

Н. В. Шабалин, В. Н. Крестников, Д. Н. Рустанович, В. В. Штейнберг,
И. В. Аманян, О. А. Асманов, Ю. В. Быстрицкая, Н. В. Вадьяшева,
Ф. Т. Кулиев, Р. А. Левкович, К. Г. Плетнев, Е. И. Широкова

Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г.

Dahestan

Дагестанское землетрясение 14.V, являющееся вторым по энергии с начала XX в. и сильнейшим инструментально зарегистрированным землетрясением Кавказа, произошло в эпицентральной области сильного землетрясения 9.III 1880 г., в предгорной части Большого Кавказа и южной периферии Терско-Сулакской низменности [1, 2, 3]. 14.V 1970 г. в 09 ч. 20 м. в пункте с координатами $42^{\circ} 99' N$ и $47^{\circ} 12' E$ произошло 7-балльное землетрясение с $M=5,7$. В 18 ч. 12 м. в пункте с координатами $43^{\circ} 00' N$ и $47^{\circ} 09' E$ последовал основной толчок с $M=6,6$, интенсивность которого в эпицентре достигала 8 баллов. Основной толчок 14.V сопровождался большим количеством афтершоков, сильнейшие из которых имели магнитуду 5,5. Площадь наибольших повреждений достигала 1000 км^2 . Землетрясение охватило на север — до Волгограда, на восток — до п-ова Мангышлак, на запад — до Майкопа, на юг — до Ленинанава.

В изучении Дагестанского землетрясения приняли участие сотрудники Института физики Земли АН СССР, Дагестанского филиала АН СССР, сейсмической станции Махачкала, а также Института геофизики АН Грузинской ССР, Института геологии им. И. М. Губкина АН Азербайджанской ССР, Дагестанского государственного университета, Института геофизики и инженерной сейсмологии АН Армянской ССР, Института земной коры СО АН СССР и др.

Геологические, макросейсмические и инструментальные сейсмологические исследования в эпицентральной зоне наряду с определением механизма и динамических параметров очага по данным сети ЕССН и зарубежных станций позволили сделать заключение об условиях возникновения и структуре очага. Дагестанского землетрясения 14.V 1970 г. В эпицентральной зоне были получены записи более 300 повторных толчков интенсивностью от 3 до 7 баллов, которые послужат ценным материалом для расчета сооружений на сейсмостойкость. Настоящая статья является сжатым изложением результатов, подробно описанных в отчетах и частично опубликованных [4—10].

Краткий обзор геологического строения¹ района землетрясения

На рассматриваемой территории Дагестана развит мощный комплекс мезокайнозойских отложений, характеризующихся большим разнообразием фаций, мощностей и условий залегания [3, 4, 11—14].

Мезозойские отложения занимают небольшие площади в бассейне р. Сулак и включают в себя юрские и нижнемеловые образования, а также верхнемеловую известняковую толщу. К кайнозойским образованиям

¹ Геологические исследования в эпицентральной зоне проводились сотрудниками Института физики Земли АН СССР В. Н. Крестниковым, Н. В. Чагаревым и Ф. С. Шивковым, а также сотрудниками Дагестанского филиала АН СССР Г. Г. Буныным и Р. А. Левковичем.

относятся карбонатные осадки нижнего и среднего палеогена, глины и мергели верхнего палеогена — нижнего миоцена, мергели, глины и песчаники среднего миоцена и верхнего миоцена, прибрежно-морские осадки плиоцена и четвертичные образования различного генезиса. Общая мощность осадочной мезокайнозойской толщи оценивается в 6500—7000 м.

Рассматриваемая площадь охватывает небольшую часть Терско-Каспийского передового прогиба и мегантиклинория Большого Кавказа в пределах Дагестанского клина, который в конце миоцена разделит восточную часть Северо-Кавказского геосинклинального прогиба на Терско-Сунженскую и Южно-Дагестанскую. Предположительно выделяемые меридиональные выступы Сулакский и Эльдамский и расположенный между ними Калчагайский прогиб осложняют Дагестанский клин. К этим выступам приурочены области максимального подъема Дагестанского клина.

Территория складчатого сооружения Большого Кавказа, в свою очередь, может быть подразделена на своеобразные в тектоническом отношении области известнякового Дагестана и полосы третичной складчатости. Область известнякового Дагестана занимает очень небольшую площадь в пределах долины р. Сулак и его левых притоков. Здесь распространены преимущественно верхнемеловые отложения. Юрские и нижнемеловые породы обнажаются в ядрах размытых антиклиналей. Породы третичного возраста приурочены лишь к осевым частям крупных синклиналей. Весь комплекс мезозойских пород смят в более или менее параллельные коробчатые складки. Крупные разрывные нарушения крайне редки. Полоса третичной складчатости окаймляет с севера область известнякового Дагестана и является фронтальным бордюром всей северной части мегантиклинория Большого Кавказа. Эта полоса представляет собой систему складок, располагающихся кулисообразно и осложненных большим количеством разрывов, вытянутых по их простиранию.

Этот комплекс разрывов, по-видимому, является поверхностным выражением единой зоны глубинного разлома, рассекающего всю земную кору и являющегося границей между мегантиклинорьем Большого Кавказа и Терско-Каспийским передовым прогибом. Зона глубинного разлома падает под крупным углом под складчатые сооружения Большого Кавказа.

Характер связи эпицентров со структурным планом свидетельствует о том, что основные подвижки, вероятно, были приурочены к зоне глубинного разлома. Однако западная группа афтершоков, расположенная в общем вдоль долины р. Сулак, возможно, связана с вовлечением в этот процесс Сулакского меридионального выступа Дагестанского клина.

Ограниченный объем статьи, к сожалению, не дает возможности более детально рассмотреть намечающиеся связи Дагестанского землетрясения со структурными особенностями района его возникновения.

Остаточные деформации земной поверхности

Среди зафиксированных остаточных деформаций можно выделить мелкие деформации и крупные (рис. 1).¹

Первые из них распространены наиболее широко. Они встречаются практически на всей описываемой территории и приурочены преимущественно к гривкам неогеновых песчаников и мергелей. Мелкие деформации представляют различного рода осыпи, срывы, обвалы и т. д. и проявляются в большинстве случаев на «подготовленных» преимущественно

¹ Геологическая основа рис. 1 взята с геологической карты восточной части северного склона Кавказа, составленной комплексной Северо-Кавказской нефтяной экспедицией в 1955 г. (за исключением зоны глубинного разлома).

Рис. 1. Картохема района Дагестанского землетрясения 14.VI. 1 — шлейфовые отложения; 2 — глиноватые, средне- и верхнеплищевые отложения; 3 — нижнеплищевые и оползневые отложения; 4 — лоповые (палеопесчаные свиты); 5 — соленые и палеопесчаные отложения (фораминиферная свита); 6 — верхне-, средне- и нижнеплищевые отложения; 7 — зона неогеновых отложений; 8 — крупноглинистые разломы; 9 — срывы разломных разломы; 10 — древние коренные породы; 11 — обвалы коренных пород; 12 — мелкие обвалы; 13 — оползни; 14 — мелкие обвалы; 15 — энергия землетрясения; 16 — мощность определений эпицентра, км; 17 — касейты.

