

САЛЬСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 22 мая 2001 года с $MS=4.7$, $I_0=6-7$ (Северный Кавказ)

И.П. Габсатарова¹, Л.С. Чепкунас¹, Е.А. Бабкова¹, Р.Э. Татевосян², К.Г. Плетнев²

¹Геофизическая служба РАН, г. Обнинск, ira@gsras.ru

²Институт физики Земли РАН, г.Москва, ruben@mail.ifz.ru

Сальское землетрясение произошло 22 мая в 19^h13^m на юго-западе России, в 60 км восточнее г. Сальска Ростовской области с $K_p=12.5$, $I_0=6-7$ баллов. Землетрясение зарегистрировано многочисленными станциями, расположенными на Кавказе, Восточно-Европейской платформе, в других сейсмических зонах России и мира, удаленных от эпицентра на $\Delta=1.5-86^\circ$ [1-3]. Кроме основного толчка зарегистрирован один афтершок 23 мая в 20^h30^m с $K_p=7.8$.

Это землетрясение на сегодняшний день – сильнейшее из известных в слабосейсмичной северной части Северного Кавказа. На карте Общего сейсмического районирования ОСР-97-А [4] его эпицентр лежит в пятибалльной зоне (рис. 1), следовательно, в данном случае имеет место ошибка типа «пропуск цели», и карта должна быть в следующей редакции исправлена.

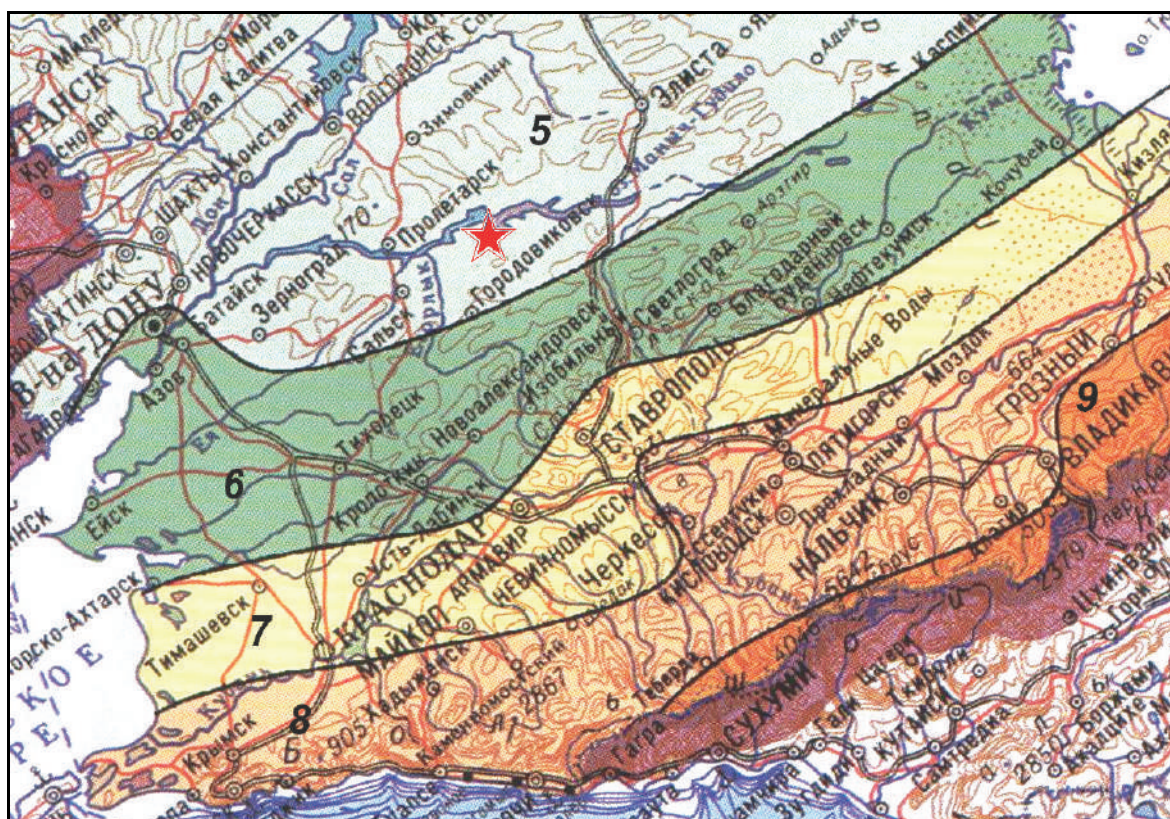


Рис. 1. Фрагмент карты «Сейсмическое районирование территории Российской Федерации»

Звездой показано положение эпицентра Сальского землетрясения 22 мая 2001 г.

Параметры Сальского землетрясения, по данным разных источников, представлены в табл. 1. Анализ основных параметров, по разным источникам [2-3, 5, 7-10], показал, что наблюдаются значительные расхождения в инструментальных определениях как координат эпицентра (до 40 км), так и глубины h (от 0 до 33 км). Это послужило причиной уточнения параметров, основные результаты которых были опубликованы в [10]. Также была отмечена неоднозначность, а порой и противоречивость полученных магнитудных оценок.

