

плит. Близкое соответствие характеристик деформационных волн по данным наблюдений в Копетдагском регионе и в Южной Калифорнии не позволяет внести коррективы в интерпретацию установленного эффекта, предложенную в [3] на основе модели низкочастотных колебаний упругой литосферы на вязкоупругом астеносферном слое, которые возникают при подвижке по глубинному разлому на контакте литосферных плит [4, 5].

Принципиальное значение для объяснения природы деформационных волн и связанной с их распространением временной изменчивости свойств геофизической среды имеют представления о дискретном, блоковом строении последней [1]. Наиболее вероятной причиной высокой тензочувствительности горных массивов, проявляющейся в относительных изменениях скоростей сейсмических волн $\sim 10^{-3}$ при характерных для деформационных волн вариациях объемной деформации $\sim 10^{-6}$, по-видимому, является дискретная, блоковая структура среды. Теоретическое и комплексное экспериментальное изучение процессов деформирования в таких средах является одной из фундаментальных задач современных геофизических исследований.

ЛИТЕРАТУРА

Сб. Дискретные свойства геофизической среды

Москва, Наука, 1989

УДК 550.34

УДК 550.348.098.64

А.И. ЗАХАРОВА, О.Е. СТАРОВОЙТ, Ф.Л. ЯКОВЛЕВ

БЛОКОВАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА

Введение. Регион Северного Кавказа располагается в юго-западной части РСФСР, на территории Краснодарского и Ставропольского краев, Кабардино-Балкарской, Северо-Осетинской и Чечено-Ингушской автономных республик. В геологическом отношении это сложнопостроенный регион, находящийся на сочленении двух крупных тектонических структур: с севера — Скифской плиты с ее южной окраиной — Ставропольским поднятием и Минераловодским выступом, с юга — альпийского мегантиклинория Большого Кавказа и сопряженных с ним альпийских прогибов — Индоло-Ку-

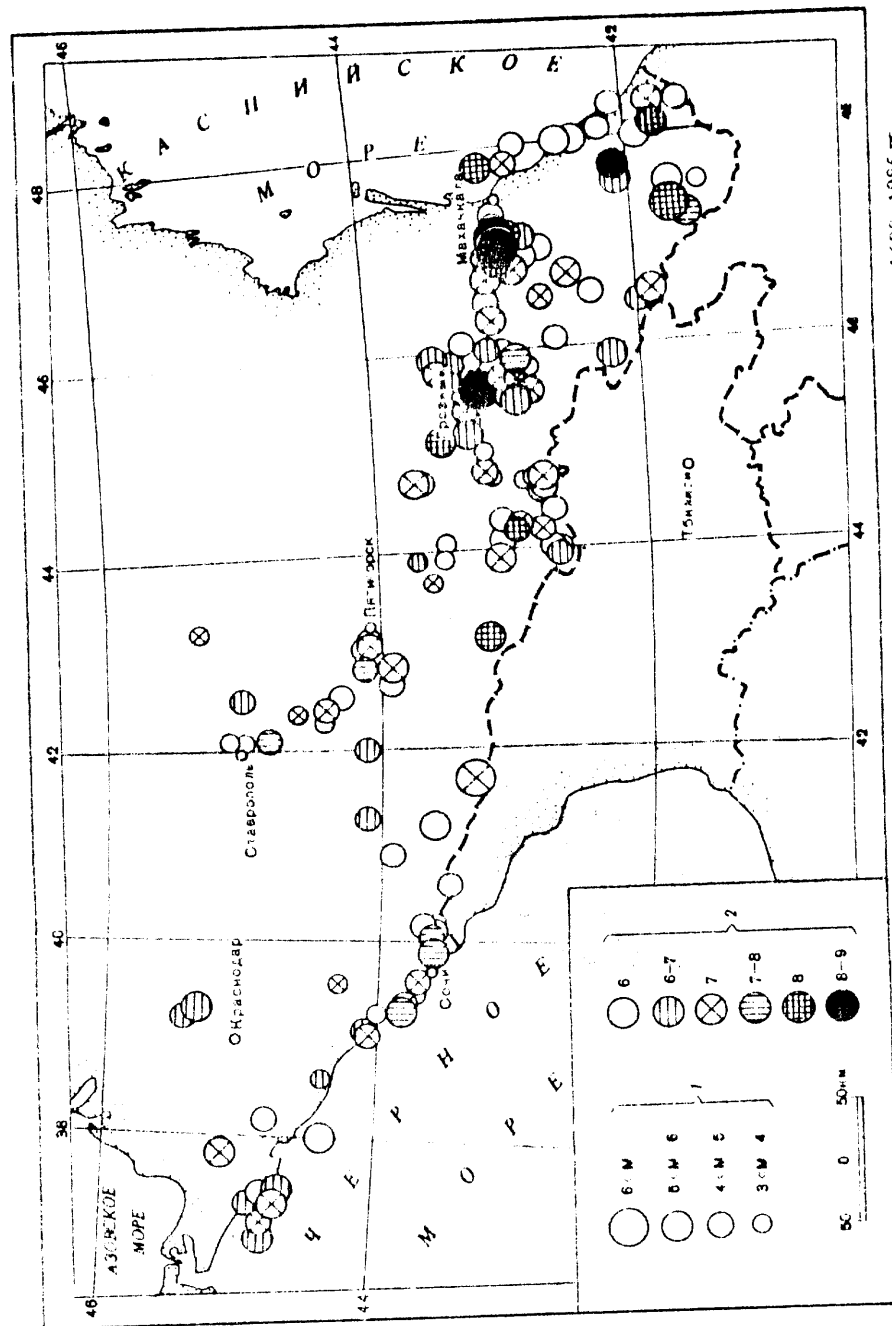


Рис. 1. Схема эпицентров землетрясений Северного Кавказа с силой 6 баллов и более за 1688-1965 гг.
1 - магнитуда; 2 - близость