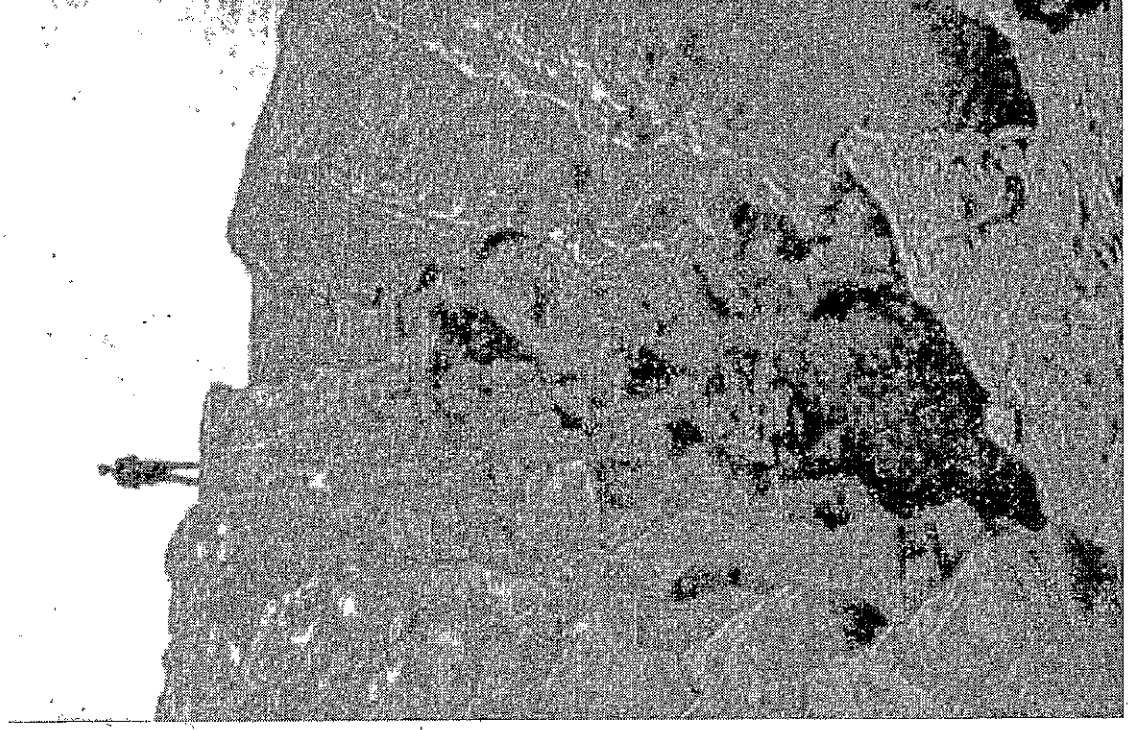
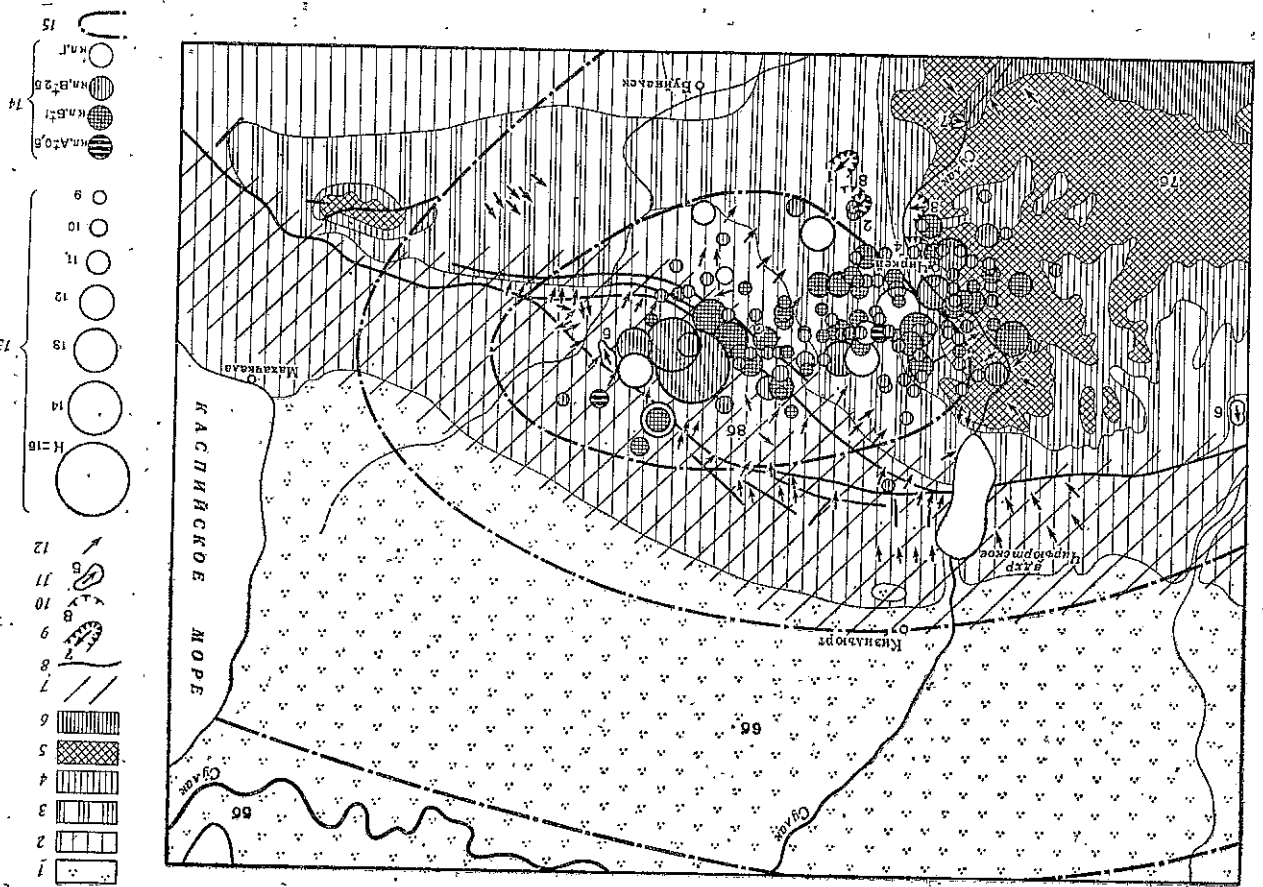


Рис. 2. Одна из крупных трещин осыва Ахагинского осыва (фото Н. В. Чугарева)

различными экзогенными процессами гравитационных склонах большой крутизны. Объемы перемещенных пород варьируют от нескольких кубических метров до первых десятков, а в редких случаях и до сотен кубических метров. Максимально эти формы развиты в районе сел. Кумторкала, в северо-западном направлении они постепенно уменьшаются. На рис. 1 стрелками показано как место срыва, так и направление перемещения пород.

Крупные деформации характеризуются большими массами сорванной породы. Они проявились преимущественно по юго-западной периферии обследованной территории и связаны в основном с долиной р. Сулак. Рассмотрим ряд крупных срывов.

Срыв по левому борту долины р. Чвахун-бак в 2 км к западу от сел. Ахаги имеет изометричную форму и произошел по дугообразно изог-

нугым в плане трещинам, проникшим на глубину 30—40 м в толщину мергелей и аргиллитов, относимых к майкопу (см. рис. 1, № 1, и рис. 2). Фронтальная часть срыва сильно перемята, она представляет собой нагромождение обломочного материала, сброшенного в русло р. Чвахунбак и образовавшего завал. Общий объем смещенной породы грубо оценивается в 10 млн м³.

Крупный срыв коренных пород произошел также на правобережье р. Сулак в районе высоты 413,5 м в 3—3,5 км к северо-западу от сел. Ахатлы (см. рис. 1, № 2). Отличительной чертой данной деформации является наличие не одного срыва, а нескольких, которые вниз по склону сливаются в одну массу перемещенных пород. Нарушение вытянуто в длину на 700—1000 м при ширине 300—350 м и по форме напоминает язык. Мощность сорванной лачки пластов составляет около 10—12 м, приблизительный объем сорванных масс — 3,5 млн м³.

Срыв произошел также на левобережье р. Сулак, напротив сел. Ачи, где оказались сорванными края одной или нескольких низких надпойменных террас, выработанных в коренных породах нижнего и среднего палеогена (см. рис. 1, № 3). Характер залегания пород в значительной мере определил направление их срыва. Моноклиально залегающие мергели и аргиллиты падали под углом 15° в сторону русла р. Сулак, что привело к большой амплитуде горизонтального перемещения огромной массы пород, вследствие чего русло оказалось перегороженным. Общий объем смещенной породы оценивается в первом приближении в 1,2 млн м³.

Наконец, срыв по левому борту долины р. Сулак в 2 км выше сел. Старый Чиркей охватил край низкой надпойменной террасы, выработанной в коренных породах на выступе меандры (см. рис. 1, № 4). В данном случае не последнюю роль сыграло подрезание руслом р. Сулак моноклиально залегающих отложений, что вызвало выход на этой высоте уровня грунтовых вод. Размеры срыва 500 × 300 м при толщине смещенного слоя в среднем около 10 м позволяют оценить общий объем смещенной породы в 1,5 млн м³ (рис. 3). Этот срыв вызвал также подпруживание р. Сулак.

Помимо срывов на земной поверхности, наблюдались два крупных оползня, один из которых расположен в 8 км к западу-северо-западу от сел. Кумторкала, в непосредственной близости от горы Исти-Су (см. рис. 1, № 5). Оползнем захвачены как коренные породы среднего миоцена, так и деловиально-пролювиальные отложения. Амплитуда оползания по трещине отрыва, имеющей глубину до 10 м, составляет примерно 40—15 м. Тело оползня представляет собой сильно смятую и разбитую многочисленными пересекающимися трещинами террасированную поверхность, веером расширяющуюся к нижней части. Общий объем оползней породы грубо оценивается в 0,5 млн м³.

