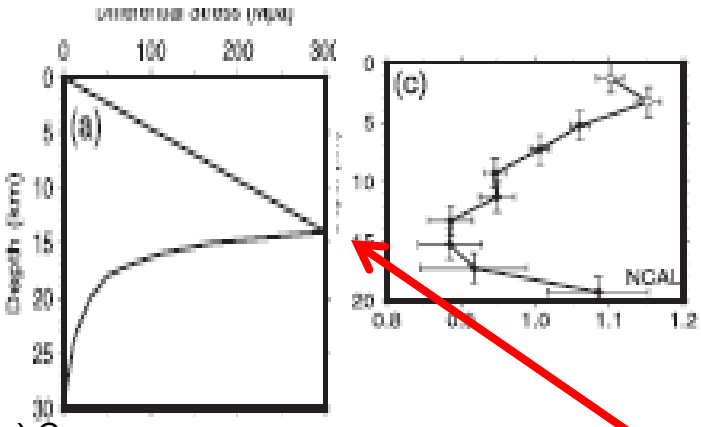




ЛР-1 Джиргаталь ЛР-2 Ляхш ЛР-3 Тавиль Дара ЛР-4 Каудаль

Общая зависимость ЧМР землетрясений от глубины и ее связь с прочностью земной коры

M. Spada, T. Tormann, S. Wiemer, and B. Enescu **(2013)**



(a) Схематическая и упрощенная иллюстрация профиля прочности коры, модифицированной по Шольцу [2002]. (c) Градиенты глубины b, наблюдаемые для разных каталогов

Spada с коллегами, представили результаты исследования величины b-value как функции глубины для ряда тектонических регионов. Они обнаружили, что значение b-value уменьшается до глубины, хрупко-пластического перехода, ниже которого наблюдается значительное увеличение величины b-value.

Авторы интерпретируют точку поворота значения b-value на глубине 15 км как зону перехода от хрупкого поведения верхней коры к пластическому поведению в нижней ее части.

На основании этого они предположили что, градиент b-value с глубиной позволяет оценить толщину хрупкой коры. Более того они показали, что значения **b-value** имеют отрицательную корреляцию с дифференциальным напряжением (σ1–σ3), и может быть использовано в качестве измерителей напряжений в земной коре.

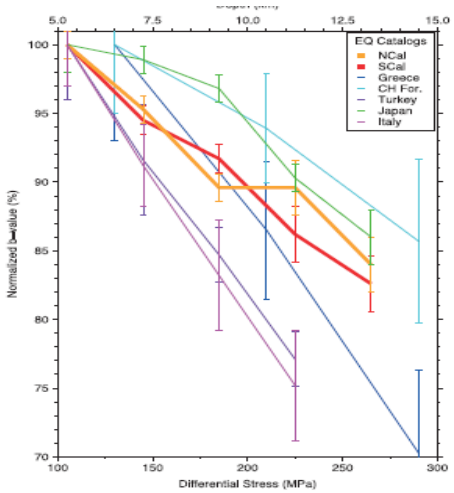


Figure 4. Normalized *b*-value to the first point (deeper than 5 km depth) in percentage versus $\Delta\sigma$ for the seven considered earthquake catalogs. Bold lines correspond to the high-quality relocated earthquake catalogs for northern and southern California.

On the stress dependence of the earthquake b-value
(Связь дифференциального напряжения и параметра b-value)

Christopher H. Scholz (2015)

Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, Palisades, New York, USA

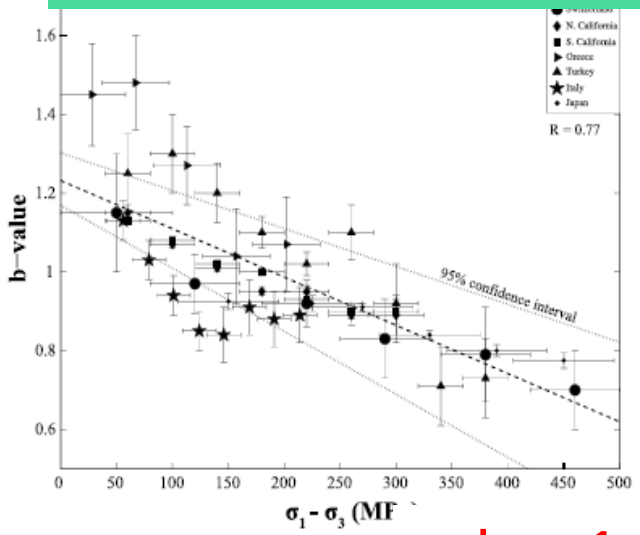


Figure 1. The *b* value plotted versus stress tectonic regions. The *b* value data are from S stresses computed from the stress model dis

Scholz [2015], используя модель силы трения для напряжений в континентальной литосфере в сочетании со значениями **b-value** как функции глубины, определил соотношение между **b-value** и дифферунциальным напряжением **Δσ,** которая имеет следующий вид.

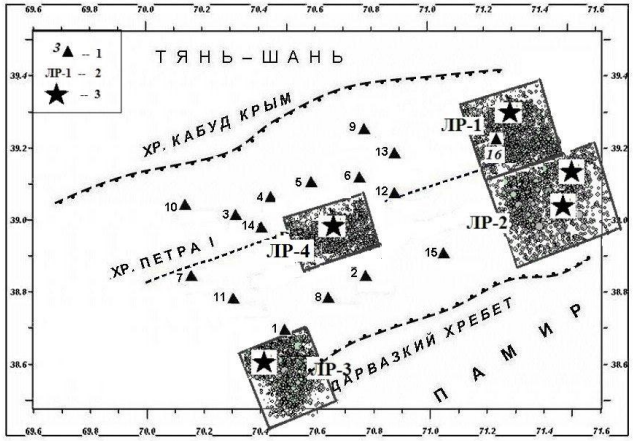
$$b = 1{,}23 \pm 0{,}06 - (0{,}0012 \pm 0{,}0003)\,(\sigma 1 - \sigma 3),$$

где разность напряжений (σ1-σ3) в МПа

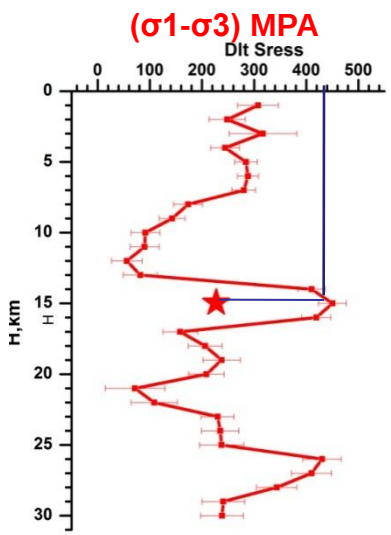
Этот результат дает возможность использовать b-value для вычисления изменения дифференциального напряжения в зонах разломов и интерпретировать временные изменений b-value во время сейсмического цикла [Imoto, 1991; Накая, 2006; Смит, 1981; De Gori et al., 2012; Гебель и др., 2012; Tormann et al., 2014; Westerhaus et al., 2002; Wiemer and Wyss, 1997].

Используя это уравнение мы можем пересчитать изменения параметра b-value с глубиной в величину дифференциального напряжения (σ1-σ3) в МПА

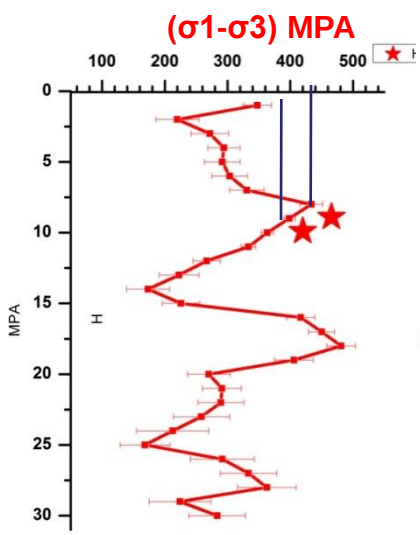
ОЦЕНКА ГЛУБИНЫ ВОЗМОЖНОГО СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ (σ1-σ3) ОТ ГЛУБИНЫ



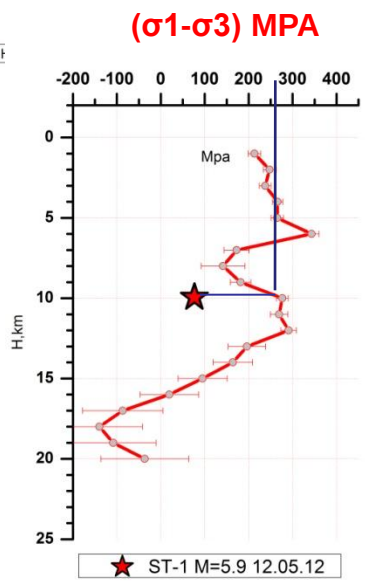
$$(\sigma 1 - \sigma 3) = (1.23 - \text{bvalue})/0.0012;$$