банского и Терско-Каспийского. Наличие жесткой плиты на севере региона и продолжающееся поднятие Большого Кавказа со средней скоростью до 10 мм/год обусловило развитие многочисленных тектонических нарушений разных направлений как альпийского, так и более позднего заложения, магматическую деятельность, с которой связаны минеральные источники, а также повышенную сейсмическую активность. Сильные землетрясения с разрушительным эффектом на поверхности известны здесь еще по летописным данным и до настоящего времени.

Несмотря на необходимость реальных оценок сейсмической опасности в этом экономически важном регионе с большой плотностью населения, хорошо развитыми промышленностью и сельским хозяйством, со множеством курортов, сейсмичность здесь изучена слабо. Главной причиной этого является недостаточно развитая сеть сейсмических станций. Поэтому в 1986–1987 гг. В Опытнометодической экспедиции (ОМЭ) ИФЗ АН СССР была составлена Программа развития сейсмических наблюдений на Северном Кавказе, предусматривающая создание трех локальных систем радиотелеметрии, которые смогут обеспечить регистрацию землетрясений с энергетического класса $K \geq 6$. При подготовке программы был обобщен большой материал по опубликованным ранее данным, который позволил выявить ряд особенностей проявления местной сейсмичности.

В настоящей статье проведен анализ этих особенностей и сделана попытка объяснить их с позиции блокового строения земной коры [1–3].

Пространственное распределение очагов землетрясений. Для обобщения сейсмологических данных был составлен каталог землетрясений Северного Кавказа, насчитывающий ~1000 землетрясений, известных здесь с 63 г. до н.э. по настоящее время [4–6]. На рис. 1 показано распределение эпицентров землетрясений с силой 6 баллов и более по территории региона, которые ощущались на поверхности. Наибольшая интенсивность – 8–9 баллов – отмечена в районе Грозного и Махачкалы; 8 баллов – Ставрополья, Тамани, Северной Осетии; 7–8 баллов – Сочи и Кавказских Минеральных Вод; 7 баллов – Анапы, Туапсе, Нальчика и Нижней Кубани; 6–7 – Верхней Кубани. Из рис. 1 видно, что эпицентры ощутимых землетрясений распределены по площади неравномерно, образуя отдельные скопления на указанных территориях. При этом почти все выделенные районы являются сейсмически активными весь описываемый период времени. Так, в районе Грозного, где в 1976 г. имело место Черногорское землетрясение с интенсивностью на поверхности 8–9 баллов и $M = 6,4$, с конца прошлого века и до 1985 г. известно более 20 землетрясений с силой 6 баллов и выше. К наиболее сильным из них относятся 8-балльное землетрясение 1912 г. с $M = 5,7$; 7–8 балльное Веденское 1933 г. с $M = 5,2$ и около десяти 7-балльных землетрясений, проявившихся в 1868, 1928, 1966, 1969, 1971, 1974 гг. Черногорское землетрясение 1976 г. сопровождалось роем афтершоков; в 1984 г. практически в этой же эпицентральной зоне с разницей в 9 ч произошли два землетрясения с силой 6–7 баллов и $M = 5,2–5,3$, за которыми последовали многочисленные повторные толчки.

Район Ставропольского поднятия является единственным районом Скифской плиты, где происходят ощутимые землетрясения. Первое из них – Ставропольское с силой 6–7 баллов ($M = 4,6$) отмечено в 1827 г.; три 7-балльных землетрясения – Воронежское с $M = 4,1$, Владимирское с $M = 3$ и Невинномыское с $M = 3,8$ произошли соответственно в 1895, 1947 и 1963 гг. и, наконец, второе Ставропольское землетрясение 1971 г. с $M = 4,5$ проявилось на поверхности с силой $I_0 = 8$ баллов; еще два 8-балльных землетрясения на территории Северного Кавказа, одно близ Таманского полуострова и другое – в Северной Осетии, отмечены в летописях. Первое из них относится к 63 г. до н.э. и известно как Пантикапейское, "самое сильное из всех когда-либо бывших", разрушившее ряд городов по обе стороны Керченского пролива, в том числе г. Пантикапею (Керчь). Второе имело место в 1350 г. в Чегемском ущелье, оно вызвало обвалы в горах, под которыми было погребено несколько селений.