Другой оползень находится в районе сел. Дылым на северном склоне высоты 904,9 (см. рис. 1, № 6). Здесь произошло оползание глинисто-песчаных отложений верхнего палеогена — нижнего миоцена в сторону р. Сала-Су. В верхней части оползня, имеющего в плане изометричную форму, образуется крутой уступ высотой до 8 м. В поперечном направлении длина тела оползня составляет 300—350 м, в продольном — около 500 м. В отличие от оползня в районе сел. Кумторкала данный оползень состоит из нескольких крупных частей, каждая из которых переместилась на 30—40 м вниз по склону. Другой важной особенностью этой деформации является то, что она располагается на месте древнего оползня. Общий объем переместившихся горных масс составляет не менее 1 млн м³.

К древним обвалам и срывам относится ряд относительно больших по объему (см. рис. 1, № 7—8), по сравнению с описанными выше крупными деформациями, смещенных верхнемеловых пород на правобережье р. Сулак. Единственно достоверно установленной палеосейсмодислокацией является обвал в сел. Старый Чиркей, который произошел в результате



Рис. 3. Общий вид срыва по левому борту долины р. Сулак в 2 км выше с. Старый Чиркей (фото В. В. Деркача)

7—8-балльного землетрясения 1830 г. и завалил значительную часть села. При землетрясении 14.V 1970 г. обвал не подвергся «омолаживанию» и в настоящее время представлен в виде оплывшей массы раздробленных и перемятых верхнемеловых и палеоген-эоценовых пород, протягивающихся по основанию на 1 км.

Макросейсмические данные (основной толчок)¹

Макросейсмическое исследование проводилось тремя методами. Использовался дифференциально-статистический метод И. В. Анашкина, при котором дифференцировано (т. е. на каждом участке населенного пункта с различными грунтовыми условиями) рассматривался процент поврежденных зданий каждого типа по всем степеням повреждений. При вычислении среднего балла для более точного определения процентного состава различных типов зданий и повреждений на различных грунтах часто привлекались официальные данные. Другой способ — Н. В. Шейбина — заключался в использовании статистического метода, основного на определении распределения зданий каждого типа по всем степеням повреждений [5]. Кроме того, применялся традиционный метод оценки характера наиболее распространенных повреждений типичных зданий.

Как показала проверка на скрепленных маршрутах, все три метода давали удовлетворительное совпадение оценок интенсивности.

Общая протяженность маршрутов, включая 3—4-балльные зоны, составила около 5000 км. Плотность обследования маршрутов на 1000 км² составила для 7—8-балльных зон — 240 км, 6-балльной зоны — 80 км и 5-балльной — 30 км.

Параметры макросейсмического поля Дагестанского землетрясения приведены в табл. 1. Сводная карта изосейст (рис. 4) построена по материалам всех участников обследования.

Таблица 1

Основные параметры макросейсмического поля Дагестанского землетрясения 14.V (основной толчок)

Балл	Средние параметры			Коэффициент затухания балльности в %	По азимутам					
	Размеры изосейст		Si, тыс. км ²		120—270°		270—300°		300—360°	
	r _{max} , км	r, км			°	°	°	°	°	°
8	25	8	14	—	12	—	18	—	10	
7	35	30	29	—	35	4,2	36	(5,6)	22	
6	95	65	78	2,3	85	3,0	90	2,9	45	
5	190	125	155	3,3	140	4,5	180	3,3	85	
4	340	320	330	3,4	240	4,4	400	2,8	390	
3	540	400	470	6,7	340	(6,6)	680	4,4	750	
Среднее				3,8	—	4,5	—	3,3	—	
Глубина очага, км				45		26		22	10—15	

Помимо неравномерности затухания, макросейсмическое поле характеризуется двумя заметными аномалиями. На южном склоне Главного Кавказского хребта от Казбеги до Душети отмечается локальное усиле-

¹ Макросейсмические исследования проводили Н. В. Шейбина, И. В. Анашкин, Ф. Т. Кулиев, Р. Г. Агамирзоев, Ю. В. Быхрицкий, И. Л. Ревелд, В. Г. Папалапши, И. В. Айвазовский, Р. А. Левкович, З. А. Мусалаева, Н. А. Новицкая, О. А. Санаев, Г. Л. Голинский, А. В. Добрыченко.

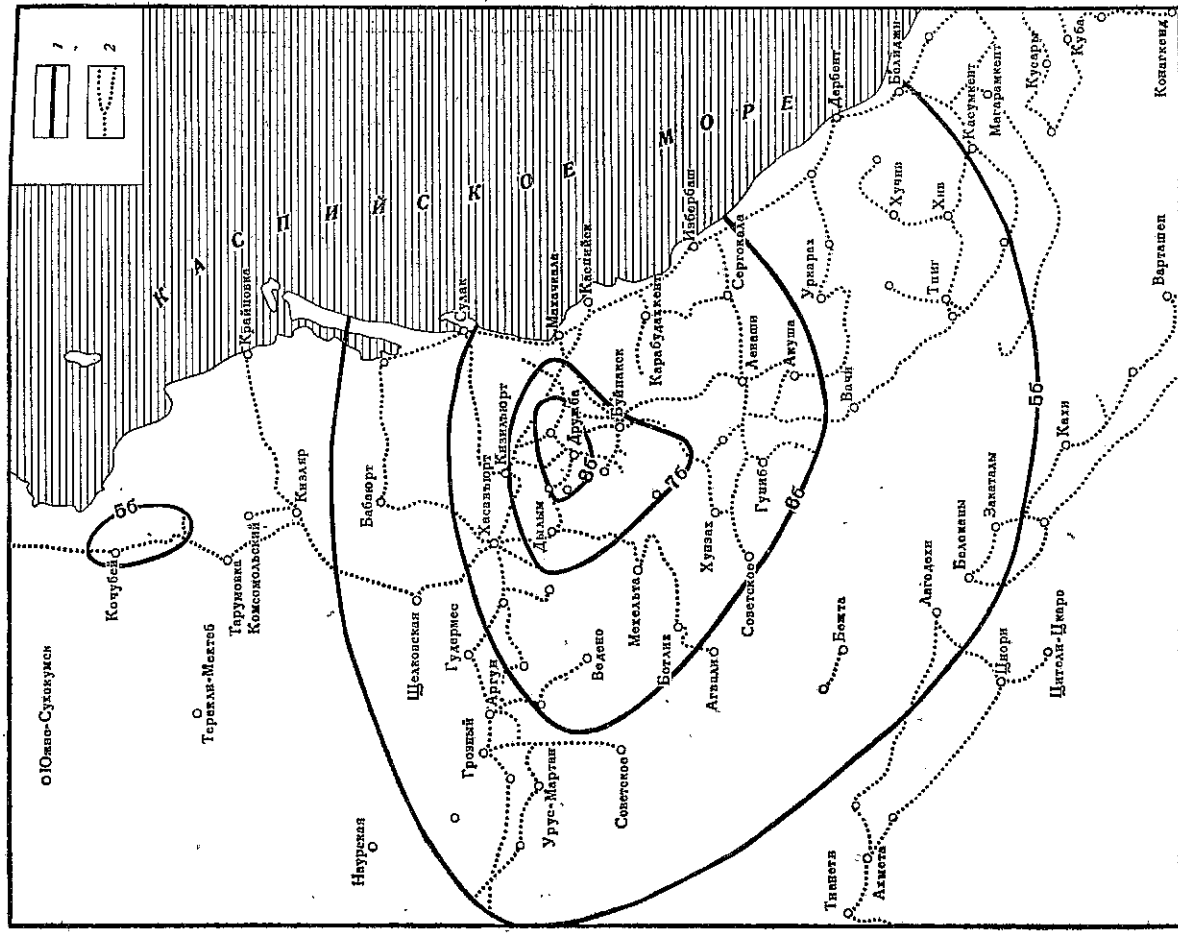


Рис. 4. Карта изосейст землетрясения 14.V
1 — изосейсты; 2 — маршруты обследования

ние интенсивности до 6 баллов. Это явление не связано с эффектом грунтовых условий и требует объяснения. Вторая аномалия связана с пространственной неравномерностью интенсивности в пределах эпицентральной зоны [15]. Наибольшей силой сотрясения наблюдались на краях эпицентральной зоны — на западе (район Ачи — Новый Чиркей — Зубуль) и на востоке (Кумторкала). На этих участках произошли наиболее тяжелые разрушения населенных пунктов, а на западе, кроме того, возникли наибольшие нарушения земной поверхности. Учитывая все обстоятельства, можно полагать, что вблизи краев 8-балльной зоны интенсивность несколько превышала 8 баллов.

На рис. 5 показаны характерные повреждения.



