

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРИНЦИПЕ ФРАКТАЛЬНОСТИ В СЕЙСМИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ

В.Н. ДРОБЫШЕВ

Владикавказский научный центр РАН и Правительства Республики Северная Осетия – Алания,  
г. Владикавказ, Россия

**Аннотация.** На основе полученных Г.А. Соболевым результатов эксперимента по разрушению твердого образца при одноосном сжатии выстроена цепочка теоретических представлений о сейсмическом процессе, позволяющих конкретизировать вычислительные операции с параметрами природной сейсмичности и удовлетворяющие принципу фрактальности. На примере выборки землетрясений по афтершоковой зоне Рачинского землетрясения 1991 г. выполнена обработка сейсмологических данных с применением новых методических приемов, получены результаты, конкретизирующие пространственную структуру сейсмического очага и позволяющие детально моделировать поле его сейсмического потенциала.

**Ключевые слова:** землетрясение, очаг, тектоника, сейсмичность, потенциал, повторяемость, фрактальность, Кавказ, Рачинское землетрясение.

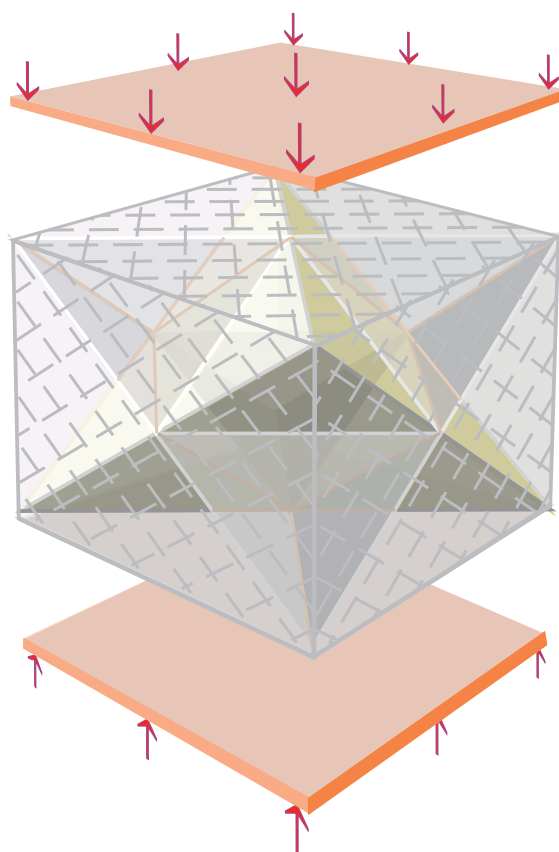
### ОСНОВНЫЕ КОНЦЕПЦИИ ФРАКТАЛЬНОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И НОВАЯ ВЕРСИЯ ГРАФИКА ПОВТОРЯЕМОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

**П**остановка комплекса задач в ходе изучения сейсмичности невозможна без опережающего формирования некоторой модели, качественно объясняющей действие механизма разрывообразования в земной коре.

В конце 1960-х годов суждения о природе сейсмичности и ее пространственном распределении обрели фундаментальное основание в концепции дрейфа континентов и тектонике плит. Процесс образования разрывных дислокаций в геологической среде логично согласуется с процессом нагнетания уровня геодинамического давления на конвергентных и дивергентных границах плит [Основы..., 1993; Современная..., 1995; Новейшая..., 2000]. Наиболее точное определение для такого рода деформаций предложено Б.В. Ризниченко – «сейсмическое течение горных пород».

Архитектура совокупности существующих разломов, отображенная на поверхности земной коры, имеет одну фундаментальную черту: это всегда система продольных и поперечных разрывов [Новейшая..., 2000].

Эксперимент, проведенный в работе по изучению закономерностей разрушения твердого образца кубической формы из эпоксидной смолы при одноосном, медленно нарастающем сжатии, позволил продемонстрировать стадийность этого процесса, достаточно развернув его во времени (рис. 1). В качестве промежуточных результа-



**Рис.1.** Образование системы трещин в эпоксидном образце. Тетраэдрическая модель разрывообразования

тов отмечалось развитие равномерной системы пересекающихся под прямым углом трещин, фиксирующихся на гранях образца и развернутых под углом  $45^\circ$  к направлению действия внешней силы [Новейшая..., 2000].

Изучение детальных закономерностей развития сейсмического процесса имеет более продолжительную историю. Еще в 30-х годах прошлого века была раскрыта взаимосвязь между интенсивностью (энергией) землетрясений и их количеством. Математически эта закономерность интерпретируется Б. Гутенбергом и Ч. Рихтером как *распределение Пуассона*, которое может быть представлено линейной закономерностью, известной под названием «график повторяемости землетрясений». Логика поиска линейной закономерности проста: это возможность распространения выявленных количественных соотношений из действительной части графика, для которой  $N \geq 1$  ( $N$  – повторяемость землетрясений), в область ожидаемых сейсмических событий, где  $N < 1$ . Однако именно в этом интервале зависимость Гуттенберга – Рихтера оказалась неопределенной, так как при трансформации некоторой функции распределения  $N=F(K)$  из равномерной системы координат с осями  $(x=K)$   $0'(y=N)$  в систему координат  $(x=K)$   $0''(y=\lg N)$  интервал «прогноза»  $1 \geq N \geq 0$  в системе  $(x=K)$   $0'(y=N)$  превращается в открытый интервал  $0 \geq \lg N > -\infty$  в системе  $(x=K)$   $0''(y=\lg N)$ , так как

$$\lim_{N \rightarrow 0} (\lg N_i) = -\infty \quad (1)$$

При  $N_i = 0$  функция  $N=F(K)$  не определяется.

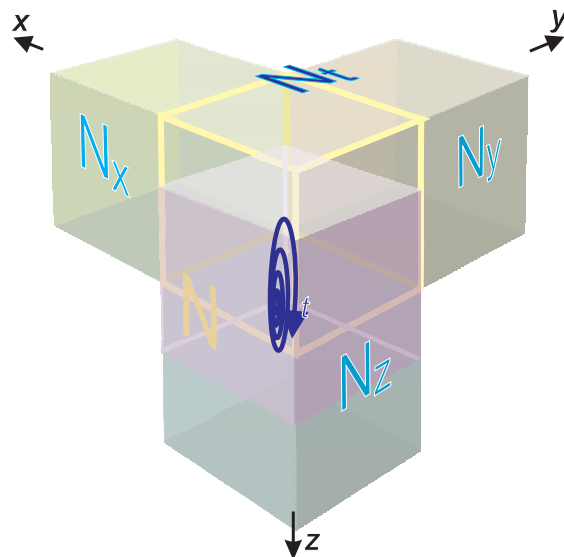
В реальной геологической среде облик системы сейсмодислокаций значительно осложняется неоднородностью геологического строения земной коры, изменчивостью по пространству и времени параметров геодинамических нагрузок, исторически сложившейся геофизической обстановкой глобального уровня. Стремление выявить феномен освобожденным от всех маскирующих его эффектов в такой ситуации – весьма оправданно. Рассмотрение величины  $N$  как обыкновенного количества случайных событий вполне может быть заменено восприятием  $N$  как физического параметра сейсмического процесса, дав ему соответствующее определение:  $N_i$  – количество условно одинаковых сейсмических событий, возникших в некотором конечном объеме литосферы  $V(x, y, z)$  за период наблюдения  $\tau$ .