В районе Сочи Мацестинских минеральных источников – проявления 7–8-балльных землетрясений зафиксированы с 1870 г. Это Сочинский рой 1870 г. с $M = 5,3$ для основ-

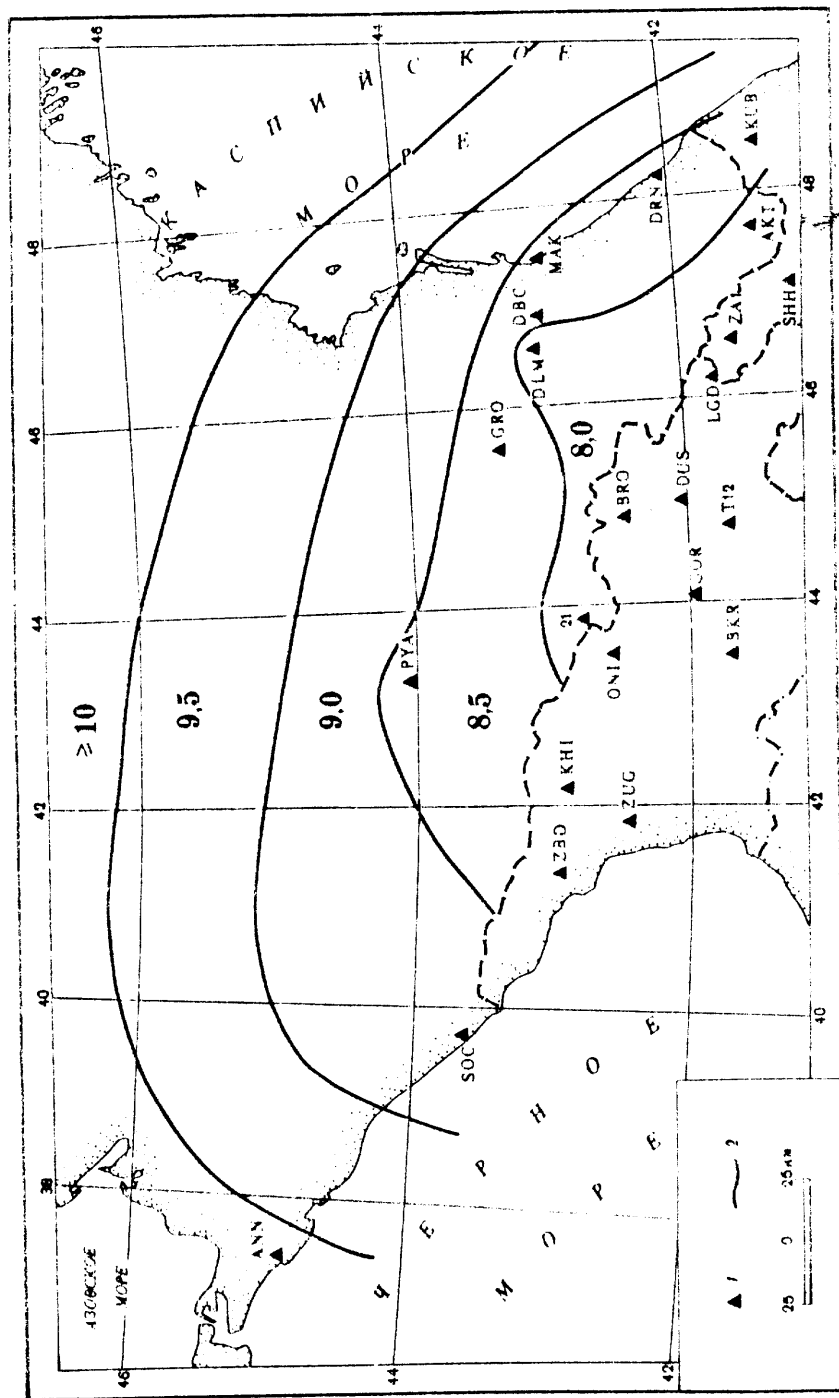


Рис. 3. Схема энергетической предельной области землетрясений
1 — сейсмостойкие станции, 2 — границы зон разных классов энергии К

ного толчка, Краснополянский рой 1955 г. с $M = 4,4$ для основного толчка, Сочинский рой 1970 г. с $M = 5,1$ для основного толчка, а также менее сильные землетрясения с $I_0 = 7$ баллов – Сочинское 1889 г. с $M = 4,9$ и Лазаревское 1959 г. с $M = 4,4$. Многочисленные 6–7-балльные толчки известны в районе Минеральных вод с 1771 г.; до 1985 г. их было здесь более 10. В 1978 г. здесь имело место землетрясение с силой 7–8 баллов, $M = 4,5$.

В районе Анапы-Новороссийска землетрясения с силой 6–7 баллов ($M \sim 5$) отмечены с 1830 г. и повторялись в 1834 и 1905 гг. В 1966 и 1969 гг. здесь проявились толчки с силой 7 баллов ($M > 5$), в том числе глубокое Анапское землетрясение в 1966 г. с силой 6–7 баллов ($M = 5,5$). К району Нижней Кубани относятся два землетрясения 7-балльное 1879 г. с $M = 5,7$, ощущавшееся на большой территории, и известное по летописям землетрясение 1799 г., при котором имели место сотрясения по всей Кубанской области при одновременном появлении со взрывом нового острова в Азовском море против Темрюка. Сотрясения на поверхности при этом землетрясении квалифицированы в [4] как 5–6(± 1)-балльные, однако по описанному эффекту их, видимо, можно отнести к 7-балльным толчкам.

Землетрясения с силой 7 баллов отмечены в районе Туапсе в 1936 г. ($M = 4,3$) – Туапсинский рой и близ Нальчика в 1956 г. ($M = 4,0$); более слабые – 6–7-балльные толчки имели место в этих районах в 1935–1936 гг. и в 1960 г. соответственно с $M = 3,4$ и 4,4. В верховьях Кубани землетрясения с силой 6–7 баллов имели место в 1896 г. с $M = 4,7$ и в 1926 г. с $M = 5,4$. Последнее землетрясение названо Кубанским, предполагается, что очаг его был заглублен на 50 км, оно ощущалось на гораздо большей территории, чем другие землетрясения Северного Кавказа подобной магнитуды. Следует отметить, что в 1984 г. в эпицентральной зоне Кубанского землетрясения проявились ощутимые толчки с силой 5 баллов [5].