Рис. 5. Разрушение одноэтажного дома из местных материалов в пос. Новый Чиркей

Сложный характер основного толчка нашел свое проявление в макросейсмическом поле землетрясения. Сильный предварительный толчок захватил северо-восточную часть эпицентральной зоны, его максимальная интенсивность достигала 7 баллов. Эпицентральной зона основного толчка в 18 ч. 12 м. 24 с. была значительно больше. Колебания от основного толчка к востоку опущались более плавно и продолжительно, на западе более резко. Макросейсмические данные по основному толчку не позволяют, разумеется, разделить его на два этапа (слабый и сильный), разделенные интервалом в 6 сек.), выявленные (предположительно) по инструментальным данным. Однако для более длительных интервалов времени макросейсмическое разделение стало возможным: примерно через 1 мин. после основного толчка (судя по данным спектрально-временной обработки, через 50 сек.) в западной части макросейсмической области ощущался сильный повторный толчок с максимальной интенсивностью не менее 7 баллов. В восточной части зоны он, видимо, воспринимался как продолжение колебаний от основного толчка и наблюдателями не выделен.

Заключительной фазой основных событий в очаге Дагестанского землетрясения был второй сильнейший афтершок в 18 ч. 15 м. 01 с. В отдельных участках востока эпицентральной зоны, например в Кумторкале, он ощущался сильнее основного (в Кумторкале — до $8\frac{1}{2}$ баллов).

Таким образом, различные участки эпицентральной зоны подвергались воздействию различного характера, длившимся в целом около 3 мин. На западе зоны за это время прошло два резких, короткопериодных толчка, первый из них был наиболее сильным. Ощущалось также множество резких толчков меньшей силы. В центре в течение этого срока происходили почти непрерывные колебания промежуточного типа (не очень короткопериодные, но и не плавные). На востоке после очень сильного, но достаточно плавного колебания последовал не менее сильный короткопериодный удар. Отвечающий этим, а также инструментальным данным схема очага будет рассмотрена ниже.

Инструментальные данные о сильнейших толчках

Координаты очагов и магнитуда¹

Эпицентры двух основных толчков 14.V, определенные сетью опорных станций, оказались смещенными примерно на 25 км к северу от зоны максимальных разрушений. Аналогичные смещения эпицентров Северного Кавказа отмечались и ранее. Это явление можно объяснить особенностями строения переходной зоны. Поэтому при определении эпицентров вводились поправки с учетом результатов экспедиционных станций. Были обработаны четыре толчка с $M=4,0$. Эпицентры определены способом Вадати. Для этих толчков были определены расстояния от эпицентров до опорных станций и подсчитаны невязки — отклонения отдельных наблюдаемых значений времен пробега от рассчитанных в соответствии с географом Джеффриса—Буллена: $\Delta t = t_{\text{набл}} - t_{\text{ДжБ}}$. Точность определения очага экспедиционными станциями (для пяти станций в пределах эпицентральной зоны) составляла ± 1 км по координатам и ± 2 км по глубине. Переопределенные очаги совпали с вычисленными по местным станциям с ошибкой от 2 до 4 км по координатам и от 0 до 2 км по глубине.

Переопределенные, с учетом найденных поправок, эпицентры некоторых сильнейших толчков Дагестанского землетрясения приведены в табл. 2.

Сравним характер вступления волны P для двух сильных толчков 14.V. На записи форшока (09 ч. 20 м.) выделяется четкое первое вступление (рис. 6). Максимум P -волн для СКМ (12 станций) находится в пределах 2 сек. от вступления P , и $m_{PV}=5,8$. Для СК (14 станций) максимум приходится примерно на 5 сек. от начала записи и $m_{PV}=6,1$. Магнитуда $M_{LV}=5,7$.

Coordinates Daghestan. earthq.

Таблица 2

Координаты очагов и магнитуда основных толчков Дагестанского землетрясения (по данным ЕССН)

Дата	Время в очаге, ч. м. с.	Координаты очага		Гриб. бор.	H, км	Магнитуда (в скобках число станций)		K
		°N	°E			m_{PV}	M_{LV}	
14.V	09 20 22,0	42,99	47,42	18	СКМ	5,8 ± 0,26 (12)	5,7 ± 0,2 (15)	
	18 12 24,0	43,00	47,09			СК		
15.V	18 47 02,4	43,00	46,95	17	СК	6,2 ± 0,1 (12)	6,6 ± 0,25 (18)	
	21 15 48,0	43,06	47,14			СК		
16.V	06 19 14,5	43,02	47,15	18	СКМ	4,6 ± 0,23 (11)	4,0 ± 0,25 (7)	
	21 26 52,0	43,02	46,96			СК		
17.V	05 02 16,0	42,93	46,99	20	СКМ	4,3 ± 0,25 (9)	5,2 ± 0,18 (18)	
	06 49 04,0	42,98	46,92			СК		
18.V	05 36 42,0	42,92	47,09	10	СК	4,1 ± 0,17 (7)	11,5	
	12 32 59,3	42,98	47,03			СК		
9.VI	06 25 57,6	43,01	47,02	7	СК	3,5 ± 0,4 (4)	4,0 (4)	
	17.VI	00 34 43,4	43,01			СК		
27.VI	00 46 04,5	43,00	47,04	13	СК	4,0 (4)	12	

¹ Исследования выполнены Н. В. Вандышевской-под руководством Н. А. Евдокимовой.

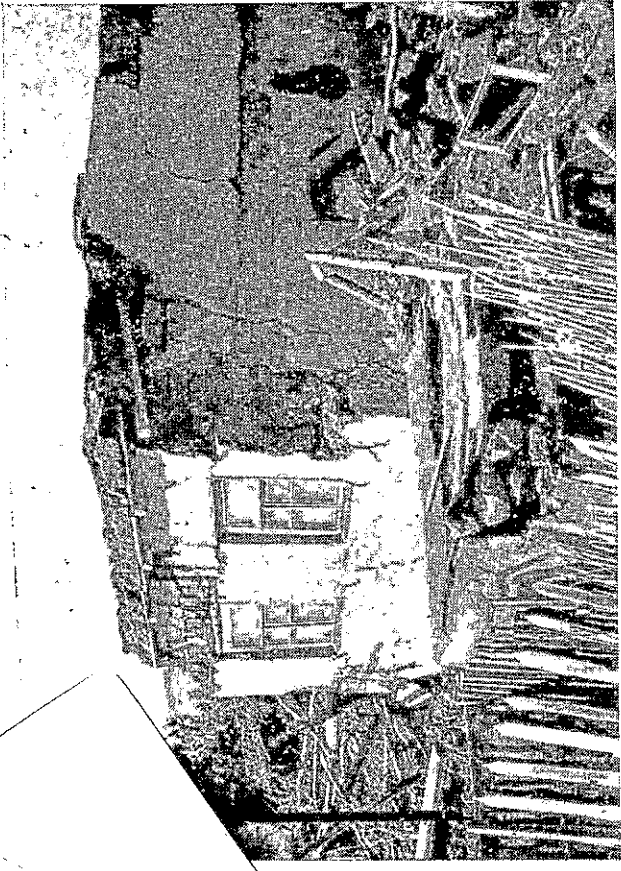


Рис. 5. Разрушение одноэтажного дома из местных материалов в пос. Новый Чиркей

Сложный характер основного толчка нашел свое проявление в макросейсмическом поле землетрясения. Сильный предварительный толчок захватил северо-восточную часть эпицентральной зоны, его максимальная интенсивность достигала 7 баллов. Эпицентральная зона основного толчка в 18 ч. 12 м. 24 с. была значительно больше. Колебания от основного толчка к востоку ощущались более плавно и продолжительно, на западе более резко. Макросейсмические данные по основному толчку не позволяют, разумеется, разделить его на два этапа (слабый и сильный, разделенные интервалом в 6 сек.), выявленные (предположительно) по инструментальным данным. Однако для более длительных интервалов времени макросейсмическое разделение стало возможным: примерно через 4 мин. после основного толчка (судя по данным спектрально-временной обработки, через 50 сек.) в западной части макросейсмической области ощущался сильный повторный толчок с максимальной интенсивностью не менее 7 баллов. В восточной части зоны он, видимо, воспринимался как продолжение колебаний от основного толчка и наблюдателями не выделен.

Заключительной фазой основных событий в очаге Дагестанского землетрясения был второй сильнейший афтершок в 18 ч. 15 м. 01 с. В отдельных участках востока эпицентральной зоны, например в Кумторкале, он ощущался сильнее основного (в Кумторкале — до $8\frac{1}{2}$ баллов).

Таким образом, различные участки эпицентральной зоны подвергались воздействию различного характера, длившихся в целом около 3 мин. На западе зоны за это время прошло два резких, короткоперiodных толчка, первый из них был наиболее сильным. Ощущалось также множество резких толчков меньшей силы. В центре в течение этого срока происходили почти непрерывные колебания промежуточного типа (не очень короткоперiodные, но и не плавные). На востоке после очень сильного, но достаточно плавного колебания последовал не менее сильный короткоперiodный удар. Отвечающая этим, а также инструментальным данным схема очага будет рассмотрена ниже.