Наглядным примером этого параметра может служить количество сейсмодислокаций  $i$  – энер-

гии, образованных за время  $\tau$  в объеме эпоксидного куба при одноосном сжатии. Стремление к достижению качественной однородности образца, создаваемого для проведения эксперимента, резонирует с работой над созданием теоретической модели сейсмического процесса, развивающегося в равномерной среде, подверженной воздействию равномерного геодинамического поля. Архитектура системы сейсмодислокаций в таких идеальных условиях, несомненно, представляется также идеально равномерной.

Обозначим в пространстве  $(x, y, z, t)$  данной модели трехмерный фрагмент кубической формы  $(x=a, y=a, z=a)$ , в объем которого  $V=a^3$  попадает  $N_i$  сейсмоцентров, возникших за время  $\tau$  (рис. 2). Увеличим один из линейных параметров куба (допустим, длину  $x$ ) в два раза. Размеры сторон полученного параллелепипеда:  $x=2a, y=a, z=a$ , объем его будет составлять  $V_x=2a^3$ . Из условия равномерности в его объем попадает  $2N_i$  сейсмоцентров.

Возвратившись к исходному кубу, произведем аналогичные действия с высотой  $z$  и шириной  $y$  поочередно, для того чтобы сделать промежуточный вывод: при увеличении любого одного линейного параметра исходного куба в  $k$  раз объемом новообразованного параллелепипеда будет охватываться  $k \cdot N_i$  сейсмоцентров.



**Рис. 2.** Измерения величины  $N$ . Двукратное увеличение каждого измерения ограниченного пространства, образующего величину  $N$  в изотропной среде:  $N=N_x=N_y=N_z=N_t$

Следующий этап рассмотрения исходного куба связан со временем. За время  $2\tau$  в его объеме  $V=a^3$  образуется  $2N_i$  сейсмоцентров, или в общем случае: увеличение исходной длительности времени наблюдения  $\tau$  в  $k$  раз получили в исходном кубе  $k \cdot N_i$  сейсмоцентров.

Такое детальное рассмотрение феномена  $N_i$  с четырех базисов его измерения необходимо для следующего промежуточного вывода: величина  $N_i$  одинаково реагирует на изменение величины любого из четырех своих базисов измерения, что, по сути, демонстрирует их равносильность. Результат расшифровывается следующим образом: при синхронном увеличении четырех базисов измерения величины  $N_i$  в пространстве–времени  $(x, y, z, t)$  в  $k$  раз, величина  $N_i$  изменяется в  $k^4$  раз. Введем новый параметр  $\rho_i^4 = N_i$ , или  $\rho_i = \sqrt[4]{N_i}$ , который можно использовать как линейную меру базисов измерения величины  $N_i$ . Разнородность измерений  $x, y, z$  и  $t$  – барьер не более чем психологический, все они есть длительность. Применение параметра  $\rho_i = y = \sqrt[4]{N_i}$  вместо  $y = \lg N_i$  трансформировало координатное поле построения графика повторяемости землетрясений, обеспечив его определенность в интервале  $1 \geq N \geq 0$ :

$$\lim_{N \rightarrow 0} \sqrt[4]{N_i} = 0. \quad (2)$$

$$N \rightarrow 0$$

При  $N_i = 0$  функция  $N=F(K)$  определяется.

Методика построения графика повторяемости землетрясений по сплошной выборке для любой ограниченной территории за некоторый выбираемый интервал времени  $\tau$ , была выработана опытным путем и является в данной работе неизменной. Порядок действий при построении графика повторяемости (рис. 3) следующий.

1. Количество представленных в выборке землетрясений распределяется вдоль горизонтальной оси с регулярной шкалой –  $K$  по признаку возрастания величины  $K$  – энергетического класса землетрясения.

2. Подсчет количества землетрясений  $N_i$  в  $i$ -интервале величиной 1.0 единицы измерения  $K$ , скользящем по регулярной шкале  $K$ . Шаг перемещения  $i$ -интервала: 0.1 единицы измерения  $K$ .

3. Извлечение корня четвертой степени из  $N_i$  с целью получения одномерной величины  $\rho_i$ :

$$\rho_i = \sqrt[4]{N_i}. \quad (3)$$

4. Для каждой  $i$ -позиции скользящего интервала значение параметра  $\rho_i$  ставится в соответ-

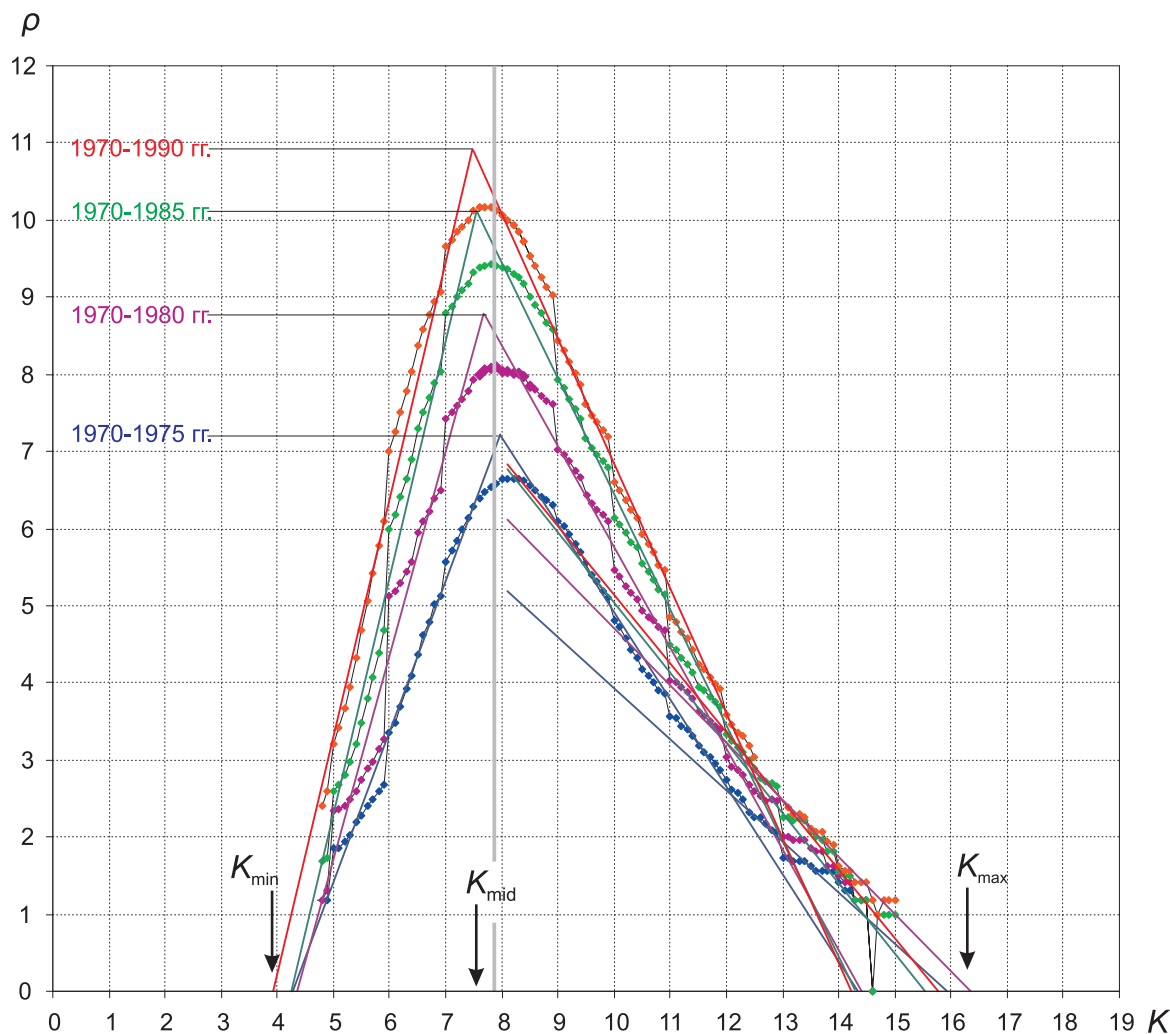
ствие значению  $K_i$ , определяющему верхний предел  $i$ -интервала.