На рис. 2 приведена схема эпицентров землетрясений Северного Кавказа за последние 300 лет. Положение подавляющего большинства из них определено по данным инструментальных наблюдений, реальные возможности использования которых сложились здесь лишь к началу 30-х годов нашего столетия. К настоящему времени для этой цели в пределах собственно Северного Кавказа используются записи шести стационарных сейсмических станций ОМЭ ИФЗ и четырех станций Дагестанского филиала АН СССР, а также более 20 станций Института геофизики АН СССР, расположенных южнее (см. рис. 2). Как видно, распределение по изучаемой территории землетрясений, более слабых по сравнению с показанными на рис. 1, тоже неоднородно. Сопоставление рис. 1 и 2 свидетельствует о приуроченности эпицентров слабых толчков в основном к выделенным зонам проявления сильных землетрясений, перечисленных при рассмотрении рис. 1. На обеих схемах имеют место обширные площади, на которых эпицентры землетрясений отсутствуют. Объяснение полученного распределения эпицентров только несовершенной системой сейсмических наблюдений, по-видимому, недостаточно, так как землетрясения доинструментального периода зафиксированы и схема энергетической представительности землетрясений (рис. 3), рассчитанная на основе реальной чувствительности сейсмических станций, функционирующих здесь в основном с 1975 г. Согласно этой схеме, на территории Северного Кавказа вплоть до 46° с.ш. в период 1975–1985 гг. регистрируются без пропуска все землетрясения энергетического класса $K \geq 9,5$, т.е. с магнитудами $M \geq 3$. Однако несмотря на то что большая часть землетрясений рис. 2 относится к указанному периоду наблюдений, их эпицентры в основном тяготеют к выделенным зонам проявления сильных землетрясений, будучи с ними, видимо, генетически связанными.

Еще одним подтверждением неслучайности пространственного распределения землетрясений в виде скоплений или зон, разделенных пустыми или почти пустыми площадями, служит рис. 4, на котором представлена схема эпицентров землетрясений Кавминводского полигона ОМЭ ИФЗ. Здесь сведены результаты детальных наблюдений, проведенных полевыми станциями АСС–6/12 в течение 4,5 лет. Основные зоны эпи-

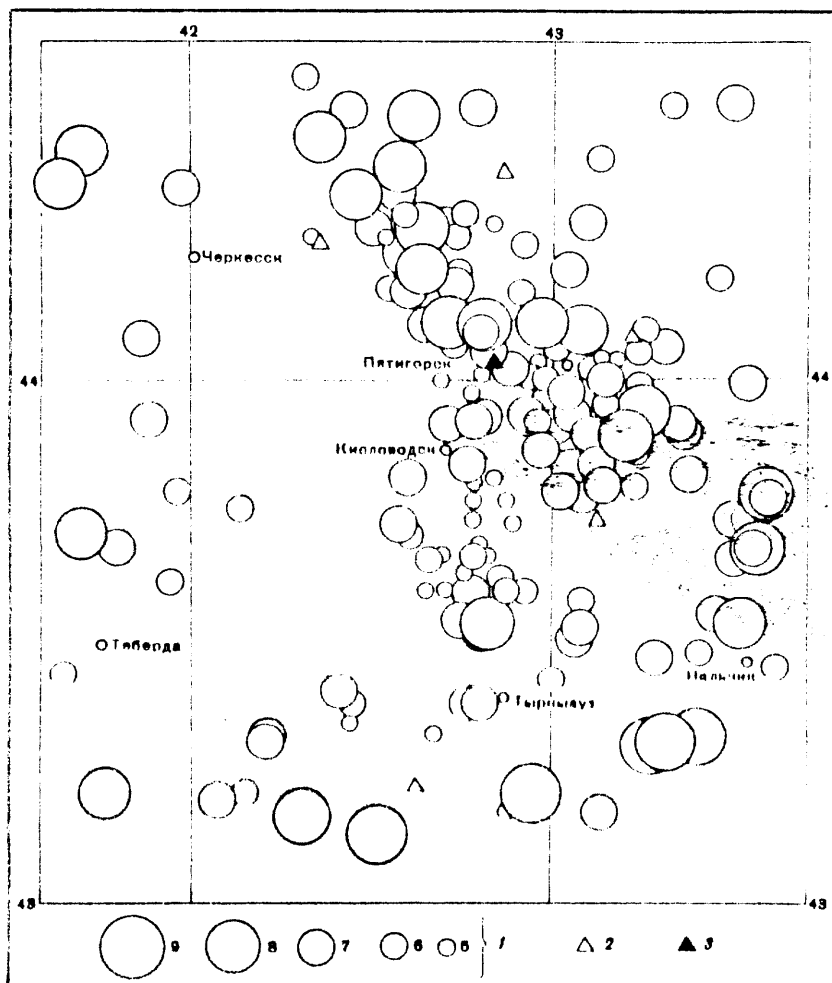


Рис. 4. Схема эпицентров землетрясений Кавминводского полигона за 1983–1987 гг.
1 – класс энергии K ; 2, 3 – сейсмические станции: 2 – полевые, 3 – стационарные

центров землетрясений с $K \geq 5$ располагаются северо-восточнее г. Кисловодска и юго-западнее г. Нальчика. Конфигурация поля эпицентров здесь близка к отмеченной на том же полигоне для землетрясений с $M \geq 4$ ($K \geq 11$) за последние 30 лет (см. рис. 2).