Фаза P -волн основного толчка имеет нарастающий характер. Магнитуда m_{PV} по первым вступлениям на аппаратуре СК равна 5,5 (12 стандартный). $M_{LN}=6,6$. В соответствии с формулой

$$m_{PV}=0,63M_{LN}+2,51 \quad (1)$$

m_{PV} должна быть равна 6,6, что близко к полученным значениям $m_{PV}=6,5$, определенным при измерении $(A/T)_{\max}$ в пределах первых 8 сек. записи.

Механизм очагов

Был определен механизм трех наиболее сильных толчков: 14.V в 09 ч. 20 м. и 18 ч. 12 м. и 17.V в 6 ч. 49 м. При обработке использовались сейсмограммы ряда станций Советского Союза и телеграфные сообщения избранных станций WWSSS [16, 17]. Результаты определений представлены в табл. 3.

Как известно, наиболее сильным был толчок в 18 ч. 12 м. На сейсмограммах этого землетрясения примерно через 6 сек. после начала записи зарегистрировано более сильное вступление P -волн, что, по-видимому, является записью второго, более сильного толчка. Результаты определений для него также приведены в табл. 3.

Рассмотрение полученных результатов и сопоставление их с геологическими и сейсмологическими данными позволяет считать, что при всех рассмотренных землетрясениях разрывы происходили по плоскостям примерно широтного простирания (вектор падения меридионального направления — графа 5, с крутыми углами падения — графа 6). Такое направление совпадает с простиранием зоны глубинных разломов, расположенной в области перехода мегантиклинория Большого Кавказа к Терско-Сунженскому передовому прогибу. Развитие разрывов шло в западном направлении. От толчка к толчку простирание разрывов несколько изменилось относительно широтного направления (см. графу 5 — вектор падения перпендикулярен направлению простирания).

На рис. 7 схематически показано взаимное расположение разрывов при землетрясениях 14.V в 18 ч. 12 м. и при землетрясении 17.V, а также предполагаемая зона нарушений. Точки с правой стороны разрывов соответствуют эпицентру или началу процесса. Движение по разрывам имело двоякий характер (см. табл. 3, графу 7) при землетрясениях 14.V в 09 ч. 20 м., 14.V в 18 ч. 12 м. и 17.V, причем южное крыло двигалось в восточном направлении. При более сильном толчке (через 6 сек. после землетрясения в 18 ч. 12 м.) преобладающим, вероятно, было движение типа сброса, при этом опустилось северное крыло.

Все три землетрясения (если не рассматривать развитие процесса, т. е. исключить толчок, последовавший через 6 сек. после начала вступления при землетрясении в 18 ч. 12 м.) возникли примерно в одних и тех же условиях напряженного состояния. А именно: напряжения сжатия и растяжения действовали примерно горизонтально (см. табл. 3, графы 14 и 18), причем первое было направлено вкрест простирания Главного Кавказского хребта, а второе — параллельно хребту.

Динамические параметры основного толчка

Сейсмический момент Мо основного толчка 14.V был определен двумя способами: по длиннопериодным волнам Рэлея ($T \approx 90$ сек.) и Лява ($T \approx 40$ сек.) с использованием методов Д. Брюна [18], А. Бен-Менахема и Д. Харкрайдера [19]. В качестве исходных данных были использованы сейсмограммы станции Эделемиор (Шотландия, аппаратура Пресс Юинг)¹.

Для выделения фаз волн Рэлея и Лява записи были профильтрованы системой октавных фильтров в диапазоне 12,5—400 сек. Сейсмический момент оказался равным $1,2 \cdot 10^{25}$ дин·см (по волнам Лява).

¹ Сейсмограммы любезно предоставлены нам проф. Сирлуэем.

Результаты определений механизма очага

Дата, время в очаге	Координаты очага		M	Плоскость разрыва I		Плоскость разрыва II		Напряжение сжатия	Промежуточное напряжение	Напряжение растяжения
	φ°N	λ°E		Вектор падения	Движение верхнего крыла	Вектор падения	Движение верхнего крыла			
18 ч. 12 м. 14.V	43,0	47,09	6,6	76	-0,97*	-0,94**	265	76	+0,97	-0,24
14.V	18 ч. 12 м. +6 сек.	18	18	80	0	-1	Большие ошибки	218	20	38
14.V	18 ч. 20 м.	42,99	47,12	5,7	160	-0,90	66	64	+0,98	+0,19
17.V	06 ч. 49 м.	42,98	46,92	5,2	154	-0,88	249	62	+0,98	-0,17
06 ч. 49 м.	42,98	46,92	5,2	81	-0,88	-0,88	249	62	+0,98	-0,17

* Знак минус означает, что верхнее крыло вышло вперед; минус — это верхнее крыло вышло назад.
 ** Знак минус означает, что верхнее крыло вышло вперед; минус — правосторонний сдвиг.

Рис. 7. Схема пространственного расположения разрывов землетрясения 14.V в 09 ч. 20 м., 18 ч. 12 м. и 17.V в 06 ч. 49 м. Плунитром обозначен разрыв, лежащий ниже плоскости эпицентров землетрясения 14.V в 18 ч. 12 м. и 17.V в 06 ч. 49 м.
 1 — плоскости разрыва; 2 — направление движения верхнего крыла; 3 — эпицентры; 4 — область нарушения в плане на глубине 12—15 км.

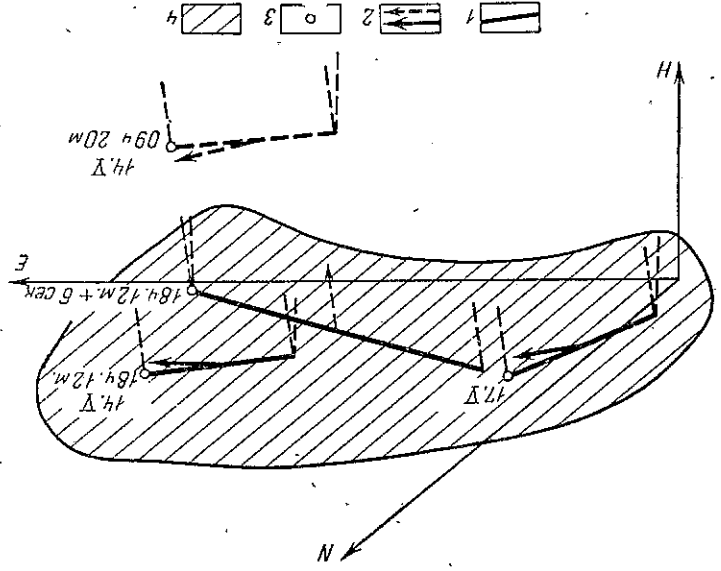
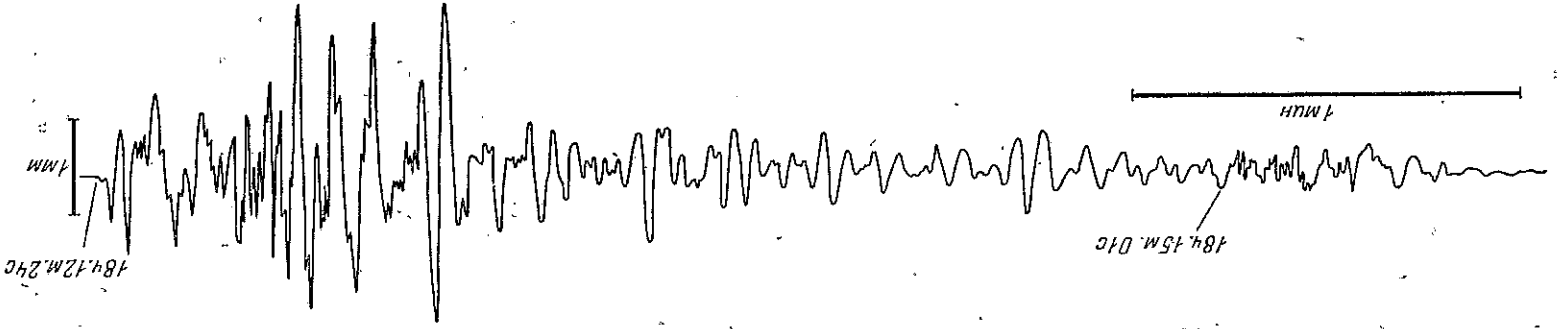


Рис. 8. Сейсмограмма землетрясения 14.V в 18 ч. 12 м. 24 г. Сейсмограф СМРЛ. Сейсмическая станция Латорехи. Компонента С-Ю



Скорость вспарывания v , определенная через соотношение спектров волн Лява главного толчка и афтершока 17. V, имеющих близкий механизм очагов, оказалась равной $1,2 \text{ км/сек}$ [20].