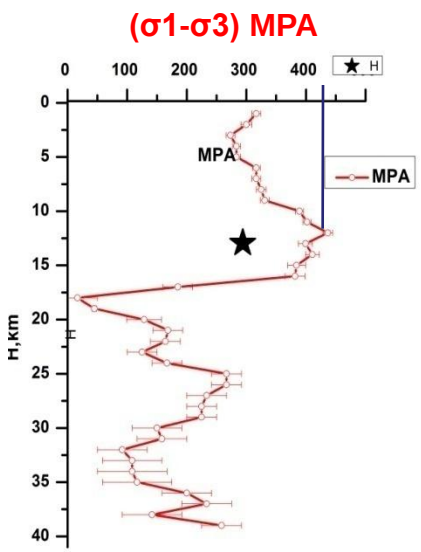
ЛР-1 Джиргаталь
M=6,3



ЛР-2 Ляхш
M=5.3; M=5.7

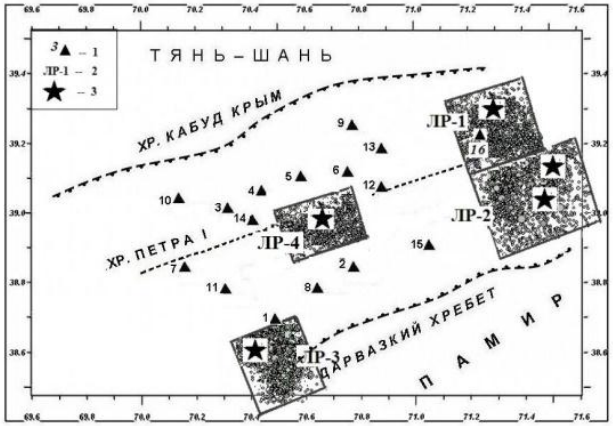


ЛР-3 Тавиль-Дора

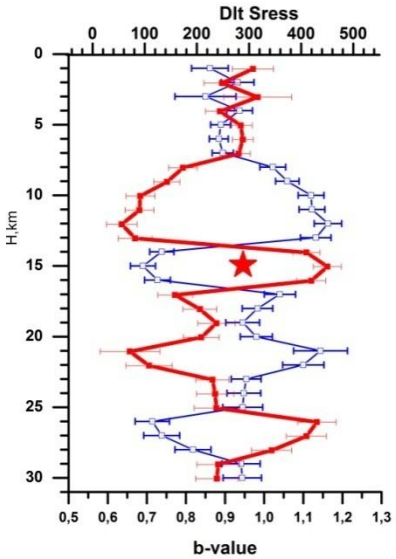


ЛР-4 Каудаль
M=5.7

ОЦЕНКА ГЛУБИНЫ ВОЗМОЖНОГО СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ПАРАМЕТРА b-value и ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ (σ1-σ3) С ГЛУБИНОЙ

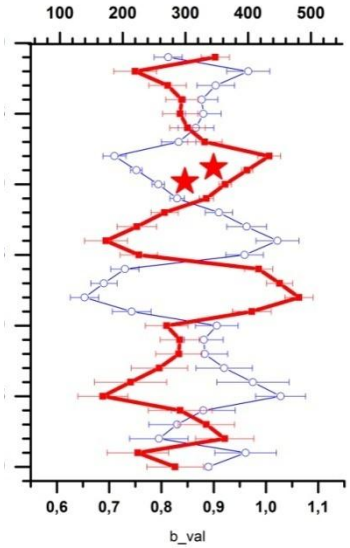


(σ1-σ3) MPA



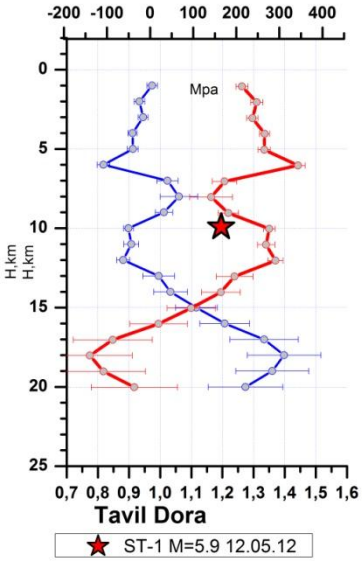
b-value

(σ1-σ3) MPA



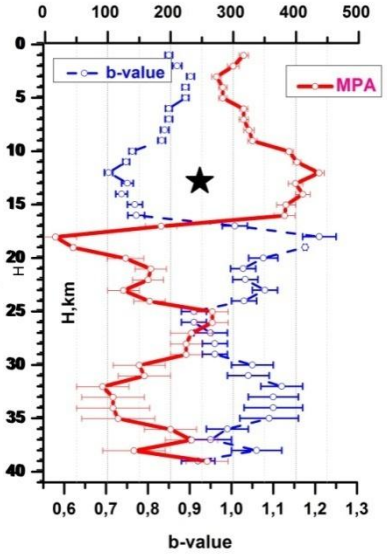
b-value

(σ1-σ3) MPA



b-value

(σ1-σ3) MPA



b-value

Временные вариации b-value с глубиной

Перейдем к рассмотрению временных вариаций. Напомним ,что в наших исследованиях мы используем три параметра сейсмичности:

1. ***Сейсмическая активность***.

$$\mathbf{LgN(t)} = \mathbf{lg}\left(\sum_{\mathbf{i=t-w}}^{\mathbf{t}} \mathbf{i}\right) \qquad \sigma_{\lg N} = 0.4343/\sqrt{N}$$

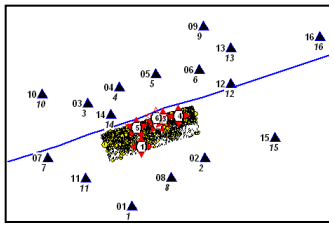
2. ***Параметр b_value,***

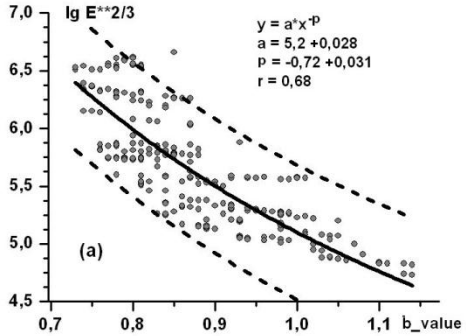
$$\mathbf{b} - value(t) = \frac{\mathbf{lge}}{\overline{\mathbf{M}}\mathbf{(t)} - (\mathbf{M_C} - \Delta\mathbf{M/2})} \qquad \boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{b}} = \mathbf{2.30b^2}\sqrt{\sum_{\mathbf{i=1}}^{\mathbf{n}}(\mathbf{M_i} - \overline{\mathbf{M}})^2/\mathbf{n(n-1)}},$$

3. ***Параметр выделенной сейсмической энергии LgE2/3***

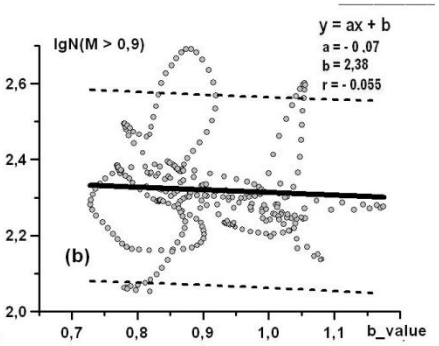
$$\mathbf{LgE^{2/3}(t)} = \mathbf{lg}\left(\sum_{\mathbf{i=t-w}}^{\mathbf{t}} \mathbf{E_i^{2/3}} \Big/ \sum_{\mathbf{i=t-w}}^{\mathbf{t}} \mathbf{i}\right)$$

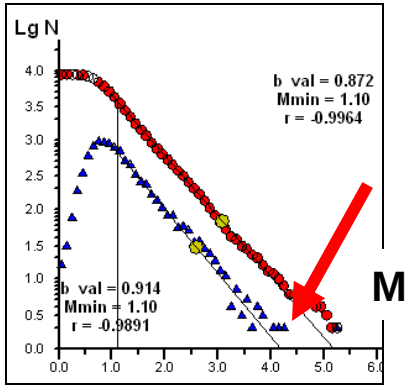
Временные вариации Lg N, b-value LgE^{23} в районе Каудаля