Таким образом, рассмотрение распределений эпицентров по площади с учетом разных периодов наблюдений, интервалов магнитуд и энергетической представительности землетрясений позволяет предположить, что проявления сейсмичности приурочены к определенным зонам. Что касается глубины возникновения сейсмических толчков, то, как показано на рис. 2, она для подавляющего их числа находится в пределах первых 20 км земной коры. Более глубокие землетрясения отмечаются в районе Анапы, Минеральных Вод, Грозного и Каспийского моря.

Повторяемость землетрясений в зависимости от энергии и скоростные разрезы. Для оценки повторяемости землетрясений по энергетическим классам имеется статистически представительный материал лишь для двух зон возникновения землетрясений, выделенных в предыдущем разделе, – зоны Грозного и Кавказских Минеральных Вод. На рис. 5 показаны графики повторяемости землетрясений в этих зонах, построенные в основном по наблюдениям за период 1975–1984 гг. с $K \geq 9$. Дополнительно для зоны

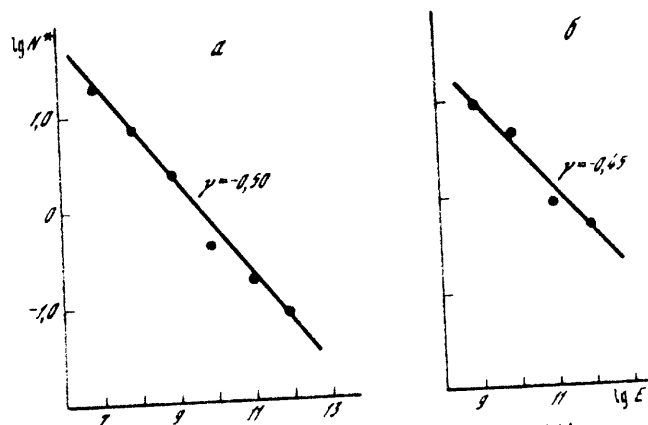


Рис. 5. Графики повторяемости землетрясений за 1975–1984 гг.
а – Кавминводский полигон; б – район Грозного; γ – наклон графиков

Кавминвод привлечены данные с $K = 7,8$ за 1983–1987 гг. (см. рис. 4). Как видно по наклону графиков, периоды повторяемости землетрясений одних и тех же энергий здесь различны – если для Кавминводского полигона землетрясения с $M = 4$ повторяются один раз в 6 лет, то для зоны Грозного – почти ежегодно. Рассматриваемые зоны различаются также максимальной магнитудой проявившихся здесь за последние 300 лет землетрясений: $M_{\max} = 5$ в пределах полигона и 6–6,4 в зоне Грозного.

При локализации землетрясений восточной части Северного Кавказа с помощью программы ПУР-71 выяснилось, что использование одного и того же скоростного разреза для обеих зон приводит к дополнительным погрешностям. Применение различных моделей строения земной коры, полученных по данным ГЗС в [6, 7] с примерно одинаковой глубиной поверхности Мохоровичича (43–44 км) и приведенных в таблице, дало возможность уменьшить ошибки определения гипоцентров. Невязки близких (до 50 км) станций уменьшились в два с лишним раза (по P -волне от 1 до 0,5 с, по S -волне от 1,5–2 до 0,4–0,6 с). Таким образом, зоны землетрясений Кавказских Минеральных Вод и Грозного различаются параметрами сейсмического режима и скоростными разрезами. Это позволяет предположить, что они относятся к разным блокам земной коры [8].

Повторяемость землетрясений во времени. Рассмотрение повторяемости землетрясений во времени было предпринято с целью ограничения площади отдельного выделенного блока. Для этого привлечен материал сейсмических наблюдений зоны Грозного, который здесь статистически представлен для $M \geq 3$ начиная с 1932 г., когда

Модели строения земной коры			Зона Грозного		
Зона Кавминвод					
Номер слоя	Глубина до подошвы слоя H , км	V_p , км/с	Номер слоя	Глубина до подошвы слоя H , км	V_p , км/с
1	0–1	3,2	1	0–5,5	3,2
2	15	5,9	2	13	5,3
3	24	6,0	3	22	6,0
4	29	6,4	4	32	6,5
5	44	7,0	5	43	7,0
6		8,1	6		8,1