Средняя величина подвижки \bar{u} по плоскости разрыва площадью $S = Lh$ (L — длина разрыва, h — его ширина), определенная через соотношение [21]

$$\bar{u} = \frac{M_0}{\mu \cdot S}, \quad (2)$$

равна $0,3 \text{ м}$, а величина сброшенного напряжения $\Delta\sigma$, рассчитанная в предположении погруженного источника с преобладающей горизонтальной подвижкой

$$\Delta\sigma = \frac{4}{\pi} \frac{M_0}{S^{3/2}} \sqrt{\frac{L}{h}}, \quad (3)$$

равна 10 бар ($1,0 \cdot 10^7 \text{ дин/см}^2$).

Размеры плоскости разрыва $L=30 \text{ км}$ и $h \approx 14 \text{ км}$ определены на основании макросейсмических данных и пространственного размещения афтершоков.

Найденные величины M_0 и $\Delta\sigma$ хорошо согласуются с мировыми данными для неглубоких землетрясений с $M \approx 6,5-6,7$ [22]. Некоторое сомнение вызывает малая величина подвижки \bar{u} .

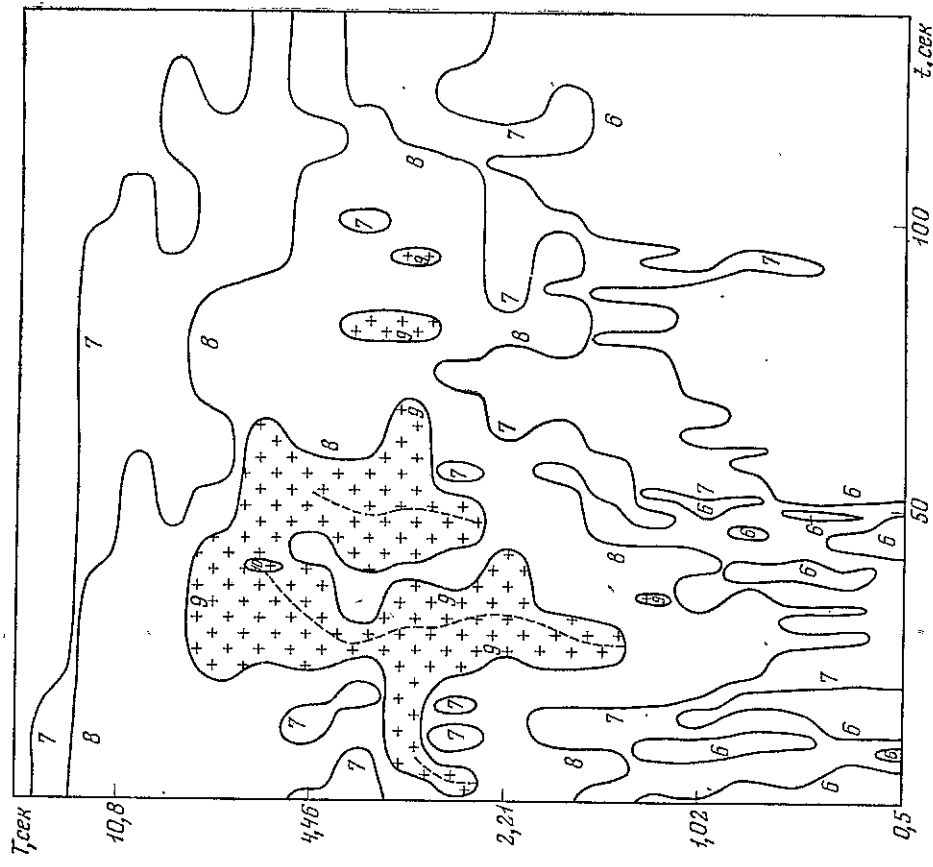


Рис. 9. Спектрально-временная диаграмма землетрясения 14.V в 18 ч. 12 м. 24 с. Сейсмограф СМРТ. Сейсмическая станция Лаодехи. Компонента С-Ю. Цифрами обозначена седловая линия, крестиками — участки максимальной интенсивности

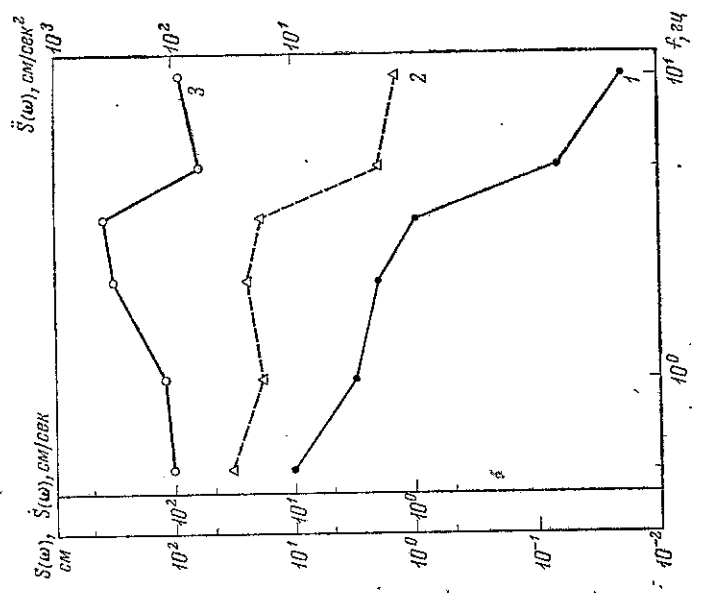


Рис. 10. Расчетные спектры смещений (1), скоростей (2) и ускорений (3) колебаний поверхности скального грунта при землетрясении 14.V в 18 ч. 12 м. ($M=6,6$) в точке, ближайшей к участку разрыва, находящемуся на глубине 5 км

Станция Лаодехи, расположенная в 140 км от эпицентра, была ближайшей станцией, записавшей основной толчок землетрясения 14.V. Колебания интенсивностью 5 баллов, зарегистрированные сейсмографом СМРТ (рис. 8), были проанализированы на ЭВМ.

Исправленный за частотную характеристику прибора спектр смещений основного толчка (18 ч. 12 м. 24 с.) открыт в сторону периодов больших 10 сек. Длиннопериодный характер спектра определены большими раз- мерами очага землетрясения. На рис. 9 приведена диаграмма СВАН участка записи основного толчка длительностью 140 сек. [23]. Через 2-3 сек. после начала процесса колебаний отметался сильный толчок. Увеличение интенсивности на 50-й сек. можно интерпретировать и как новый толчок (землетрясение), так как в короткопериодной области интенсивность возрастает, а начиная с 50 сек. — резко падает. Локальный максимум на 80-й сек. можно рассматривать как основную фазу второго толчка, наступившую через 25-30 сек. (так же как и при первом толчке) после начала землетрясения.

Из отнесения площадей максимальных фаз основного толчка S_1 и первого сильного афтершока S_2 мы можем грубо определить энергию второго толчка E_2 , так как максимальные фазы лежат примерно в той же частотной области ($T=3-4 \text{ сек.}$)

$$E_2 = E_1 \cdot \frac{S_2}{S_1}. \quad (4)$$

Полагая $E_1 = 10^{15} \text{ дж}$, мы получаем $E_2 = 5 \cdot 10^{13} \text{ дж}$. Был проделан приближенный расчет параметров колебаний скального грунта в ближней к очагу зоне при найденных параметрах очага и свойствах среды [24].

Спектр колебаний поверхности скального грунта $S_2(\omega)$ показан на рис. 10. Основное влияние на спектр соотрясений в точке оказывает участок разрыва, ближайший к точке, длина которого L соизмерима с расстоянием до точки наблюдения. При рассчитанных значениях кинематических величин колебаний должны наблюдаться большие остаточные деформации,

что и имело место в западной части эпицентральной зоны, где разрыван-
ными и сильно нарушенными оказались достаточно плотные песчанки
и аргиллиты. В некоторых участках эпицентральной зоны (района Гемир-
гое) очевидными отмечались видимые «земляные волны», что свидетельст-
вует о значительных амплитудах смещений на периодах порядка секунды
и выше.

И, наконец, отмечались случаи перевертывания камней, что могло
иметь место при ускорениях порядка g .

Инструментальные данные о повторных толчках¹

Толчки 14.V и следующие за ними в первые дни многочисленные аф-
тершоки регистрировались сейсмической станцией Махачкала [7]. С конца
мая по октябрь 1970 г. регистрация повторных толчков в эпицентральной
зоне производилась семью временных сейсмических станций Дагестанской
сейсмической экспедиции (ДСЭ). Размещение станций, карта эпицентров
и вертикальные разрезы приведены на рис. 11. В табл. 4 представлены дан-
ные о координатах и магнитудах (классах энергии) наиболее сильных по-
вторных толчков ($K \geq 12$).