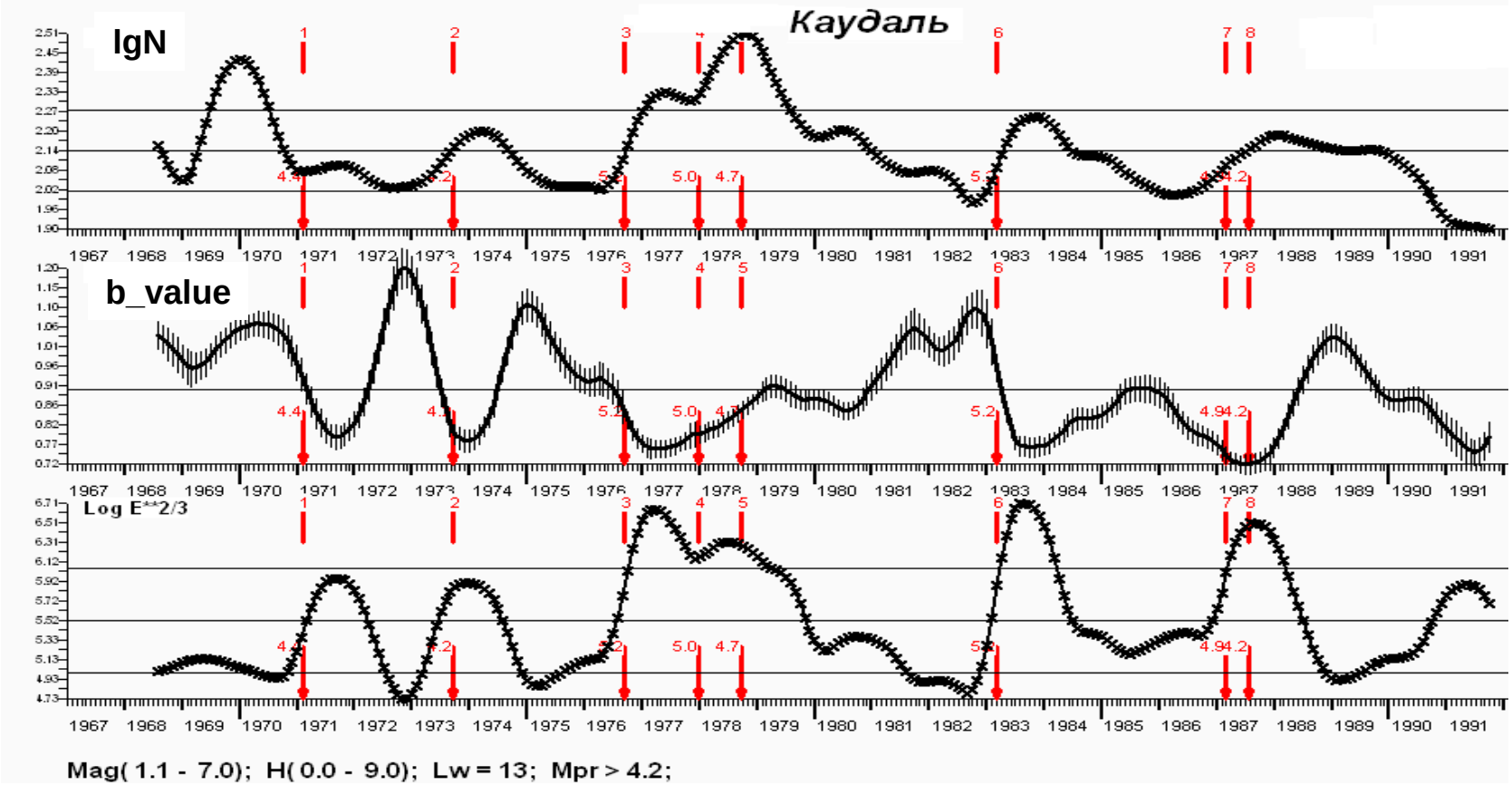


LgE**(2/3)

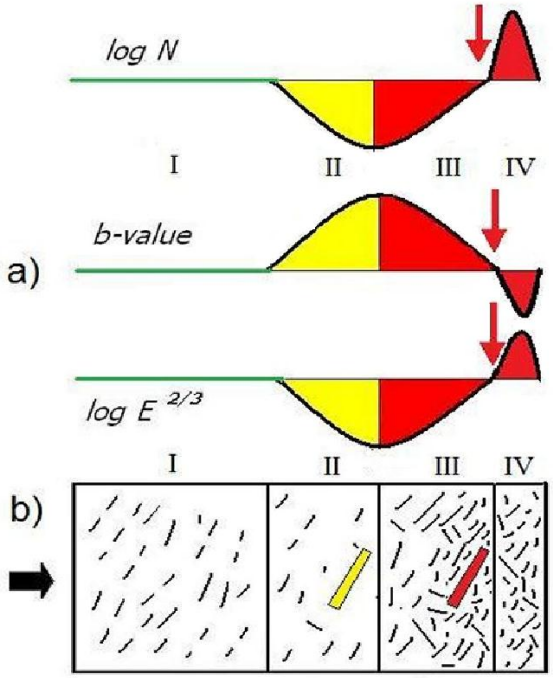


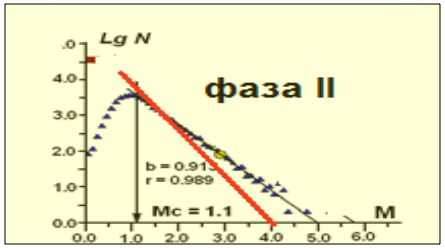


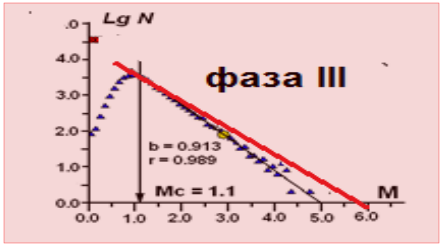
Mpr=4,2



Феноменологическую модель, объясняющая поведение исследуемых параметров ***b-value lgE$^{2/3}$*** и ***lgN.***





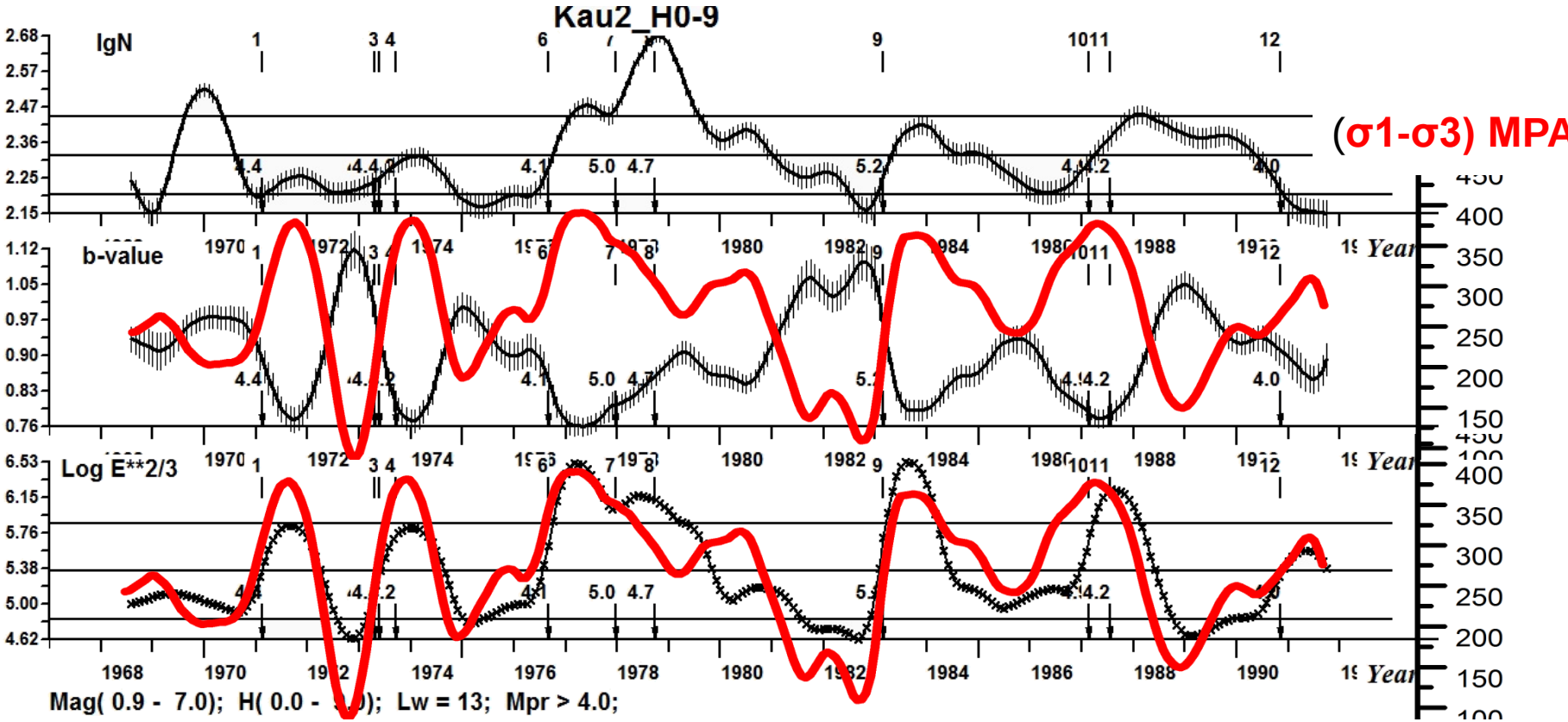


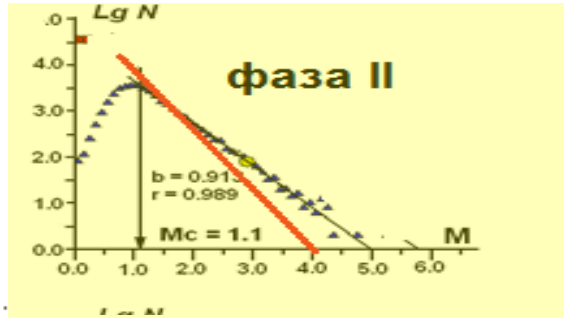
В процессе проскальзывания тектонических плит возможно столкновение (сцепление) блоков земной коры больших размеров и образованием зоны консолидации, т.е. зоны накопления дополнительной упругой деформации в земной коре (начало фаза *II*). При этом, существующей потенциальной энергии недостаточно для продолжение скольжения, по большим или средним разломам, в результате высвобождение энергии происходит в основном за счет мелких разломов (развитие фазы II). Это приведет к уменьшению числа относительно сильных и средних событий и сохранению числа слабых землетрясений, что приведет к увеличению угла наклона прямой ***b-value*** и уменьшению количества выделенной сейсмической энергии ***lgE$^{2/3}$***.