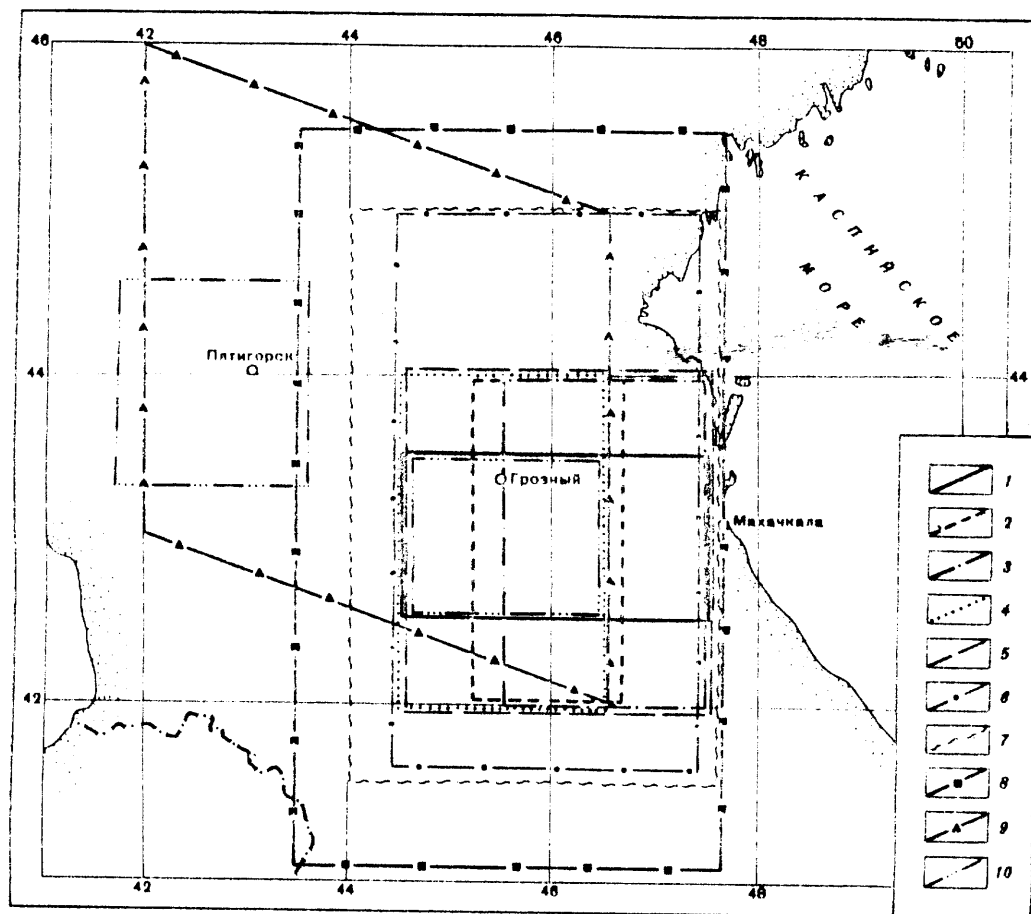


Рис. 6. Выделение зон для ограничения однородного блока земной коры
1-10 — границы соответствующих зон

была открыта сейсмическая станция "Грозный" и рассматриваемая зона землетрясений оказалась внутри замкнутого четырехугольника станций — Тбилиси, Пятигорск, Боржоми и Грозный. При варьировании площади зоны с изменением ее формы и размеров, как это показано на рис. 6, были сделаны выборки землетрясений из машинного каталога Северного Кавказа ОМЭ ИФЗ. По этим данным для всех девяти зон рис. 6 строились графики повторения землетрясений определенных магнитуд со временем. Огибающие этих графиков имеют разную форму — крутую в короткие периоды возрастания магнитуд и более пологую в более продолжительные периоды убывания магнитуд. В процессе построений к уверенным инструментальным данным были добавлены и менее уверенные с 1910–1912 гг. и макросейсмические — с 1830–1840 гг., так как характерные черты огибающих за эти периоды времени аналогичны отмеченным за 1932–1985 гг. Примеры графиков показаны на рис. 7 для зон 1, 2, 5, 6 рис. 6. На каждом из приведенных графиков отмечаются периоды затишья, роста и спадания магнитуд, а также так называемые пиковые события (8, 9), соответствующие максимальным M .

На рис. 8 представлены графики зависимости периодичности пиковых событий от величины M (по горизонтали отложены интервалы времени между событиями заданной магнитуды M) для каждой из девяти зон рис. 6.

Коэффициент корреляции $r = 0,85–0,96$ для зон 1, 2, 5, 6; для остальных зон $r =$

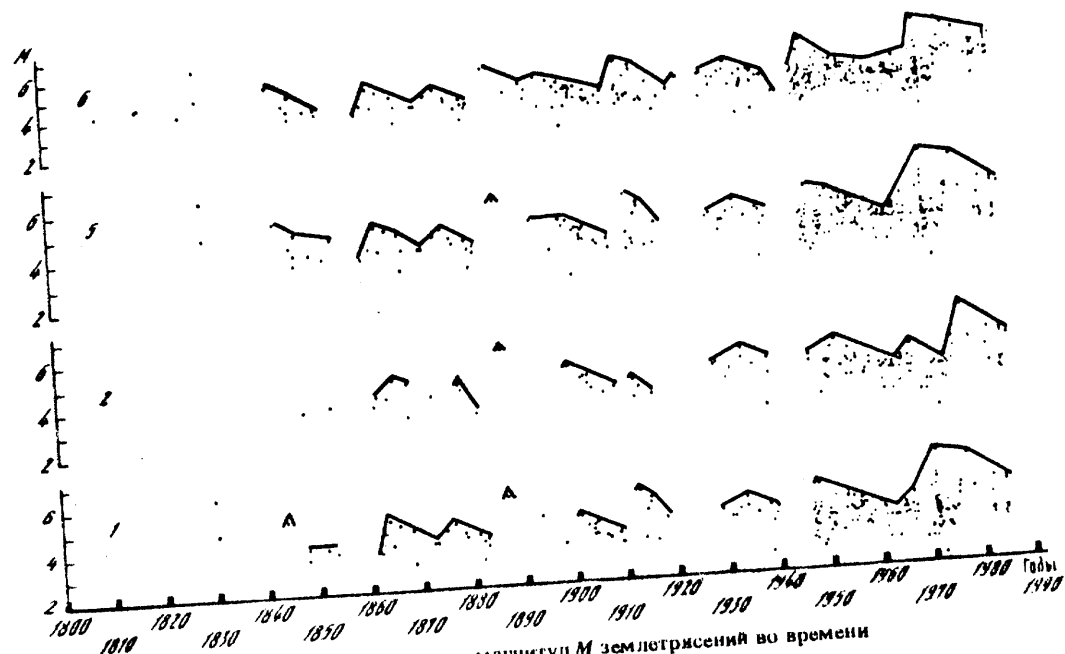


Рис. 7. Распределение магнитуд M землетрясений во времени
1, 2, 5, 6 — номера зон (см. рис. 6)