Таблица 4

Список повторных толчков с $K \geq 12$

Дата	Время, ч. м. с.	Координаты		h, км	M _{LN}	K	I ₀ , балл
		φ°N	λ°E				
1970 г. 14.V	09 20 22°	43°00'	47°06'	18	5,7	13,5	6-7
	18 12 24	43 00	47 05	12	6,6	15	8
	18 15 01	43 00	47 10	4	5,5	13	8
	18 18 31,6	43 05	47 13			12	
	18 34 24,2	43 00	47 00		4,3	12	
	19 31 35,5	43 00	47 06		4,2	12	
	21 15 48	43 03	47 08	7	4,6	12	5-6
	40 43 24	43 00	47 06	12	4,4	12	4
	06 49 04	42 59	46 55	12	4,1	12,5	7
	10 25 48,5	43 01	46 58	5	5,2	12	6-7
31.V	20 58 36,3	43 00	47 09	9	12	12	5
	4.VI	43 00	47 04	10	12	12	6
	8.VI	43 00	47 04	10	12	12	6-7
	15.VI	06 22 12,6	43 00	46,49	12	12	6-7
47.VI	00 34 43,4	43 00	46 54	6	12	12	6-7
	27.VI	00 46 4,5	42 59	13	12	12	5-6
1971 г. 3.V	15 47 17,6	43 00	47 01			12	

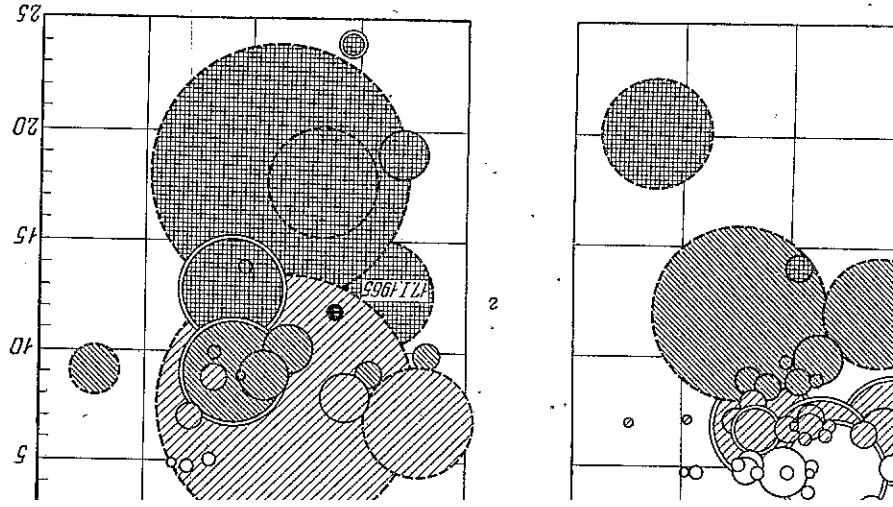
Область повторных толчков занимала в длину около 35 км, по глубине
от 2 до ~20 км (от 2 до ~7 км на крайнем западе зоны и от 6 до 20 км
в центральной части зоны).

На западе эпицентральной зоны очаги тяготеют к плоскости почти
широтного простирания, падающей к югу под углом около 60°, в восточ-
ной части очаговая область погружена глубже.

Крайний восток эпицентральной зоны, проявившийся сильным повтор-
ным толчком (18 ч. 15 м. 0.1 с.), почти не дал афтершоков с 25.V по 1.X
(время работы ДСЭ), хотя с 14 по 25.V и после 1.X здесь возникли до-
статочно сильные толчки.

¹ В инструментальных исследованиях приняли участие Д. Н. Русланович,
П. А. Плещнев, П. А. Алексин, В. В. Штейнберг, Л. А. Арефьева, О. А. Асманов,
З. А. Зояпина, П. И. Крамынин, Ж. Я. Агсакман, З. А. Мусалаева и З. А. Мур-
тузалиева.

Рис. 11. Очаговая зона Дагестанского землетрясения
 а — основные голцы с $N \geq 12$ за период с 14.V по 28.V (по дан-
 ным БСГД), с $K \geq 10$ за период с 28.V по 1.X (по данным ДСЗ);
 б — по линии I—D, в — по линии II—IV, г — по линии III—III'; 1 — веревка землетрясений;
 2 — глубина очага, км; 3 — точность определения эпицентра;
 4 — сейсмические станции; 5 — границы деформации земле-
 трясения



что и в
ными и
и аргил
гое) оче
вует о
и выше.
И, и
иметь м

И

Толче
тершоки
мая по
зоне пр
сейсмич
и верти
ные о к
вторных

Дата

1970 г.
14.V

16.V
17.V
31.V
4.VI
8.VI
15.VI
17.VI
27.VI
1971 г.
3.V

Обла
от 2 до
в центре
На 8
широтн
ной част
Край
ным тол
(время р
статочн

1. В наст
П. А. П
З. А. Зс
тузалиева.

44

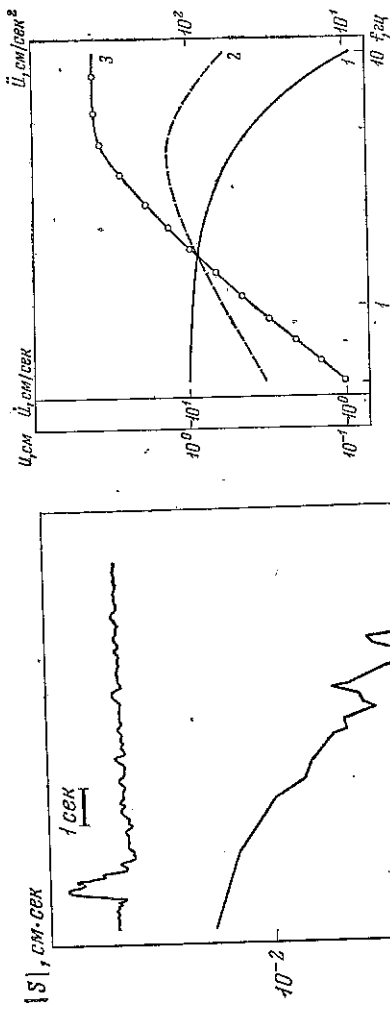


Рис. 12. Сейсмограмма и амплитудный спектр смещений плотных песчанков при землетрясении 17.VIII 1970 г. Станция Эки-Булак, $K=1.1$, $\Delta=9.5$, $H=10$ км, $I \approx 4$ балла

Рис. 13. Расчетные спектры смещений (1), скоростей (2) и ускорений (3) колебаний плотных осадочных пород (известняков-мергелей) в эпицентре землетрясения с $M=5$, $H=5$ км, $I_0 \approx 8$ баллов

За период с мая по октябрь 1970 г. сейсмическими станциями, работающими в явном режиме (осциллографы ИСО-2 с сейсмографами С5С), было зарегистрировано более 300 повторных толчков интенсивностью от 2 до 7 баллов. Параметры наиболее интенсивных толчков приводятся в табл. 5.

Таблица 5

Параметры интенсивных повторных толчков

Дата	К	Н, км	Δ , км	I , балл	А, мм	Т, сек.	А, ам/сек	Т, сек.	Станция
31.V	12	5	7,2	6-6,5	2,8	0,21	75,4	0,19	Клуб.
7.VI	44	2	5,7	5	0,7	0,17	29*	0,17	»
8.VI	12	10	14	5	0,22	0,18	7,5*	0,18	»
9.VI	44	10	3,5	6	2,3	0,8	48	0,8	Эки-Булак
15.VI	44	10	5,0	5	0,8	1,1	33,4	0,3	»
25.VI	42	7	8,1	6	4,7	0,2	52*	0,2	Клуб
27.VI	40,5	6	3,4	5	0,1	0,1	40*	0,1	»
1.VII	44	5	15,9	5	0,16	0,16	9,0	0,17	Эки-Булак
6.VIII	11,5	7	6,4	5	0,8	1,5	16,5	0,19	Клуб
	11,5	7	2,6	5	1,04	0,18	40	0,14	Котельная
	11,5	7	2,0	6	0,4	0,33	7,5*	0,33	Клуб
	11,5	7	2,0	6	2,0	0,2	63*	0,2	Котельная
	11,5	7	2,0	5	0,6	0,4	2,0	0,46	Клуб
	11,5	7	48,5	5	0,2	1,15	4,5	0,31	Эки-Булак

* Скорости, рассчитанные из величин смещений.

На поверхности скальных осадочных пород (станции Котельная, Эки-Булак) и рыхлых супесей и суглинков (станция Клуб) одновременно регистрировались смещения и скорости колебаний [9]. Анализ данных указывает на неоднородность связи между единичными максимальными величинами смещений и скоростей и балльности. Установлен большой вклад длительности процесса колебаний в сейсмический эффект [10].