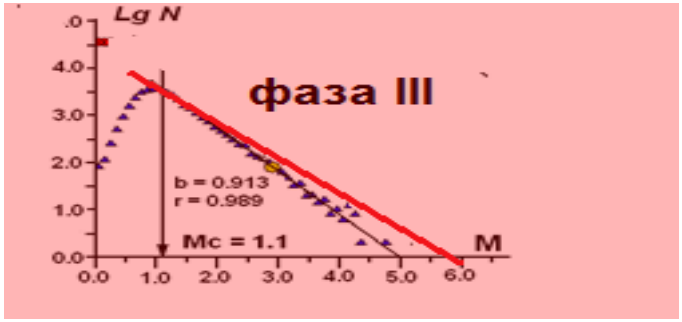
При накоплении тектонических напряжений, превышающих предел прочности среды, возникает процесс лавинно-неустойчивого трещинообразования (фаза ***III***), при этом подвижки происходят уже и по достаточно крупным разрывным нарушениям. Это приводит к увеличению числа землетрясений средних и больших магнитуд, что вызовет уменьшение угла наклона прямой ***b-value*** и к увеличению высвобождаемой сейсмической энергии (***lgE$^{2/3}$***). На временном ходе числа землетрясений ***lgN*** этот процесс может не отразиться, в виду того, что число землетрясений средних и относительно большой магнитуды в разы меньше чем землетрясений малых магнитуд.

Модель укладывается в рамки модели «жесткого включения» или модели консолидации [Kasaxara, 1981; Добровольский, 1991; Ruff, 1992], и модели лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ) [Kostrov and Das, 1988; Мячкин и др., 1975; Соболев, 1993]

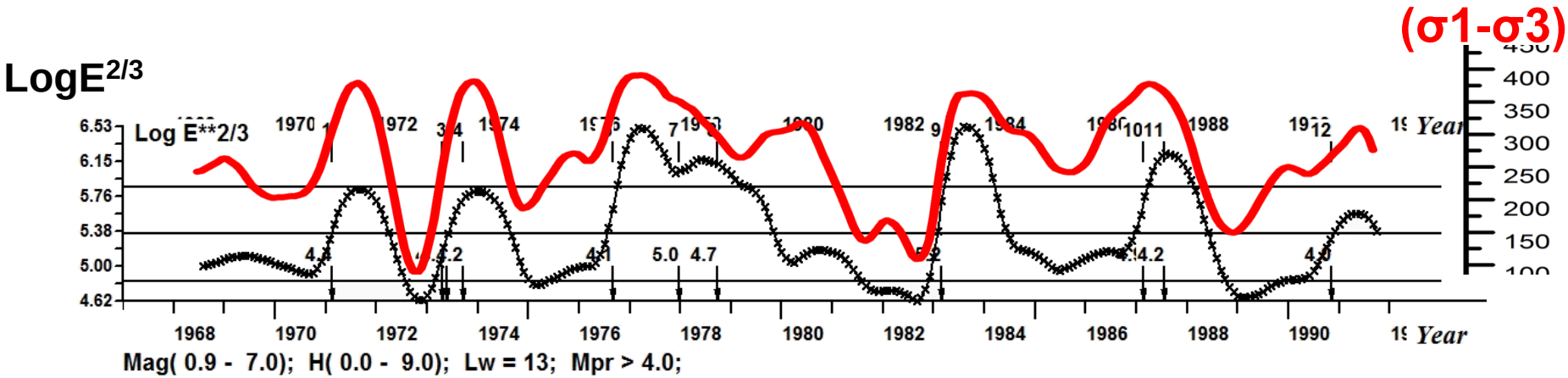
Временные вариации дифференциального напряжения (σ1-σ3) в земной коре мощносью ΔH 0-9 km в районе Каудаля Гармского района



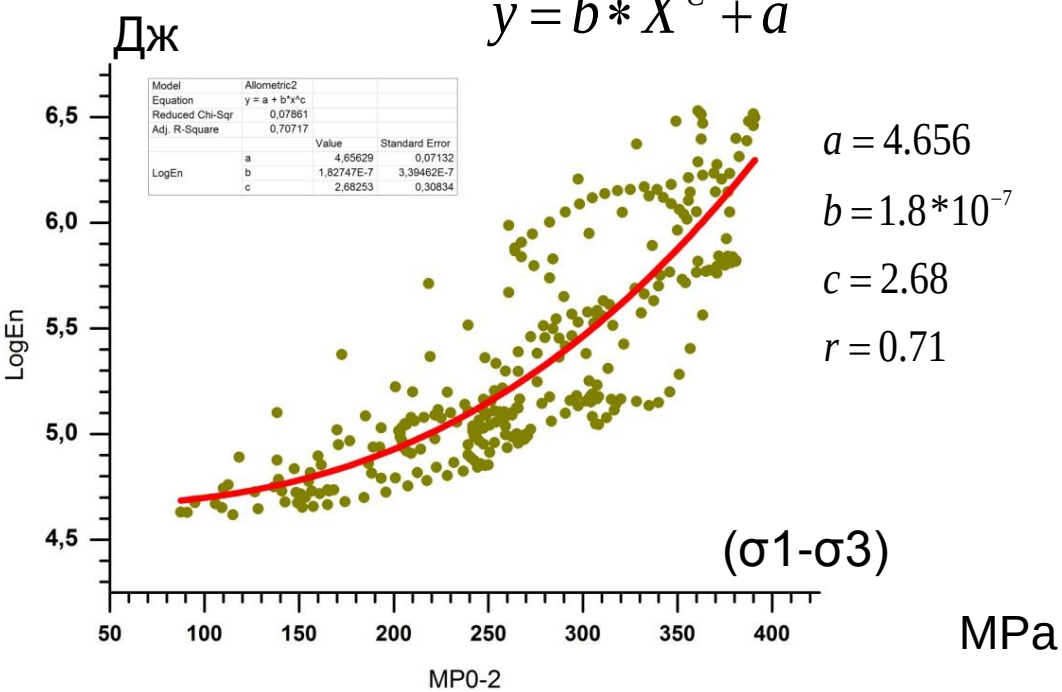




Корреляционная зависимость временных изменений высвобожденной сейсмической энергии $\log E^{2/3}$ и временных изменений дифферинциальных напряжений (σ1-σ3)



$$y = b * X^{C} + a$$



$a = 4.656$

$b = 1.8 * 10^{-7}$

$c = 2.68$

$r = 0.71$

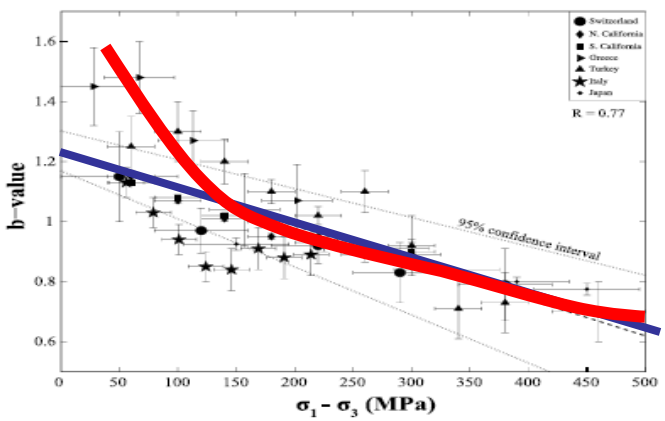
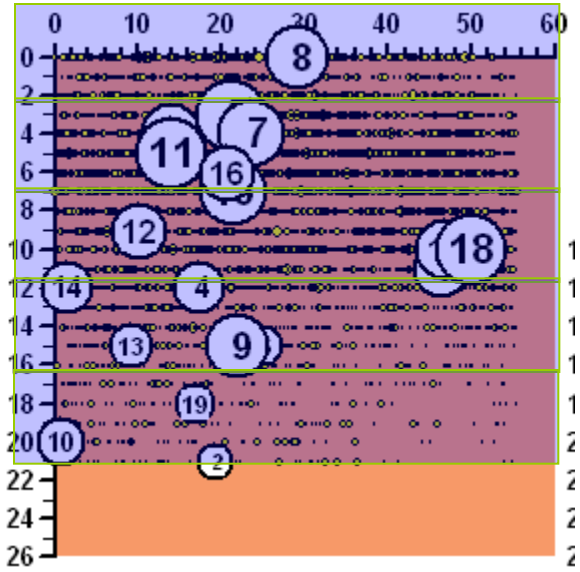
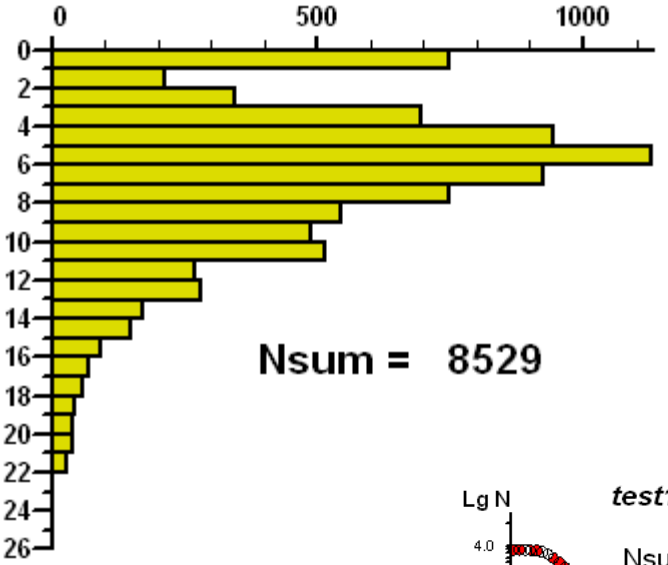
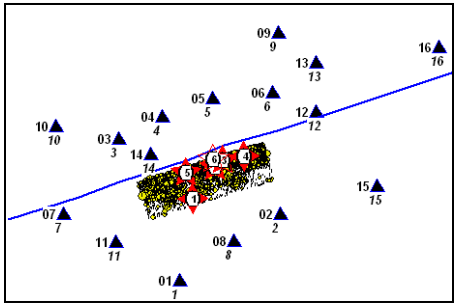