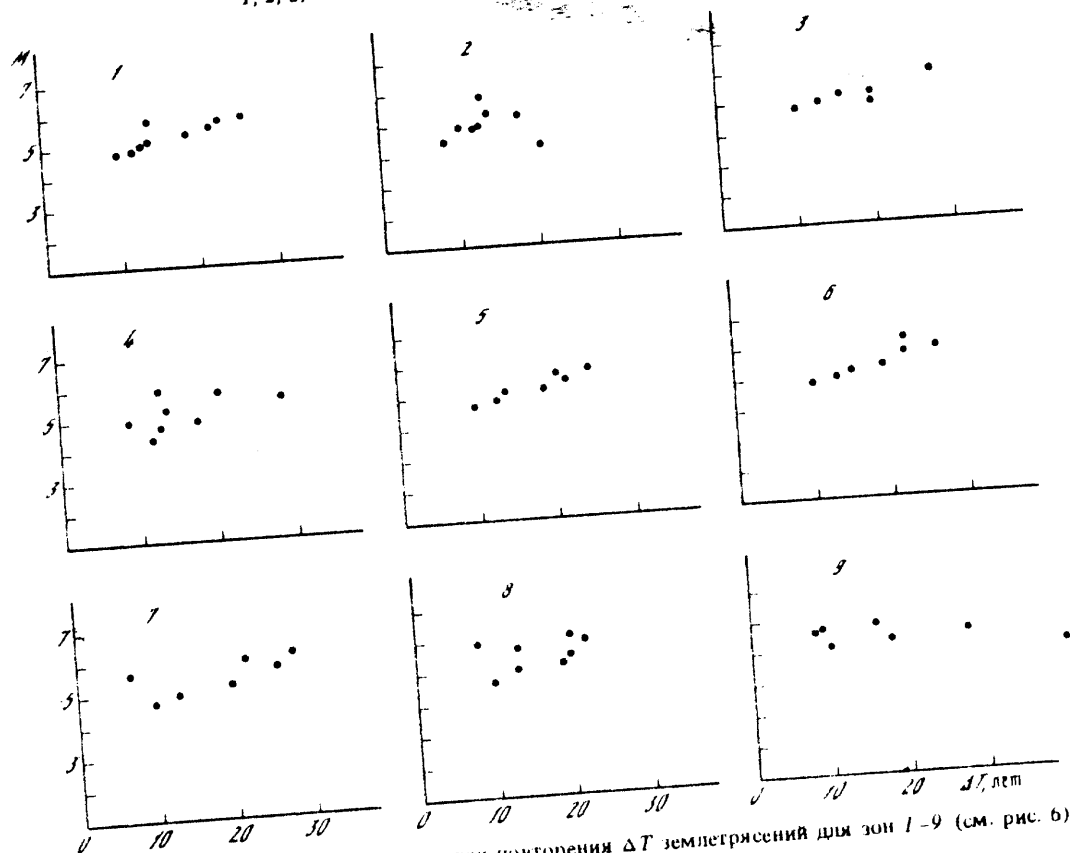


Рис. 8. Регрессия магнитуд M — интервал повторения ΔT землетрясений для зон 1–9 (см. рис. 6)

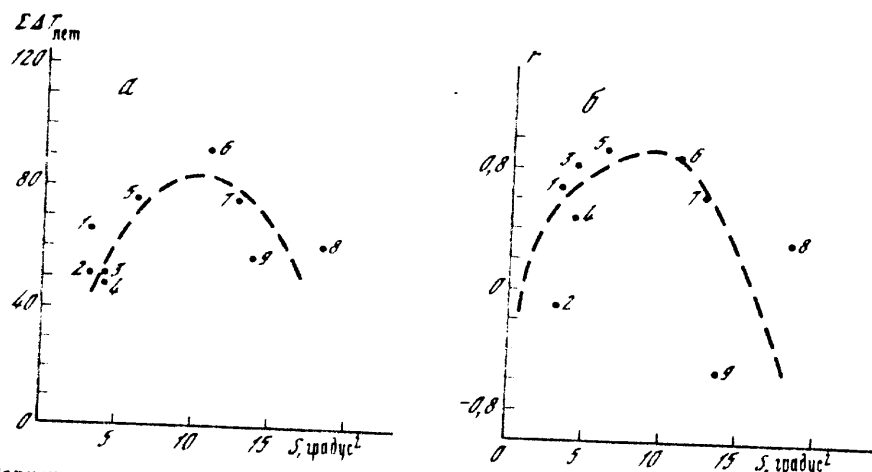


Рис. 9. Зависимость суммарного интервала повторяемости пиковых событий (а) и коэффициента корреляции r рис. 8 (б) от площади S зон 1-9 рис. 6

$\approx 0,09 - 0,66$. Самое высокое значение $r = 0,96$ получено для зон 5, 6, объединяющих эпицентральный район Грозного и Махачкалы с площадями $2 \times 3^\circ$ и $3 \times 3,5^\circ$.