5. Совокупность определений параметра  $\rho_i$  по всему диапазону шкалы  $K$  представляется в виде графика повторяемости.

На рис. 3. дана эволюция графика повторяемости землетрясений в новой версии для Кавказского региона за период 1970–1990 гг. К отличительным свойствам нового графика относятся: 1)  $\Lambda$ -образность с четким изломом; 2) прямолинейность обеих ветвей; 3) стабильная нацеленность эволюционирующих линейных трендов ветвей графика на определенные точки оси  $K$  – энергетического класса землетрясений:  $K_{\min}$  и  $K_{\max}$  при увеличении длины выборки; 4) по графикам, построенным для различных участков региона, определяются различные значения  $K_{\min}$ ,  $K_{\text{mid}}$  и  $K_{\max}$ . Все перечисленные свойства графика повторяемости энергетического класса  $K$  справедливы и для графика повторяемости магнитуды  $M$  землетрясения.

Наблюдение за процессом образования трещин в экспериментальном эпоксидном образце сопровождалось регистрацией исходящих из него звуковых сигналов – акустической эмиссии (АЭ). Интенсивность звуковых импульсов отождествлялась с величиной образующихся трещин. В результате был получен график повторяемости акустических импульсов, аналогичный графику повторяемости землетрясений [Соболев, 1993]. Возможность построения графика повторяемости и его линейность в средах (как изотропных, так и анизотропных) позволяет полагать, что деформации пространственно-временной равномерности развития сейсмического процесса, наблюдаемые в реальных условиях, влияют только на геометрию и ритмы его проявления, но никак не на фундаментальные свойства.

Поиск расчетного механизма, позволяющего делать прогнозные оценки, так же как и уже рассмотренные аспекты представления архитектуры сейсмического процесса, исходит из результатов эксперимента с эпоксидным кубом. Сочетание тетрагонального тетраэдра с собственной инверсией позволяет получить облик элементарного блока, отвечающего характеру системы трещин на гранях образца (см. рис. 1). Свойство тетрагонального тетраэдра делиться на подобные себе части гармонично вписывается в концепцию фрактальности сейсмического процесса – неизменности структуры процесса образования сейс-



**Рис. 3.** Семейство графиков повторяемости землетрясений, построенных по выборке для территории Кавказа ( $\varphi = 40.0^\circ\text{--}44.0^\circ$  с.ш.,  $\lambda = 41.0^\circ\text{--}50.0^\circ$  в.д.; количество строк 29223) по интервалам: 1970–1975 гг., 1970–1980 гг., 1970–1985 гг., 1970–1990 гг.;  $K$  – энергетический класс землетрясения;  $\rho_i$  – корень четвертой степени из  $N_i$  (см. формулу (3))

мических дислокаций при различных масштабах его рассмотрения.

Использование 4-го свойства графика повторяемости позволило получить оценку  $K_{\max}$  для множества небольших территорий региона и представить совокупный результат работы в виде карты сейсмического потенциала Кавказа по параметру  $K$  (рис. 4).

Свойства графика повторяемости в предложенной версии позволяют конкретизировать вычислительные операции по энергетическим и пространственно-временным параметрам сейсмического процесса как в действительной его части, сформированной уже происшедшими сейсмическими событиями, так и в прогнозной, и

представляют его носителем алгоритма фрактальной размерности в сейсмическом процессе.

В результате проведенного анализа сейсмичности территории Кавказа с применением новых методических приемов, основанных на концепции фрактальности сейсмического процесса, стало возможным определиться в следующих выводах.

1. Фрактальность сейсмического процесса – неотъемлемое его свойство, не зависящее от геологических условий.
2. Константы фрактальной размерности сейсмического процесса приурочены к конкретному объему геологической среды и не изменяемы в обозримом времени.