Figure 1. The *b* value plotted versus stress difference for a variety of tectonic regions. The *b* value data are from *Spada et al.* [2013] and the stresses computed from the stress model discussed in the text.

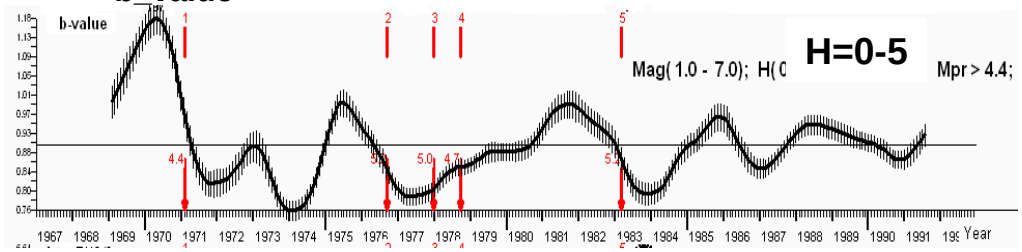
Временные вариации b-value с глубиной в районе Каудаль



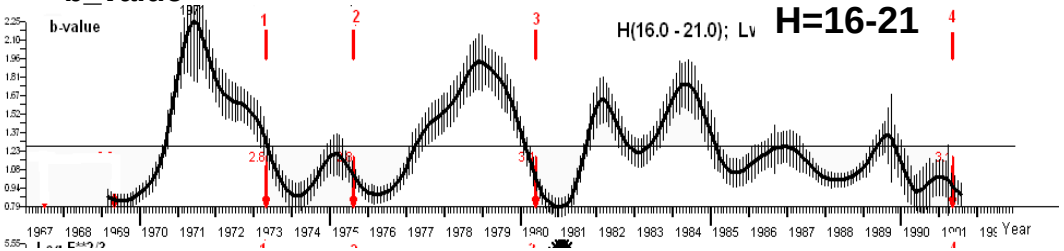