На графиках зависимости коэффициента корреляции r от площади блока (рис. 9, б) видно, что максимальное значение r соответствует площади $3 \times 3^\circ$. При уменьшении и увеличении этой площади блока коэффициент r уменьшается, что, по-видимому, можно объяснить недостаточностью данных на малых площадях и "влиянием" соседних блоков на больших площадях. Для проверки этого вывода было подсчитано суммарное число $\Sigma \Delta T_i$ интервалов времени (в годах), которым соответствовало спадание магнитуды на рис. 7. Построена зависимость $\Sigma \Delta T_i$ от площади каждого из девяти блоков рис. 6 (см. рис. 9, а). Выяснилось, что наилучшую характеристику 92 года из 155 исследованных (1830-1985 гг.) имеет площадь 10,5 кв. градусов. Эту площадь, видимо, и стоит в данном случае принять за оптимальную площадь сейсмогенного блока.

Отметим, что данные рис. 6-9 позволяют еще раз подтвердить, что зоны Кавказских Минеральных Вод и Грозного генетически различны. Для блока 9 (на рис. 6 зона 9), площадь которого объединяет эти зоны, коэффициент корреляции имеет наименьшую величину среди всех девяти зон.

Рассмотренный материал каталога для Северного Кавказа позволил сделать следующие выводы.

1. Пространственное распределение как сильных, так и слабых землетрясений является неоднородным; их очаги образуют эпицентральные зоны, разделенные "пустыми" площадями.
2. На примере двух выделенных эпицентральных зон с достаточной статистикой сейсмических наблюдений (Кавминводы и Грозный) показано, что они различаются не только интенсивностью, но и повторяемостью их землетрясений по энергии, уровнем максимальной магнитуды и скоростными разрезами. Это дало основание считать эти зоны приуроченными к разным блокам земной коры.
3. Выбор оптимального размера такого блока, сейсмогенетически однородного, проведен на материале эпицентральной зоны района Грозного с помощью графиков повторяемости землетрясений во времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Захарова А.И., Иванова Т.П., Мишаткин В.Н., Старовойт О.Е. Программа развития сейсмических наблюдений на Северном Кавказе. Обнинск: ОМЭ ИФЗ АН СССР, 1987. 41 с.
2. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР. М.: Наука, 1977. 536 с.
3. Землетрясения в СССР в 1962-1984 гг.: Ежегодник. М.: Наука, 1964-1987.
4. Региональный каталог землетрясений Северного Кавказа за 1982-1985 гг.: Приложение к Сейсмологическому бюллетеню. Обнинск: ОМЭ ИФЗ АН СССР, 1983-1985.
5. Краснопольцева Г.В. Глубинное строение Кавказского сейсмоактивного региона. М.: Наука, 1984. 215 с.
6. Красный Л.И. Глобальная делимость литосферы в свете глобальной концепции // Сов. геология. 1984. № 7. С. 17-31.
7. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. О свойствах дискретности горных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1982. № 12. С. 3-18.
8. Садовский М.А., Нерсесов И.Л., Писаренко В.Ф. Иерархическая дискретная структура литосферы и сейсмический процесс // Современная тектоническая активность Земли и сейсмичность. М.: Наука, 1987. С. 182-191.

УДК 550.348

В.М. ГЕРЦИК

КОНСТРУКТИВНАЯ СТАТИСТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА ТРЕЩИН

Вводные замечания. В работах [1, 2] был развит подход к проблеме деформирования твердого тела с трещинами, позволяющий рассматривать случайный ансамбль трещин как гиббсовский ансамбль равновесной статистической механики. Чтобы получить возможность использовать равновесные распределения, мы были вынуждены пренебречь тем фактом, что цикл "возникновение трещины - заживление трещины" приводит к необратимым изменениям в теле, в частности к возникновению остаточных деформаций. Этот подход, названный нами "равновесным приближением", оказывается поэтому пригодным лишь для описания тех свойств твердого тела, которые не связаны с необратимостью (например, изотермических модулей упругости).

В настоящей работе предлагается конструктивный метод построения неравновесной статистической механики трещин, свободной от указанного недостатка. В его основе лежат три группы физических постулатов.

Первая группа, которую можно назвать "принципом молекулярного равновесия", состоит в следующем. Предполагается, что все неравновесные процессы в системе связаны с актами появления и заживления трещин, причем время, занимаемое этими процессами, мало по сравнению со временами, протекающими между актами, и им можно пренебречь. Иначе говоря, появление и заживление трещин являются мгновенными актами, а в остальные моменты времени имеет место термодинамическое равновесие тела с фиксированной конфигурацией трещин. Поэтому в любой момент популяции этой конфигурации состояние тела при заданных внешних нагрузках и температуре описывается термодинамическим потенциалом Гиббса $H(\eta)$, зависящим от конфигурации трещин η .

Вторая группа постулатов постулаты о кинетике. Предполагается, что текущая конфигурация трещин представляет собой скачкообразный марковский случайный процесс, в котором каждый скачок может быть связан лишь с появлением или исчезновением только одной трещины, а вероятности скачков за малое время dt задаются кинетикой Глаубера-Добрушина, т.е. вероятность $p(t, t+dt, \eta, \eta')$ того, что система, содержащая в момент t конфигурацию трещин η , перейдет за время dt в состояние η' , равна

$$p(t, t+dt, \eta, \eta') = q \exp \left\{ - \frac{H(\eta') - H(\eta)}{2\theta} \right\} dt,$$

где q — скорость кинетики; θ — параметр, равный, если система находится недалеко