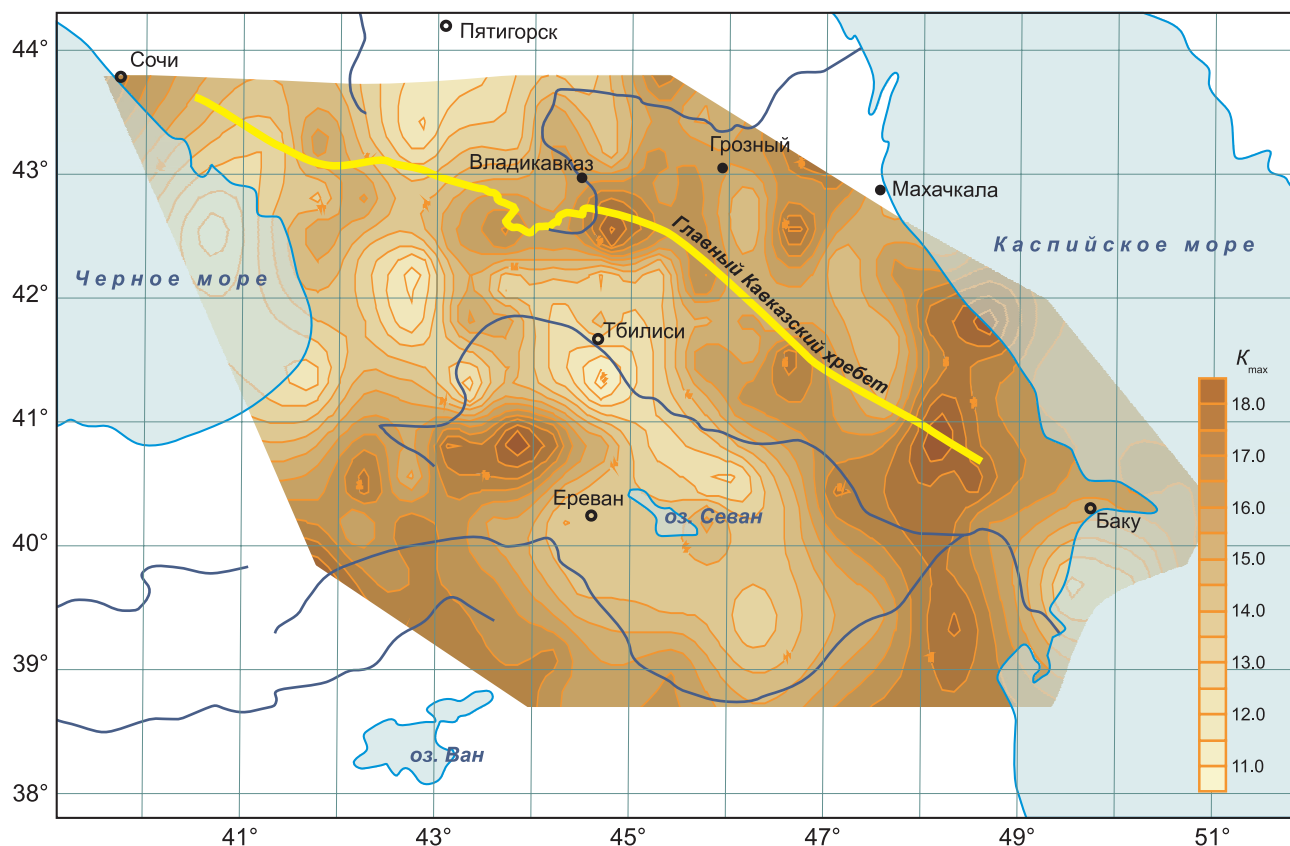


Рис. 4. Карта распределения сейсмического потенциала на территории Кавказа

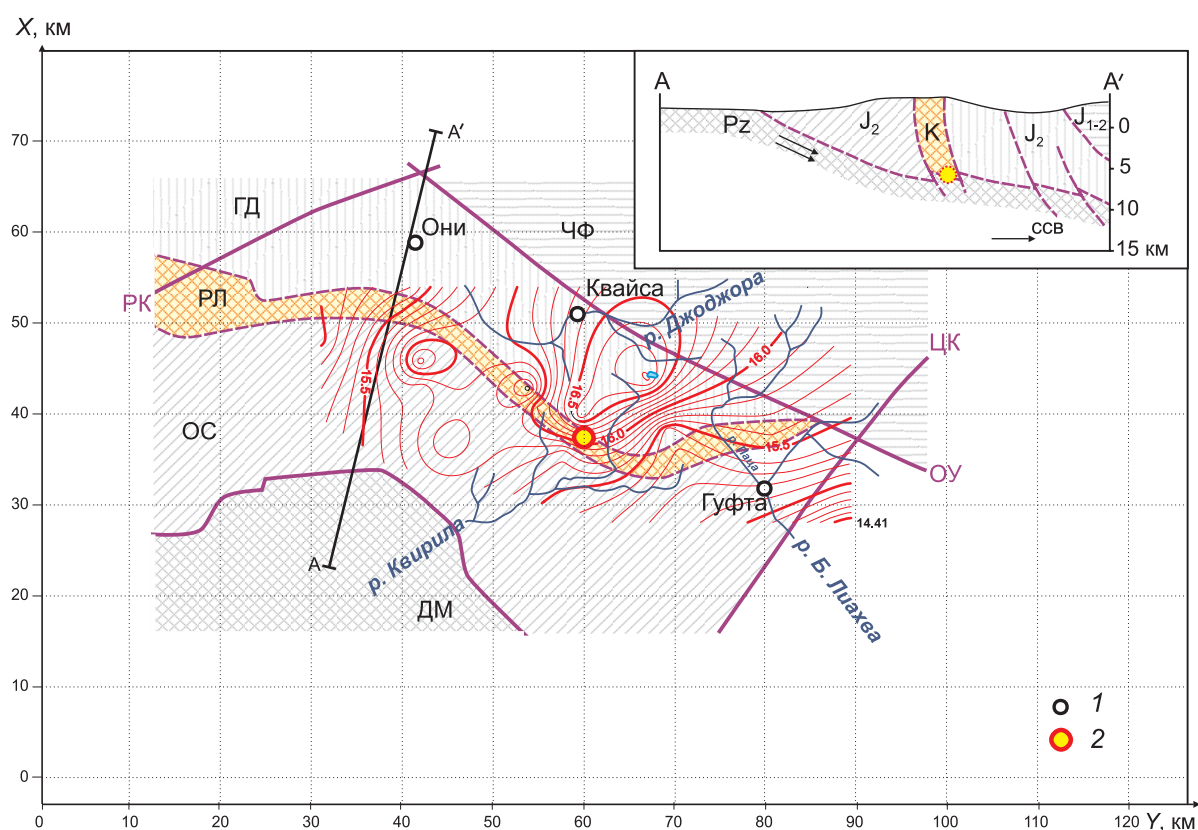
#### КАРТИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА $K_{\max}$ В ОЧАГОВОЙ ЗОНЕ РАЧИНСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 1991 Г.

В 1991 г. в зоне южного склона Главного Кавказского хребта произошло сильнейшее за всю историю сейсмологических наблюдений на Кавказе Рачинское землетрясение магнитудой  $M = 7.2$  и интенсивностью в эпицентре  $I = 8$  баллов. Землетрясение при высокой магнитуде и малой глубине очага не сопровождалось выходом на поверхность сейсморазрыва, но спровоцировало активизацию катастрофических склоновых процессов на большой территории. По разным методам анализа, основной толчок имел взбросо-надвиговый механизм по весьма пологой (менее  $35^\circ$ ) плоскости северо-западного простирания (азимут  $300^\circ$ ), наклоненной на северо-восток [Рогожин, 2009].

Этот механизм хорошо согласуется с геологическими представлениями об одной из главных

тенденций геологического развития Большого Кавказа – поддвигании фундамента Грузинской глыбы под тектонические зоны Главного Кавказского хребта. Таким образом, Рачинское землетрясение 1991 г. – один из первых, хорошо исследованных и описанных случаев сейсмичности, связанной с покровной тектоникой (рис. 5).

Плейстосейстовая область Рачинского землетрясения на востоке ограничена Цхинвали-Казбекским глубинным разломом, на юге – Окрибо-Сачхерской зоной и Дзирульским выступом Грузинской глыбы, на западе – поперечным Рионо-Казбекским разломом, отделяющим область Сванетско-Сорского антиклинория от восточной периклинали Гагро-Джавской зоны, на севере – Орхибско-Уцерским взбросо-надвигом, служащим здесь южной границей Чиаурского флишевого синклинория. Общая протяженность области составляет около 120 км по азимуту  $110^\circ$  при ширине 60 км (рис. 5) [Рогожин, Богачкин, 1993].