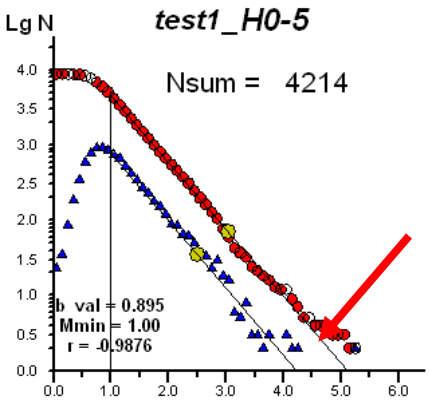


b_value

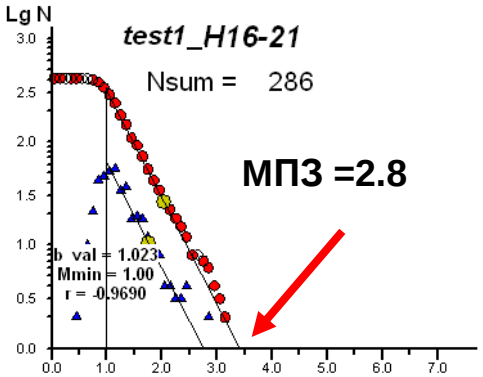


b_value



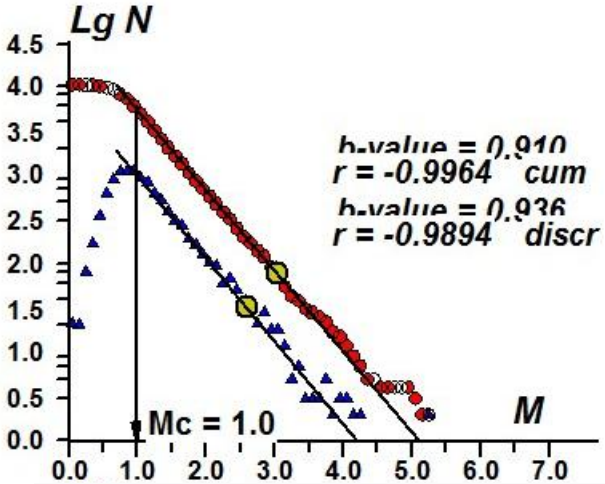


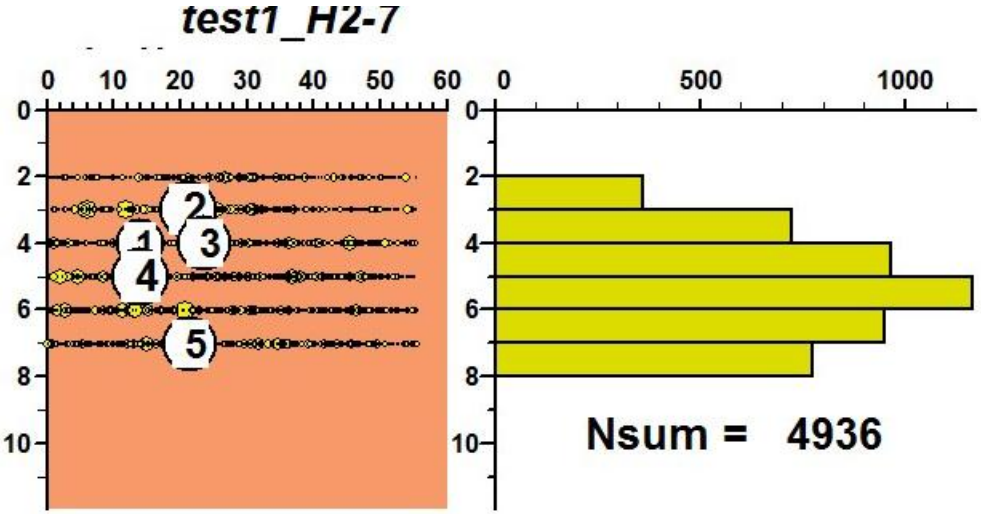
МПЗ =4.4

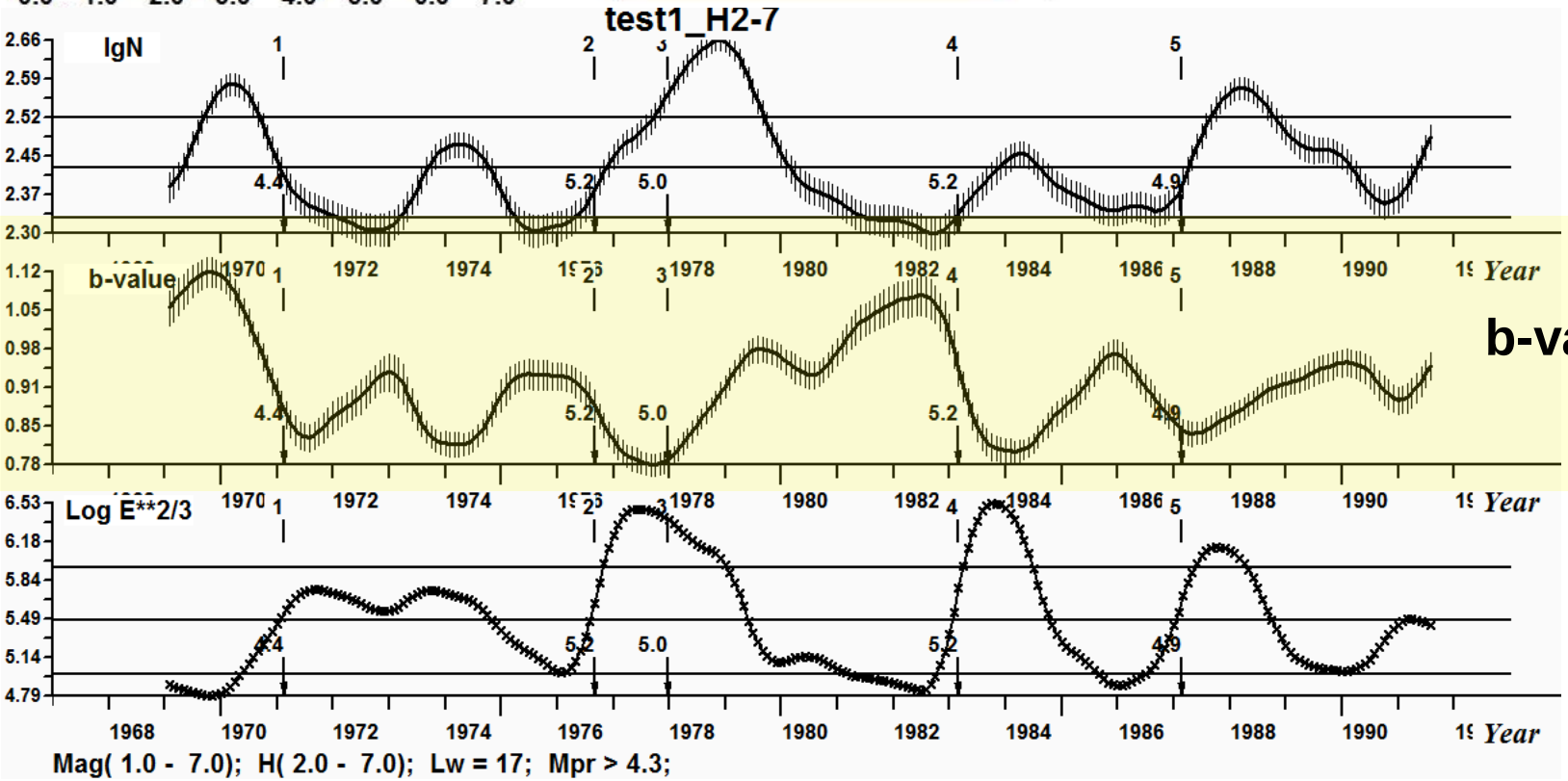


МПЗ =2.8

Временные вариаций b-value в диапазоне глубин 2-7 км

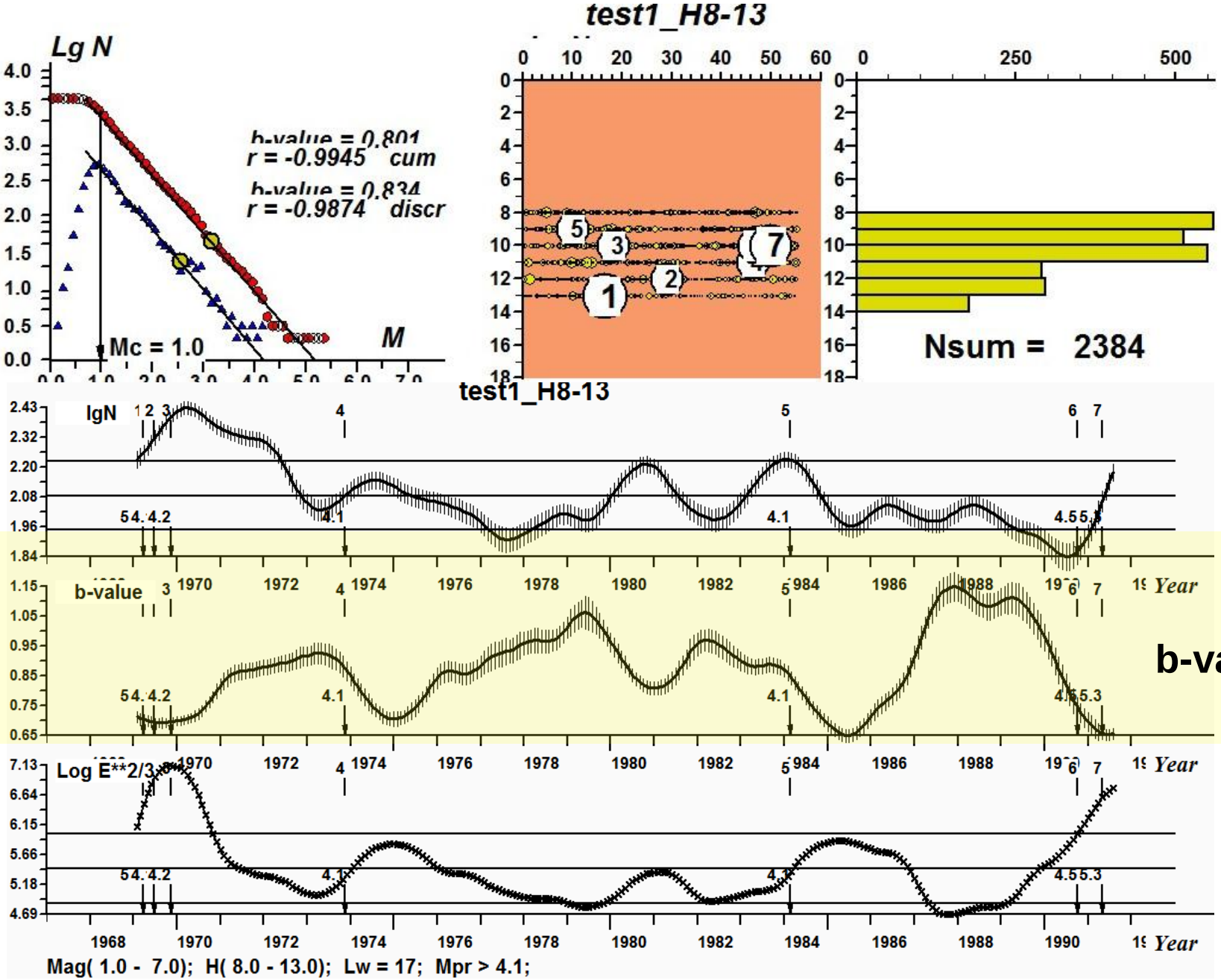