45

первоначальное опускание южного крыла сменилось его поднятием. Положение верхней кромки очага ($h \approx 5-6$ км) определяется достаточно надежно как по афтершокам, так и по локальным особенностям макросейсмического поля. Положение нижней границы очага определяется менее уверенно.

Максимальная глубина афтершоков примерно 20 км. При использовании локальных макросейсмических коэффициентов [25]: ($b=4.41$; $\nu=3.6$; $s=2.1$), вычисленных Ю. В. Быстрицкой, $h_z=12$ км, $h_e=42$ км и глубина нижней кромки $=20$ км. Средние коэффициенты Н. В. Шебалина ($b=1.5$; $\nu=3.5$; $s=3.0$) дают $h_z \approx 36$ км, $h_e=45$ км и глубину нижней кромки ≈ 50 км. Первый вариант кажется более достоверным. Однако наличие сложной тектоники и серьезных нарушений в земной коре не позволяет категорически исключить вероятность распространения разрыва до глубин 50—55 км. Поэтому на рис. 14 для главной фазы событий указаны оба варианта (сплошная линия — первый вариант, пунктирная — второй). Площадь основного разрыва в первом варианте около 500 км², в глубинном — около 1500 км².

Ближайший по времени, западный афтершок, отмеченный по макросейсмическим данным и, предположительно, на СВАН-диаграмме (рис. 9), имеет $M \approx 5.25-5.5$, глубину очага (по M и J_0) около 10 км. Второй, восточный афтершок имеет параметры $M=5.5$, $h_{лм} \approx 6$ км, $I_0=8$ баллов.

Сопоставление спектров основного толчка и восточного афтершока указывает на совпадение их плоскостей разрыва; следовательно, этот афтершок вызван дальнейшим развитием вверх восточной части главного очага.

Сильнейшие афтершоки произошли также 14.V в 21 ч. 15 м. 48 с. ($M \approx 4.6$) и 17.V в 06 ч. 49 м. 04 с. ($M \approx 5.2$). Первый из них (см. табл. 2) является афтершоком форшока 14.V. Второй находится на западном окончании зоны.

Все стадии процесса изображены на рис. 14 в плане и на трех разрезах — продольном и двух поперечных. В табл. 6 приведены последовательность событий и числовые оценки параметров основных толчков Дагестанского землетрясения.

Заключение

Очаг землетрясения связан с зоной глубинного разлома, отделяющего мегантиклинорий Большого Кавказа от Терско-Сунженского передового прогиба. Землетрясение могло быть спровоцировано субмеридиональным поднятием Дагестанского клина, обуславливающего дальнейшую переработку общекавказского субширотного структурного плана.

Предложена пространственно-временная модель землетрясения 14.V 1970 г. Землетрясение имело сложный характер — основной толчок с $M=6.6$ предварился форшоком с $M=5.8$ и сопровождался двумя толчками, происшедшими в течение первых трех минут с $M=5.3$ и $M=5.5$. Совместные геологические, макросейсмические и инструментальные наблюдения позволили очертить очаговую область землетрясения: площадь эпицентральной зоны, ограниченная 8-балльной изосейстой, около 1000 км². Простирание разрыва основного толчка, имеющего длину $30-35$ км и ширину около $14-15$ км, близко к широтному. Плоскость разрыва падала к югу под углом, близким к 60° .

Преобладающая по величине горизонтальная компонента подвижки направлена к востоку. Направление распространения разрыва — с востока на запад. Сейсмический момент основного толчка $1.4 \cdot 10^{26}$ дин·см, сброшенное напряжение — 9 бар, скорость распространения разрыва около 1 км/сек и величина подвижки около 40 см. Верхний очаг располагался в $4-5$ км от поверхности, в западной части эпицентральной зоны, нижняя граница — на глубине около 20 км.

Максимальные поверхностные деформации типа срывов и разрушения зданий местной постройки размещены неравномерно в пределах эпицентральной зоны, они тяготеют к ее западной, южной и северо-восточной частям и уменьшаются в северо-западном и юго-восточном направлениях. Все сейсмодислокации землетрясения 14.V имели поверхностный характер и не связаны с разрывами. По всем крупным разрывным нарушениям визуально на дневной поверхности не зафиксированы какие-либо подвижки. В результате инструментальных инженерно-сейсмических наблюдений в эпицентральной зоне получены сейсмограммы и велосиграммы более 300 повторных толчков интенсивностью от 2 до 7 баллов, которые могут оказаться полезными для расчета сооружений на сейсмостойкость в условиях Дагестана.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Анянцян. Северный Кавказ. — В кн. «Сейсмическое районирование СССР». М., «Наука», 1968.
2. Землетрясение в СССР в 1965 г. М., «Наука», 1968.
3. Геологическое строение восточной части северного склона Кавказа. М., 1960.
4. Н. В. Чигалева, Ф. С. Шляков. По следам Махачкалинского землетрясения. — Природа, 1970, № 12.
5. Н. В. Шебалин, Ю. В. Быстрицкая, Р. А. Левокин, И. Л. Ревелис. Землетрясение 14 мая 1970 г. и его проявления на территории г. Махачкалы. — В сб. «Сейсмическое микрорайонирование г. Махачкалы». Махачкалы, Дагест. кн. изд-во, 1970.
6. В. В. Штейнберг, З. А. Зонина, К. Г. Пастельев, Л. А. Алексин. Параметры колебаний грунта при Дагестанских землетрясениях 1970 г. — Вопросы инж. сейсмологии, вып. 45. М., «Наука», 1973.
7. Л. А. Арефьева. Повторные толчки Дагестанского землетрясения по данным сейсмической станции «Махачкала». — Инф. бюлл. Кавказского цетр. центра ЕССН, 1972.
8. Б. В. Костров. Теория очагов тектонических землетрясений. — Изв. АН СССР, серия Физика Земли, 1970, № 4.
9. В. В. Штейнберг, Л. А. Алексин, З. А. Зонина. Колебания скального и рыхлого грунтов в эпицентральной зоне Дагестанского землетрясения 14 мая 1970 г. — Всп. инж. сейсмологии, вып. 45. М., «Наука», 1973.
10. Н. В. Шебалин, К. Г. Пастельев, А. А. Ремаля. К вопросу об инструментальных динамических эквивалентах балльности. — Бюлл. инж. сейсмологии, № 9. Ленинград, 1972.
11. В. Д. Голубятников. Тектоника Дагестана. — Геология СССР, т. IX, ч. 1. Северный Кавказ. М.—Л., Гостехиздат, 1947.
12. Д. В. Дробышев. Верхнемеловые отложения Дагестана. — Геология СССР, т. IX, ч. 2. Северный Кавказ. М.—Л., Гостехиздат, 1947.
13. М. В. Муратов. Тектоника и история развития Альпийской геосинклинальной области юга Европейской части СССР и сопредельных стран. — Тектоника СССР, т. II. М., Изд-во АН СССР, 1949.
14. В. Е. Халин. Геотектоническое развитие юго-восточного Кавказа. Баку, Азгизгиздат, 1950.
15. Н. В. Шебалин. Замечание о преобладающих периодах, спектре и очаге сильного землетрясения. — Вопросы инж. сейсмологии, вып. 14. М., «Наука», 1971.
16. А. В. Веденская. Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М., «Наука», 1969.
17. J. Brune. Seismic Moment, Seismicity and Rate of Slip along Major Fault Zone. — Journ. Geophys. Res., 1968, v. 73, № 2.
18. Е. И. Широкова. О напряжениях, действующих в очагах землетрясений Кавказа и примыкающих районов. — Изв. АН СССР, серия геофиз., 1962, № 10.
19. A. Ben-Menahem, D. Harkrider. Radiation Pattern of Seismic Surface Waves from Buried Dipolar Point Sources in a Flat Stratified Earth. — Journ. Geophys. Res., 1964, v. 69, N 12.
20. J. Filson, T. McEvilly. Love waves spectra and the mechanism of the 1966 Parkfield Sequence. — Bull. Seismol. Soc. Amer., 1967, v. 57, N 6.
21. K. Aki. Study of Earthquake Sources from the Seismic Spectrum Publ. Dominion Obs. Canada, 1969.
22. K. Aki. Earthquake Mechanism. XV Генеральная ассамблея МГТС, М., 1971.
23. Н. П. Грудеева. Спектрально-временной анализ сейсмических волн. — Геолет. и вычисл. геофизика, вып. 1. М., «Наука», 1972.
24. J. Brune. Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Shear Waves from Earthquakes. — Journ. Geophys. Res., 1970, v. 75, No 26.
25. Н. В. Шебалин. Балльность, магнитуда и глубина очага землетрясений. — В сб. «Землетрясения в СССР». М., Изд-во АН СССР, 1964.