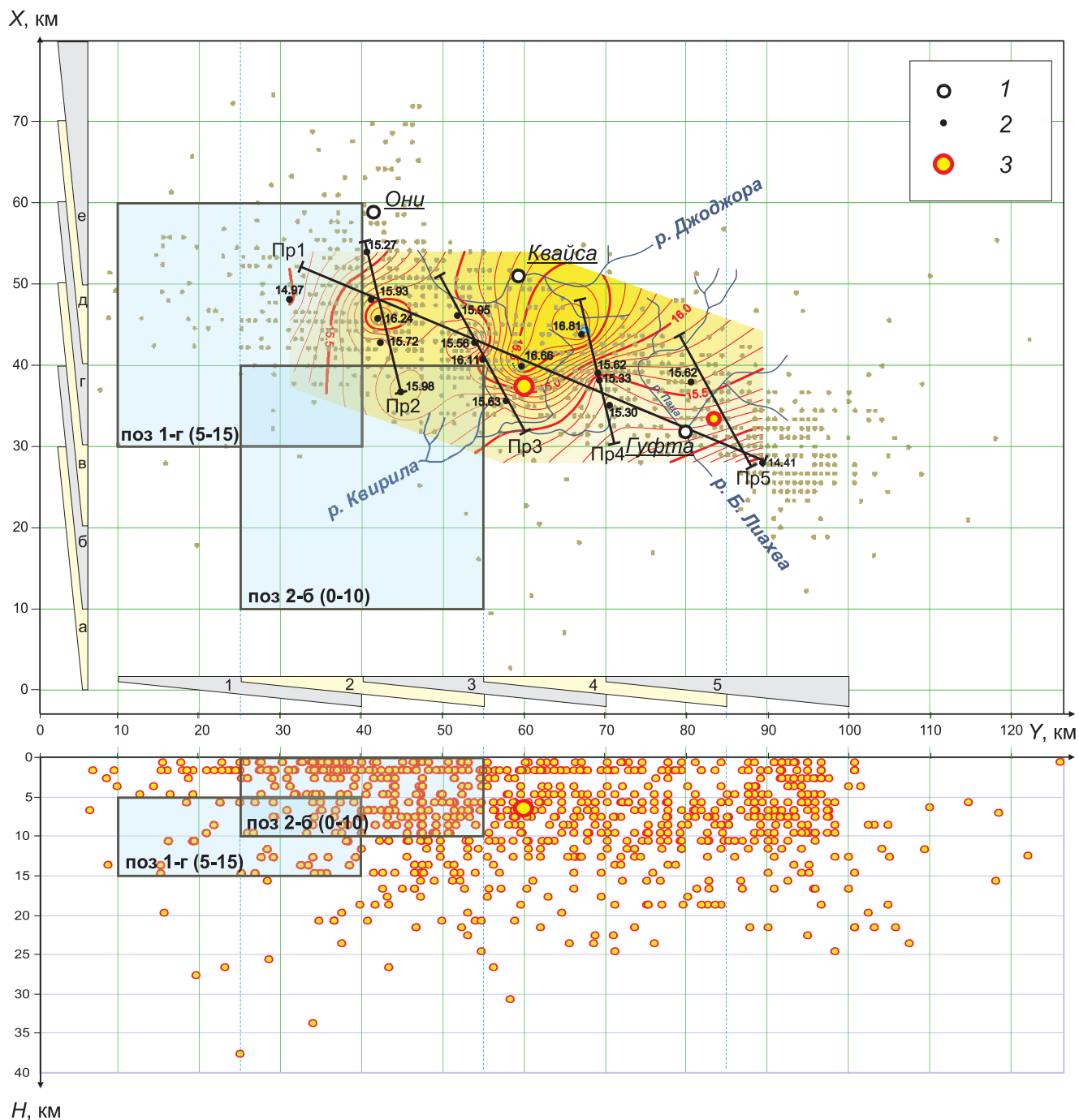
**Рис. 5.** Геолого-тектонические условия дислокации очага Рачинского землетрясения

1 – населенные пункты; 2 – фокус Рачинского землетрясения. На карте: ДМ – Дзирульский выступ срединного массива Грузинской глыбы, ОС – Окриба-Сачхерская зона, РЛ – Рача-Лечхумский прогиб, ГД – Гагро-Джавская зона, ЧФ – Чиаурский флишевый синклиниорий, РК – Риони-Казбекский разлом, ЦК – Цхинвали-Казбекский разлом, ОУ – Орхиско-Уцерский взбросо-надвиг. На врезке – тектонический разрез по линии А–А'

В работу по картированию сейсмического потенциала  $K_{\max}$  в области сейсмического очага Рачинского землетрясения была принята выборка из оперативного сейсмологического каталога Кавказа за период 29.04 – 31.12.1991 г. в границах:  $\varphi = 42.07^\circ - 42.72^\circ$  с.ш.,  $\lambda = 43.01^\circ - 44.47^\circ$  в.д. Число сейсмических событий 915. Для удобства восприятия градусные меры были преобразованы в метрические.

Относительно высокая пространственная плотность сейсмоцентров позволила более подробно исследовать вариации фрактальных соотношений в энергетической представительности афтершоков Рачинского землетрясения 1991 г. Из условия возможности построения графика повторяемости были определены размеры скользящего окна, формирующего выборку-фрагмент, составленную не менее чем из 50 строк.

На рис. 6 на фоне координатного разнота всех эпицентров, документированных в исходной выборке, в качестве примера демонстрируется плано-вертикальная позиция границ выборки-фрагмента «поз 1-г (5–15)» (1-г – позиция в плане, 5–15 – позиция по глубине, км) размером  $30 \times 30 \times 10$  км. Кроме того, использовались выборки увеличенного формата: по совокупности двух смежных позиций с целью достижения полного охвата зоны в направлении S–N. По всей афтершоковой зоне Рачинского землетрясения было сформировано 36 таких выборок, для которых были построены 36 графиков повторяемости и определены локальные значения сейсмического потенциала  $K_{\max}$ . Координаты точки приложения для каждого значения  $K_{\max}$  принимались равными среднему арифметическому соответствующих координат образующей выборки.