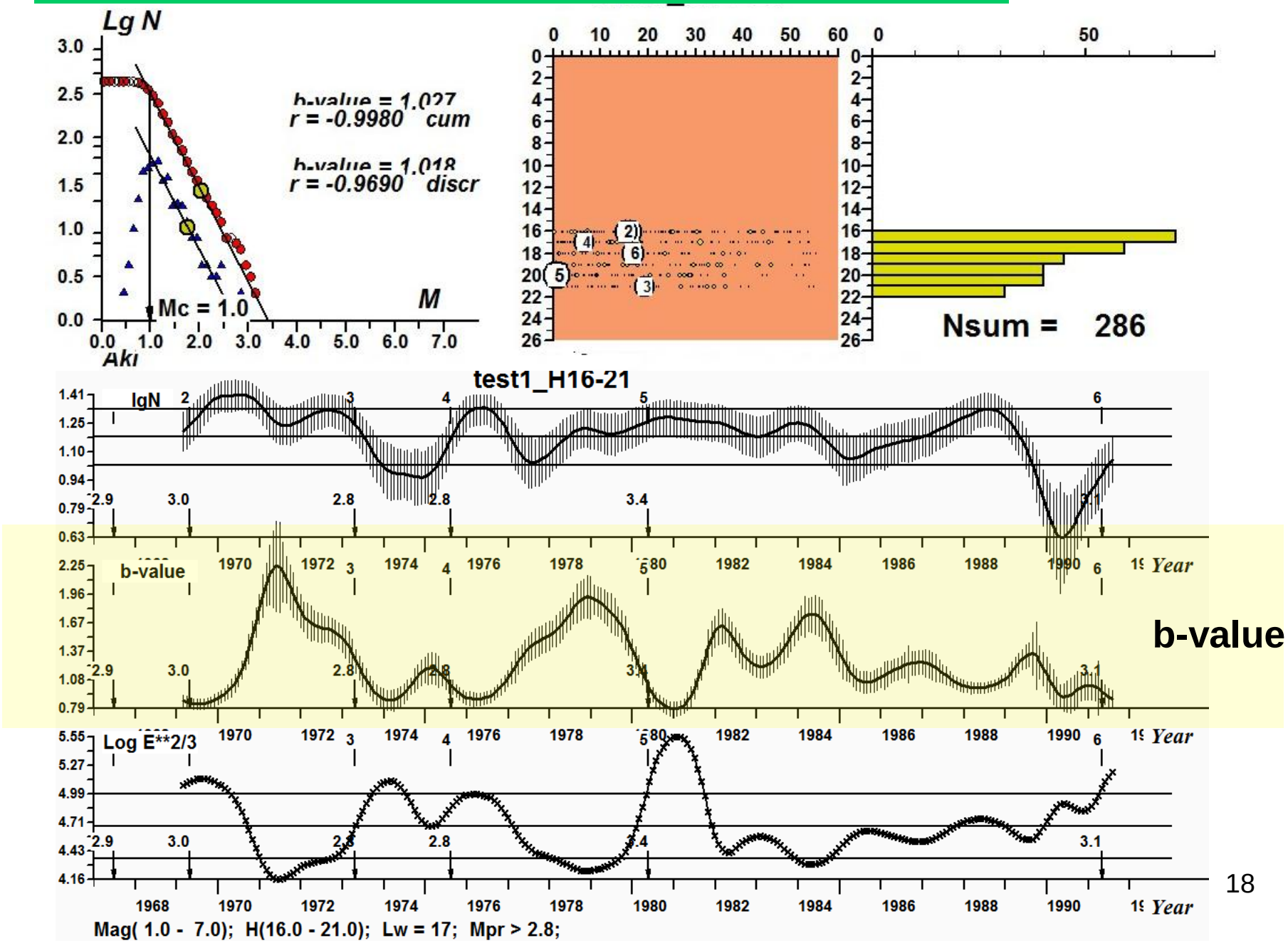
b-value

Временные вариаций b-value в диапазоне глубин 8-13 км

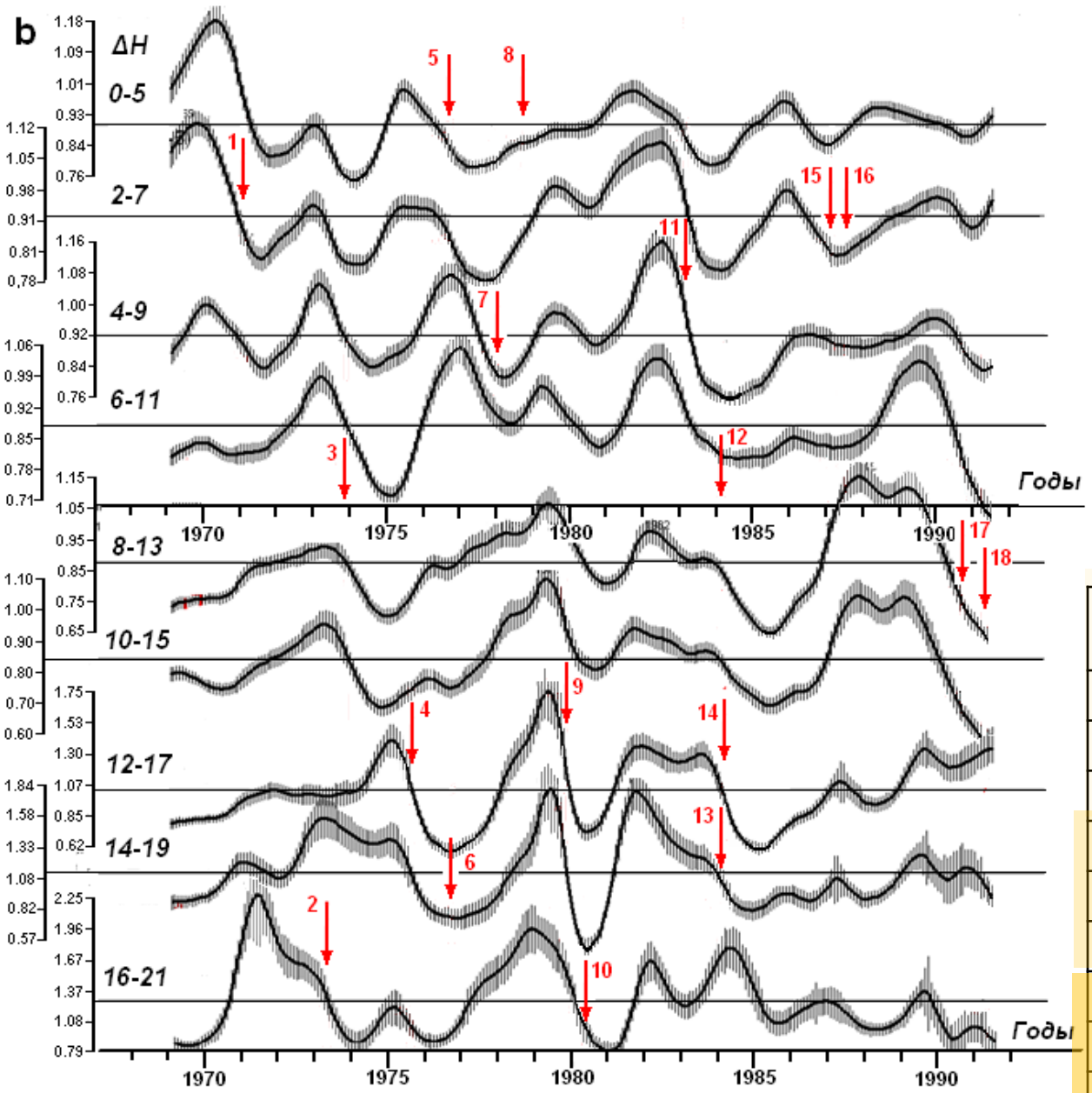


b-value

Временные вариаций b-value в слое мощностью 16-21 км



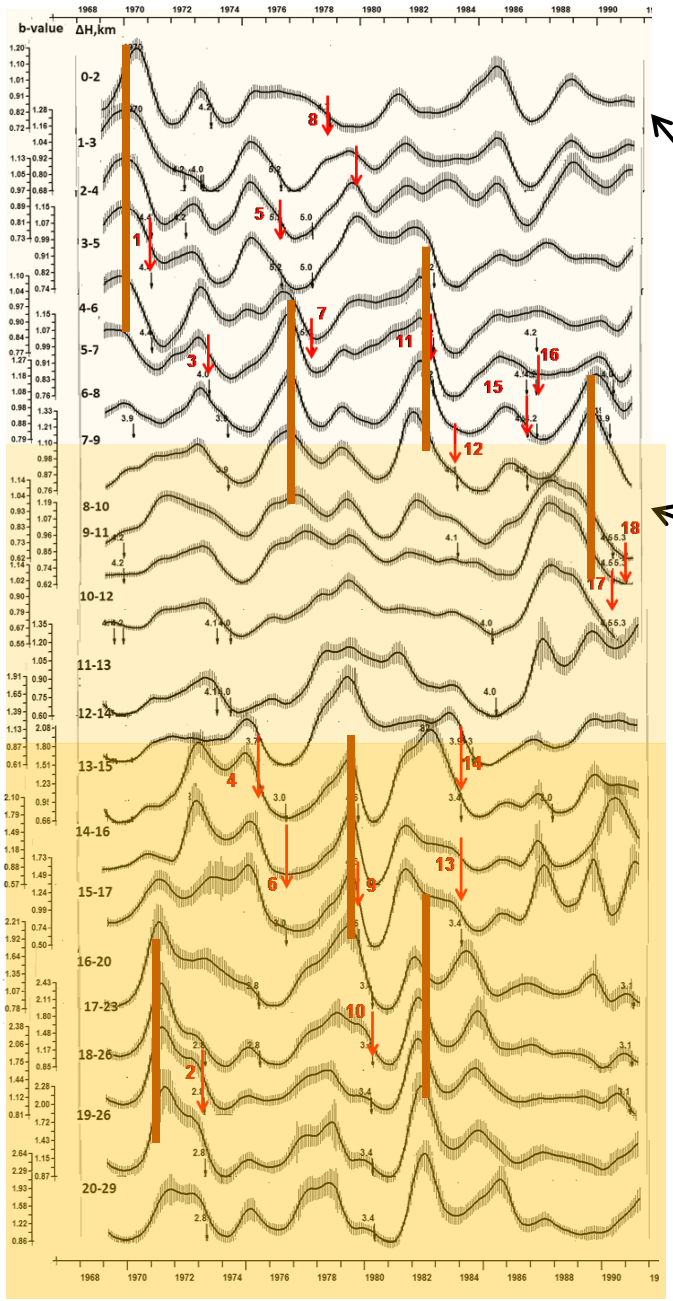
Временные вариации b-value в районе Каудаль по глубине в слоях ΔH 6 км с шагом 3 км