**Рис. 6.** Поле распределения сейсмического потенциала  $K_{\max}$  в границах афтершоковой зоны Рачинского землетрясения. Для рис. 6, 7 выборка 29.04.1991 г. – 31.12.1991 г. ( $\varphi = 42.07^\circ$ – $42.72^\circ$  с.ш.;  $\lambda = 43.01^\circ$ – $44.47^\circ$  в.д.; количество строк 915)

1 – населенные пункты; 2 – точки определения  $K_{\max}$ ; 3 – гипоцентр Рачинского землетрясения; позиции скользящего окна: а–е – в направлении S–N, 1–5 – в направлении W–E. Внизу – проекция фокусов афтершоков Рачинского землетрясения на вертикальную плоскость  $y - H$ , км

Сведения о позициях выборок-фрагментов и результатах их обработки с помощью построения графика повторяемости представлены в таблице. Данные о количестве ( $N$ ) сейсмических событий в выборках-фрагментах и достоверности построения линейного тренда сильной ветви графика

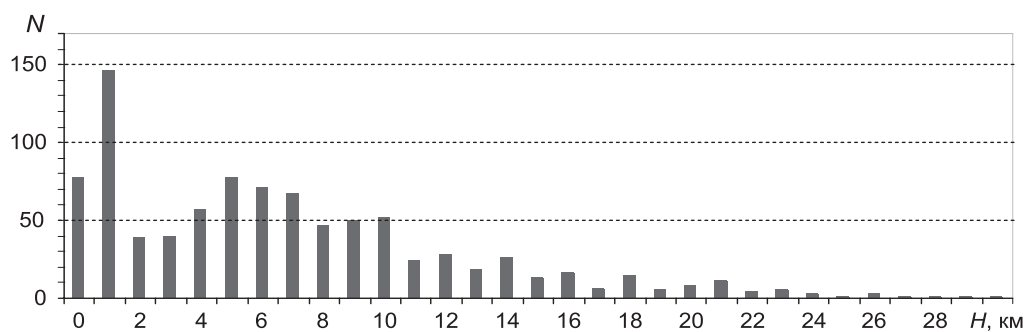
повторяемости ( $R^2$ ), приведенные в таблице, характеризуют уровень добротности определения параметра  $K_{\max}$ .

На первом этапе анализ совокупности полученных значений  $K_{\max}$  был проведен по глубинам для ярусов: 0–10 км, 5–15 км, 10–20 км. Малое ко-

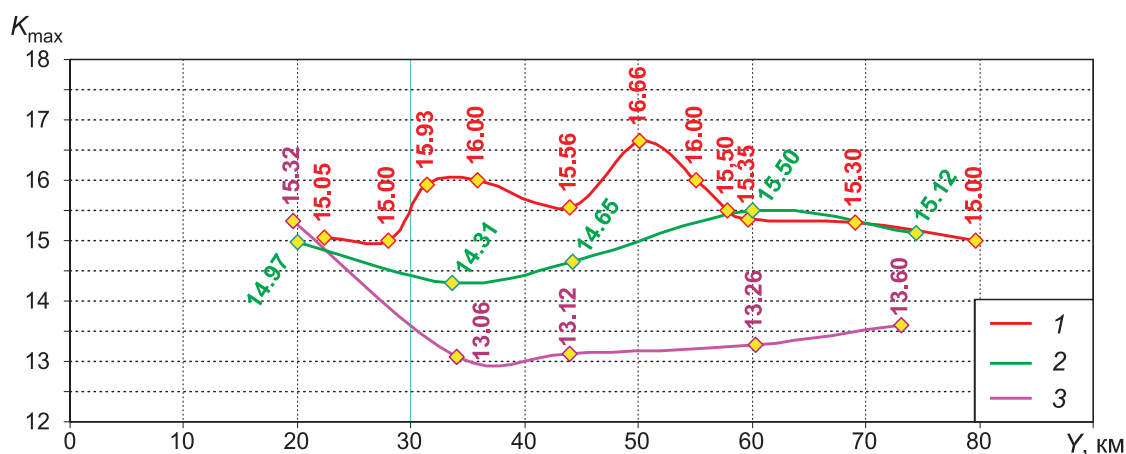
Параметры, рассчитанные по выборкам землетрясений, составленным в огранке скользящего окна

Номер выборки	Позиция окна		$H$ , км	$x_{\text{mid}}$	$y_{\text{mid}}$	$H_{\text{mid}}$ , км	$K_{\max}$	$N$	$R^2$
	W–E	S–N							
1	1	–	0–10	48.178	21.169	4.26	14.97	65	0.9242
2	1	–	5–15	47.333	20.015	8.98	14.97	57	0.9409
3	2	–	10–20	46.693	19.665	13.83	15.32	29	0.8738
4	2	–	0–10	46.142	31.867	3.36	15.89	282	0.9144
5	3	–	5–15	45.050	33.559	8.78	14.31	165	0.9909
6	2	–	10–20	44.583	34.066	13.77	13.06	79	0.9782
7	2	е	0–10	53.999	30.693	3.57	15.27	83	0.9337
8	2	д	0–10	48.152	31.220	3.78	15.93	232	0.9210
9	2	г	0–10	45.834	32.029	3.93	16.24	275	0.9517
10	2	в	0–10	42.865	32.356	3.98	15.72	199	0.9640
11	2	б	0–10	36.816	34.866	4.20	15.98	50	0.9449
12	3	вг	0–10	42.187	44.088	6.23	16.01	190	0.9726
13	3	вг	5–15	41.882	44.195	8.54	14.65	214	0.9905
14	3	вг	10–20	42.013	43.923	13.27	13.12	99	0.9886
15	3	вг	8–18	42.292	44.116	11.45	13.79	133	0.9881
16	3	вг	6–16	42.066	43.764	9.46	13.85	192	0.9833
17	3	вг	4–14	41.949	44.240	8.38	14.59	209	0.9902
18	3	вг	2–12	41.822	44.687	7.76	14.74	187	0.9868
19	3	д	0–10	46.194	41.848	6.29	15.95	120	0.9679
20	3	г	0–10	42.857	43.955	6.29	15.56	185	0.9656
21	3	в	0–10	40.821	44.978	6.17	16.11	161	0.9576
22	3	б	0–10	35.727	47.827	6.10	15.63	69	0.9592
23	3Ц	–	0–8	39.969	49.728	5.05	16.66	80	0.9324
24	3Ц	–	0–10	40.149	50.067	6.10	16.19	104	0.9485
25	4	–	0–10	38.381	59.234	4.98	15.50	254	0.9853
26	4	–	5–15	37.619	60.071	8.36	15.50	194	0.9737
27	4	–	10–20	38.253	60.311	12.94	13.26	89	0.9926
28	4	д	0–10	43.866	57.122	4.81	16.81	97	0.9412
29	4	г	0–10	39.126	59.141	5.00	15.62	241	0.9882
30	4	в	0–10	38.253	59.322	4.97	15.33	246	0.9804
31	4	б	0–10	35.171	60.574	5.06	15.30	156	0.9801
32	5	–	0–10	33.160	74.935	6.27	15.15	181	0.9857
33	5	–	5–15	33.237	74.431	8.24	15.12	194	0.9762
34	5	–	10–20	34.496	73.173	12.88	13.60	77	0.9613
35	5	г	0–10	38.031	70.603	6.29	15.62	92	0.9874
36	5	а	0–10	38.126	79.412	6.25	14.41	89	0.9078





**Рис. 7.** Диаграмма распределения количества землетрясений по глубине в границах афтершоковой зоны Рачинского землетрясения



**Рис. 8.** Диаграмма распределения уровня сейсмического потенциала  $K_{\max}$  в афтершоковой зоне Рачинского землетрясения с запада на восток (W–E) для глубин: 1 –  $H = 0\text{--}10$  км, 2 –  $H = 5\text{--}15$  км, 3 –  $H = 10\text{--}20$  км

личество сейсмических событий на глубинах, превышающих 20 км, не позволило применить методику скользящего окна в более глубоких ярусах (рис. 7). На рис. 8 представлены значения локальных определений  $K_{\max}$  по отмеченным ярусам вдоль линии Пр1 с запада на восток (см. рис. 6 и 7). В центральной области очага отмечается значительное ослабление сейсмического потенциала с увеличением глубины: от  $K_{\max} = 16.66$  для яруса 0–10 км до  $K_{\max} = 13.20$  в ярусе 10–20 км. На западной окраине очага значение  $K_{\max} \sim 15.20$  справедливо для всей рассмотренной линейки глубин. В восточной части  $K_{\max} \sim 15.20$ , определяемый для ярусов 0–10 км и 5–15 км, заметно ослабляется на глубинах 10–20 км, не превышая значения  $K_{\max} \sim 13.60$ .