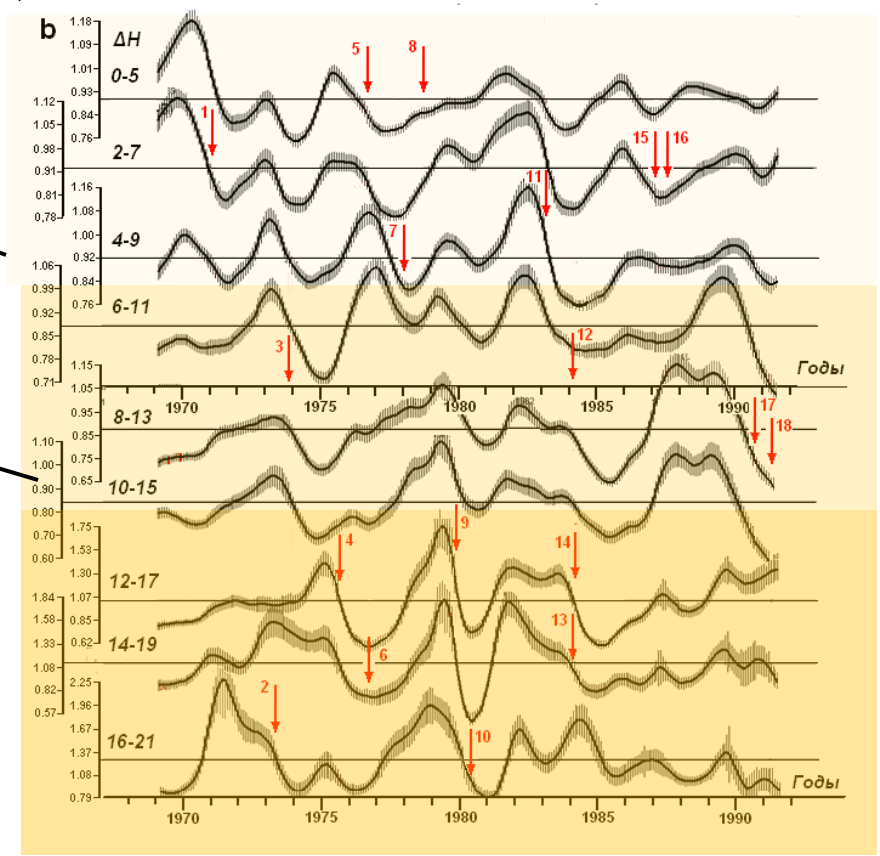
N	Date	H	Mag.
1	1971-02- 10	4	4.4
2	1973-04- 23	21	2.8
3	1973-11-13	11	4.1
4	1975-08-13	12	3.7
5	1976-09- 3	3	5.2
6	1976-09-30	15	3.0
7	1977-12-25	4	5.0
8	1978-09-26	0	4.7
9	1979-10-20	15	4.6
10	1980-05-19	20	3.4
11	1983-02-26	5	5.2
12	1984-02-19	9	4.1
13	1984-02-21	15	3.4
14	1984-03-12	12	3.9
15	1987-02-23	7	4.9
16	1987-07-17	6	4.1
17	1990-09-30	10	4.5
18	1991-04-26	10	5.2
19	1991-04-28	18	3.0

ΔH, км	b-value	Var(%)	Mm max	Near th
0-5	0.906	9.5	4.4	4214
2-7	0.922	8.9	4.4	4936
4-9	0.941	8.15	4.2	4.923
6-11	0.890	9.55	4.1	3633
8-13	0.878	14.2	4.1	2383
10-15	0.833	13.9	4.1	1559
12-17	1.047	24.1	3.7	851
14-19	1.170	23.9	3.0	464
16-21	1.283	27.2	2.8	286

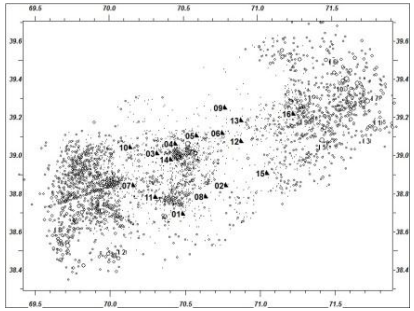
Временные вариацийй b-value по глубина в зоне Каудаль Гармского района Таджикистана

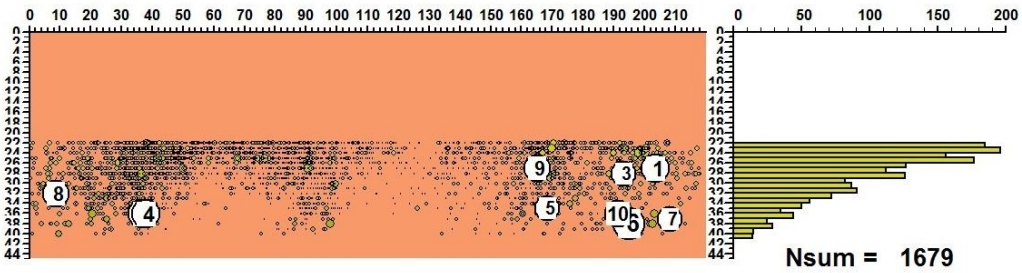


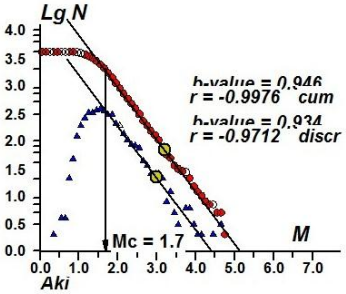
Временные вариации b-value в районе Каудаль по глубине в слоях ΔH 3 км с шагом 1 км

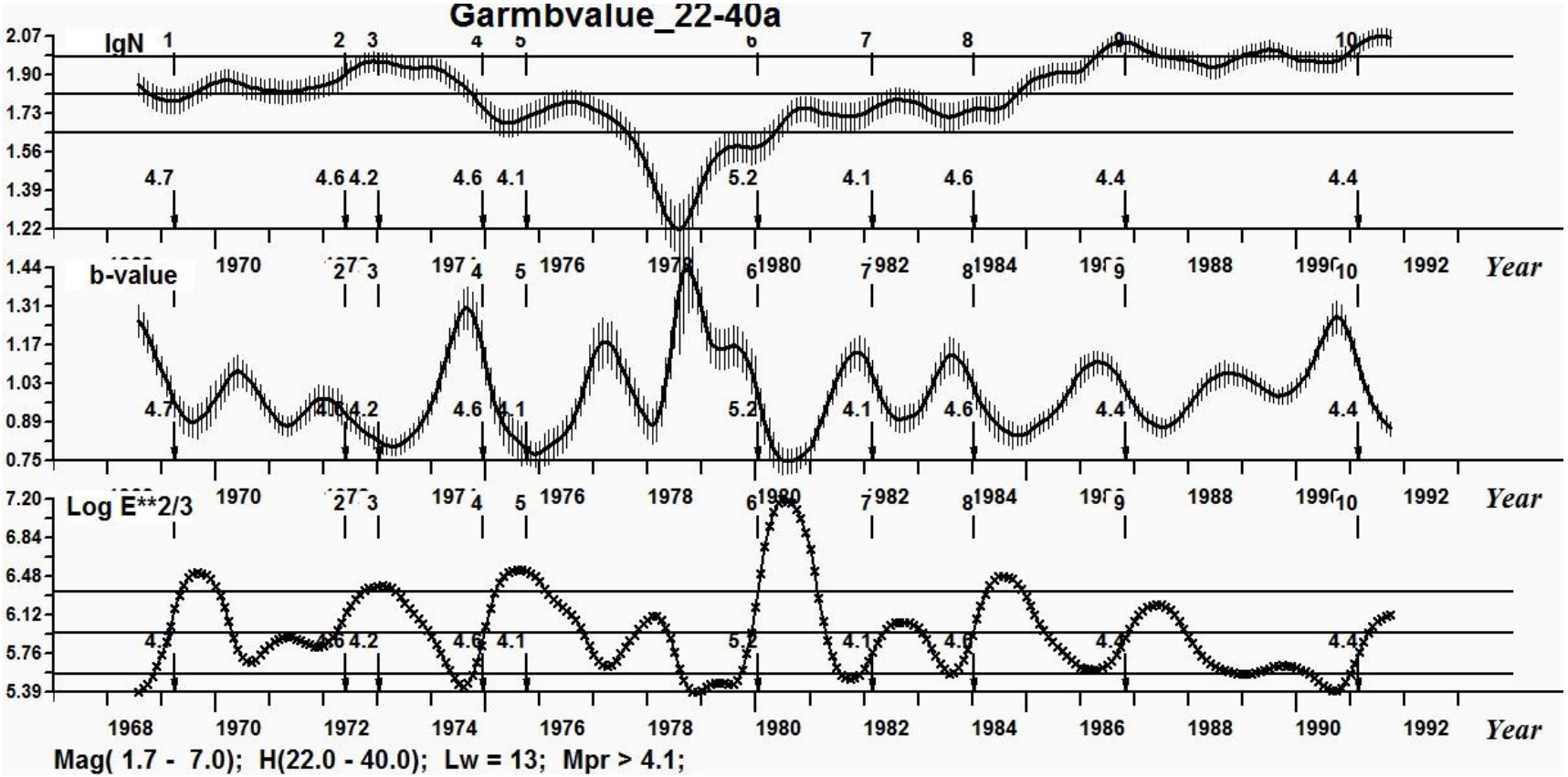


Временные вариации сейсмических параметров по данным выборки землетрясений с диапазона глубин 22-40 км для всего Гармского полигона









Результаты

- Гипоцентр потенциально возможного сильного землетрясений можно определить по глубинам, где наблюдаются относительно низкие значения параметра b-value в контролируемых локальных зонах сейсмоактивных регионов. Дифференциальное напряжение (σ1-σ3) на этих глубинах колеблется в пределах 300-400 МПА.
- Оценка гипоцентра и временного интервала прогнозируемого землетрясения можно оценить по величине максимальных амплитуд временных вариаций параметра b-value наблюдаемой на определенных глубинах. Временные аномалии дифференциального напряжения (σ1-σ3) колеблется в пределах 150 до 400 МПА
- Мощность слоя земной коры, на которых проявляются временные аномалии b-value перед землетрясением с M=4-5, достигает 5-6 км.
- Получена корреляционная зависимость между временными вариациями выделенной сейсмической энергии и дифференциальным напряжением (σ1-σ3), которые аппроксимируются степенной функцией с коэффициентом корреляции 0.71

Спасибо за внимание