На втором этапе было построено поле сейсмического потенциала для верхнего яруса геофизи-

ческой среды (0–10 км) как наиболее сейсмически активного из всех ярусов (см. рис. 6). В краткой характеристике полученного изображения можно отметить закономерно резкое падение уровня  $K_{\max}$  в направлении с севера на юг по всей области сейсмического очага. Четко вырисовываются два аномальных выступа: западный и центральный, к южному мысу которого приурочен фокус Рачинского землетрясения. На рис. 5 наглядно видно, что центральный аномальный выступ достаточно четко ложится в границы тектонического выступа Гагро-Джавской зоны, а положение западного аномального выступа согласуется с границами тектонического выступа Оскриба-Сачхерской зоны. Можно предположить, что отмеченные тектонические выступы индуцированы соответствующим рельефом субстрата Дзирульского массива, активно поддвигающегося с юга под складчатую

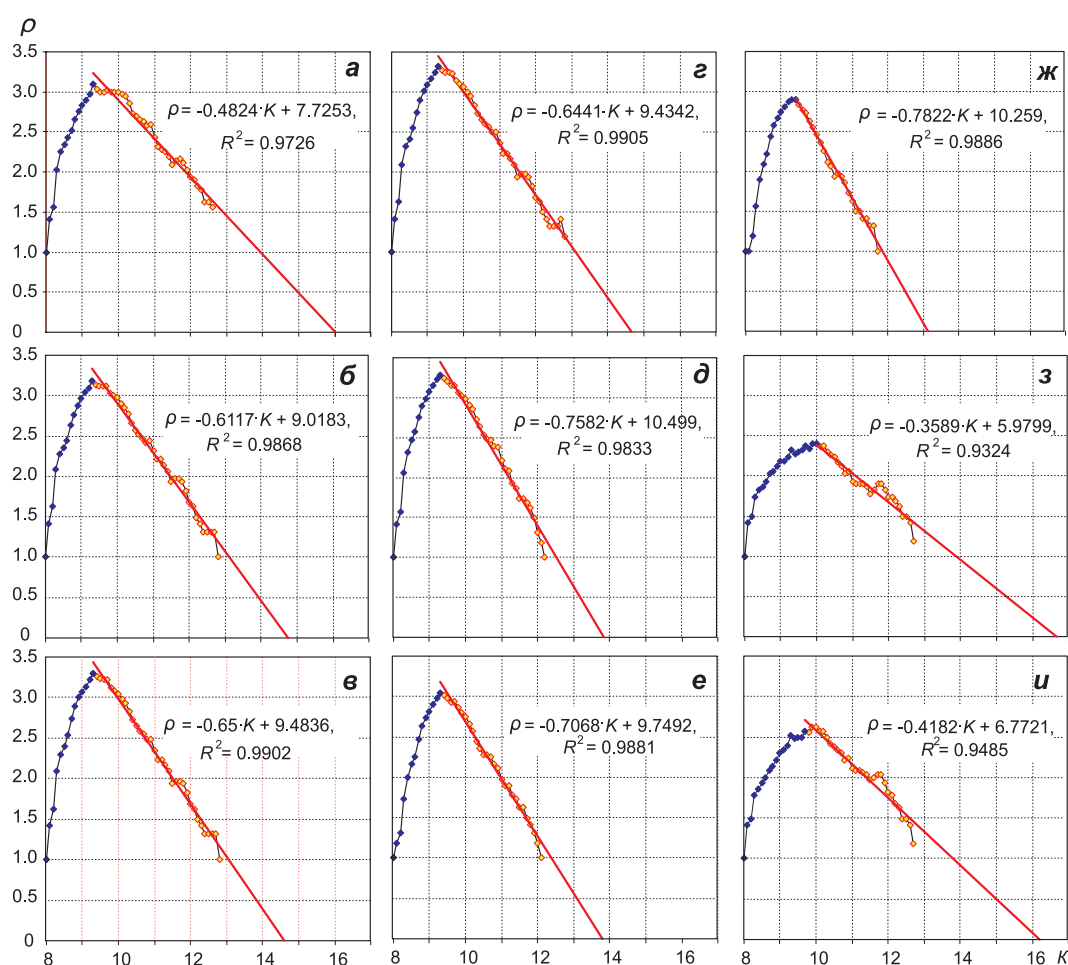
зону Большого Кавказа, расположенную к северу. Фокус Рачинского землетрясения пространственно совпадает с Рача-Лечхумским прогибом, а по глубине приурочен к полого падающей на север кровле Дзирульского массива.

Не меньший интерес вызывает прослеживание изменчивости параметра  $K_{\max}$  по глубине. С целью лаконичности изложения выберем одну колонну выборок по позиции: 3-вг, содержащую фокус Рачинского землетрясения. Выборки были образованы по глубинам: 0–10, 2–12, 4–14, 5–15, 6–16, 8–18, 10–20 км.

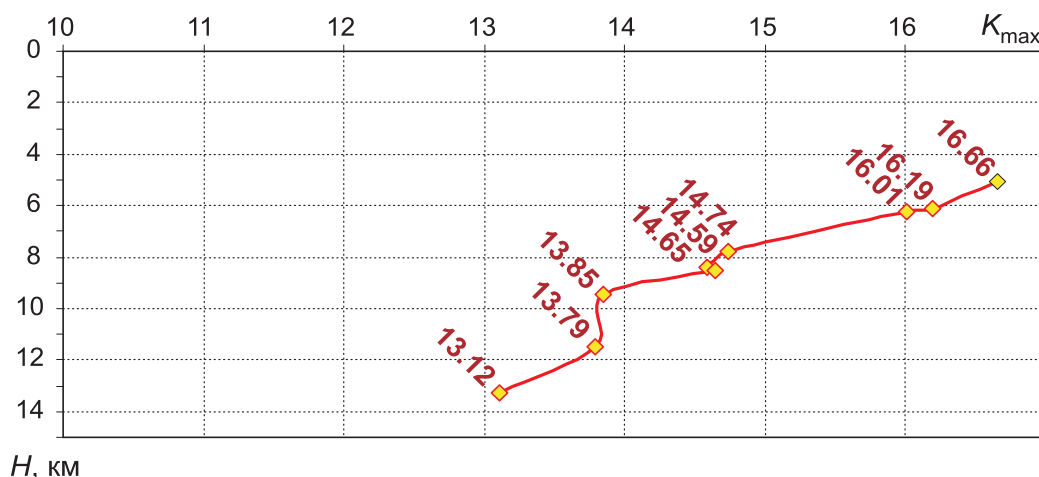
Кроме основных выборок из колонны, были сделаны еще две выборки меньшего формата (20×20 км,  $x = 30–50$  км,  $y = 50–70$  км): 3-Ц (0–

8 км) и 3-Ц (0–10 км), нацеленные на эпицентр. Графики повторяемости, построенные по указанным выборкам, представлены на рис. 9. Обращает на себя внимание факт безусловного роста показателя  $K_{\max}$  по мере концентрирования выборки вокруг фокальной области очага Рачинского землетрясения 1991 г. вследствие соответствующего изменения фрактальных соотношений в энергетической представительности рассматриваемых групп сейсмических событий.

На рис. 10 показана зависимость изменения параметра  $K_{\max}$  с глубиной для позиции скользящего окна 3-вг. Анализируя эту зависимость, можно отметить, что фокус землетрясения с  $K=16.4$  мог располагаться не глубже 6 км.



**Рис. 9.** График повторяемости землетрясений: а – по выборке № 12, позиция 3-вг (0–10 км); б – по выборке № 18, позиция 3-вг (2–12 км); в – по выборке № 17, позиция 3-вг (4–14 км); г – по выборке № 13, позиция 3-вг (5–15 км); д – по выборке № 16, позиция 3-вг (6–16 км); е – по выборке № 15, позиция 3-вг (8–18 км); ж – по выборке № 14, позиция 3-вг (10–20 км); з – по выборке № 23, позиция 3-Ц (0–8 км); и – по выборке № 24, позиция 3-Ц (0–10 км). В поле диаграммы показано уравнение тренда ветви сильных землетрясений графика повторяемости и  $R^2$  – достоверность аппроксимации



**Рис. 10.** Диаграмма изменения уровня сейсмического потенциала  $K_{max}$  с глубиной ( $H$ ) в афтершоковой зоне Рачинского землетрясения по позиции 3-вг (центральной части очага)

Стремительное падение сейсмической активности геологической среды на глубинах 6–10 км нуждается в некоторых разъяснениях. Интерпретация геолого-тектонического строения очаговой зоны дана в работе Е.А. Рогожина [2009, с. 20–21]: «Построение трехмерной томографической модели латерального и вертикального распределения неоднородностей в очаговой зоне Рача-Джавского землетрясения [Арефьев и др., 2006] позволяет понять глубинное строение геологической среды и соотношение поверхности сместителя в очаге с основными структурами в недрах. Согласно полученным данным, четко выделяются два основных глубинных подразделения в верхней части земной коры – кристаллический фундамент Дзирульского выступа со скоростями  $V_p = 6.5–7.5$  км/с и осадочно-вулканогенный чехол со скоростями  $V_p = 3.0–4.5$  км/с в области развития осадочных пород на южном склоне складчатой системы и  $V_p = 4.5–5.5$  км/с в местах распространения вулканических толщ, образующих чехол Грузинской глыбы. На всей территории очаговой области поверхность раздела фундамента и чехла залегает примерно на глубине 8–10 км, немного заглубляясь к северу. С востока и запада выявлены резко выраженные уступы, на которых поверхность фундамента быстро погружается до глубины 15 км (на западе) и 17–18 км (на востоке)». Таким образом, фокус Рачинского землетрясения расположен в «гребневой зоне» Дзирульского массива и обусловлен активностью покровной тектоники.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика изучения фрактальных соотношений в энергетической представительности сейсмического процесса открывает возможность пространственного моделирования поля сейсмического потенциала. Результаты, получаемые только по сейсмологическим данным, логично вписываются в картину геолого-тектонического строения рассматриваемого блока земной коры. Поле  $K_{max}$ , разработанное для территории Кавказа (см. рис. 4), может послужить исходным для дальнейшего более детального рассмотрения аномальных зон и выявления локальных сейсмических очагов. Весьма интересно направление по использованию новой версии графика повторяемости для оценки уровня подготовки сильного землетрясения, ведь при его формировании время закладывается по двум параметрам:  $\rho$  – базису измерения  $N$ ,  $\tau$  – длине выборки.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность доктору геолого-минералогических наук А.Ф. Грачеву, доктору геолого-минералогических наук Е.А. Рогожину, члену-корреспонденту РАН Г.А. Соболеву (ИФЗ РАН) за полезные советы и рекомендации, а также председателю ВНЦ РАН и Правительства Республики Северная Осетия – Алания, доктору физико-математических наук А.Г. Кусраеву за постоянное внимание к разработке предложенной методики.

## ЛИТЕРАТУРА

- Арефьев С.С., Рогожин Е.А., Быкова В.В., Дорбат К. Глубинная структура очаговой зоны Рачинского землетрясения по сейсмотомографическим данным // Физика Земли. 2006. № 1. С. 30–44.
- Новейшая тектоника, геодинамика и сейсмичность Северной Евразии / Под ред. А.Ф. Грачева. М.: Пробел, 2000. 487 с.
- Современная динамика литосферы континентов: Подвижные пояса / Под ред. Н.А. Логачева, В.С. Хромовских. М.: Недра, 1995. 560 с.
- Рогожин Е.А. Сейсмотектоника центрального сектора Большого Кавказа как основа для сейсмического мониторинга и оценки сейсмической опасности // Вестн. ВНИИ. Владикавказ, 2009. Т. 9, № 4. С. 16–22.
- Рогожин Е.А., Богачкин Б.М. Альпийская и новейшая тектоника района Рачинского землетрясения // Физика Земли. 1993. № 3. С. 3–11.
- Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.

## Сведения об авторе

**ДРОБЫШЕВ Валерий Николаевич** – инженер, ВНИИ РАН и РСО-А. 362027, г. Владикавказ, ул. Маркуса, д. 22. Тел.: (8672) 50-18-48. Тел.: дом. (8672) 699311, моб. 8-928-268-23-24. E-mail: dvn4444@rambler.ru

THEORETICAL CONCEPT OF THE FRACTAL PRINCIPLE  
IN THE SEISMIC PROCESS

V.N. DROBYSHEV

Vladikavkaz Scientific Center of the RAS and the Government of the Republic North Ossetia–Alania,  
Vladikavkaz, Russia

**Abstract.** We produced a chain of theoretical considerations of the seismic process based on experimental results in the destruction of a solid sample through unidirectional compression, as obtained by G.A. Sobolev. These considerations satisfy the fractal principle and enable us to make concrete estimates of the parameters of natural seismicity. Using the new procedures we processed seismological data on aftershocks of the Racha earthquake of 1991. As a result, we obtained a spatial model of the Racha earthquake source.

**Keywords:** earthquake, source, tectonics, seismicity, potential, recurrence, fractality, Caucasus, Racha earthquake