Таблица 1. Основные параметры Сальского землетрясения по данным ГС РАН и других агентств

Агентство	t_0 , ч мин с	δt_0 , с	Гипоцентр					Магнитуда	Окружение эпицентра			Ист.		
			φ° , N	$\delta\varphi^\circ$	λ° , E	$\delta\lambda^\circ$	h , км		δh , км	n ст.	Δ_{\min}		Δ_{\max}	gap
ГС РАН, ССД	19 13 15.9		46.65		42.49		2		$K=12.0\pm 0.3$, $MPSP=4.9$	24				[5]
ИФЗ, макросейсмический эпицентр			46.36		42.32		9							[6]
MOS	19 13 22.8		46.38		42.18		33		$MS=3.6/14$; $MPSP=4.6/19$	46	1.46	76.2		[2]
PDE	19 13 20.5		46.36		42.22		10f		$m_b=4.6$	85	2.43	86.4	65	[7]
IDC	19 13 20.3	0.5	46.28		42.08		0f		$M_s=3.6\pm 0.1$; $M_b=4.4\pm 0.1$; $M_L=4.2\pm 0.2$	25	2.36	76.08	62	[8]
ISC	19 13 23.8		46.37		42.16		33f		$M_s=3.4$; $m_b=4.5$	154	2.43	86.37		[3]
ИГ и Г НАНУ	19 13 24.1	0.6	46.40		42.00		33		$K=12,2$	10	370, км	680, км		[9]
ГС РАН, авторы статьи	19:13:22.6	0.3	46.337	0.03	42.191	0.02	12	3	$K=12.5$; $M_L=5.3$; $MS=4.7$; $M_W=4.8$	172	1.40	86.40	21	

Для уточнения эпицентра Сальского землетрясения использовались программа LocSat [10], позволяющая включать в локацию различные фазы, выделенные на региональных расстояниях (что особенно важно для получения глубины гипоцентра), и годограф IASPEI-91 [11]. Дополнительно к поступившим в ГС РАН, в г. Обнинск, результатам обработки записей в виде станционных бюллетеней и бюллетеней, полученных различными центрами, были собраны средствами Интернет доступные цифровые записи и поступившие в архив ГС РАН. Использовались наблюдения на 172 станциях в интервале эпицентральных расстояний $\Delta=1.4-86^\circ$. Ближайшими к эпицентру станциями были сейсмическая станция «Гофицкое» (GOF) с $\Delta=160$ км и пункты наблюдений «Кисловодск», «Гум-Баши», «Шиджатмаз», «Куба-Таба», «Нагутская» радиотелеметрической системы на Кавминводском геодинамическом полигоне с $\Delta=250-330$ км. Также были привлечены данные станций Крымской сети Института геофизики НАН Украины.

Для оценки глубины гипоцентра проведено дополнительное исследование по обнаружению глубинных фаз. В [12] показано, что на записях пяти станций с $\Delta=40-53^\circ$, четыре из которых расположены на территории Китая и одна в Центрально-Африканской Республике, были выделены глубинные фазы (табл. 2). По выделенным глубинным фазам pP и годографу IASP-91 среднее значение глубины составило $h=13$ км, по глубинным фазам $sP-h=15$ км среднее значение по всем глубинным фазам – $\bar{h}=14$ км. Инструментальное значение глубины очага составило $h=12$ км (табл. 1), и, следовательно, в результате уточнения значение глубины принято равным $h=12\pm 3$ км. Таким образом, очаг землетрясения располагается в нижней части верхнего слоя земной коры. По [13], мощность этого слоя составляет в этом районе 12 км.

Волновая картина исследована для Сальского землетрясения детально на различных расстояниях с выделением всех возможных сейсмических фаз, большая часть которых использовалась при получении гипоцентра землетрясения. Характерной особенностью записей Сальского землетрясения на региональных расстояниях $\Delta>300$ км является отсутствие вступлений, которые можно было бы интерпретировать как Pg волны в терминологии годографа IASPEI-91 [11]. Обычно на указанных расстояниях в районах с континентальным строением земной коры в группе объемных волн наблюдаются наиболее интенсивные запредельные отражения PmP от границы Мохоровичича [14], амплитуды которых в 1.5–5 раз превышают амплитуды других фаз в группе P -волн. На расстояниях $\Delta>200$ км волна PmP сливается с волной Pg и поэтому, в соответствии с принятой терминологией годографа IASPEI, называется Pg [15].

Невозможность выделения волны Pg на записи может рассматриваться, по-видимому, как косвенный признак известного факта раздробленности подошвы земной коры (границы Мохоровичича) в южных областях Восточно-Европейской платформы (БЕП) [16]. Это могло

сказаться на формировании группы Pg (PmP) волн, отчетливо выделяемых при регистрации событий, произошедших в других зонах платформенных областей. В качестве примера даны записи станцией «Обнинск» двух землетрясений: Сальского (22 мая 2001 г.) и Калининградского (21 сентября 2004 г.) (рис. 2). В обоих случаях эпицентральное расстояние – $\Delta=9.5^\circ$. Как видно, на записи Калининградского землетрясения фаза Pg (PmP) отчетливо видна на вертикальной компоненте, а на записи Сальского землетрясения выделяется менее отчетливо.

Таблица 2. Сведения о глубинных фазах, выделенных на записях Сальского землетрясения 22 мая 2001 г.

Код станции	Название	Δ°	AZM°	Глубинные фазы	Разница прихода фаз $P-pP/sP$ c	h , км (IASP91)
XAN	Xi'an	51.019	79	pP	4.0	13
XAN				sP	6.7	15
LSA	Tibet	41.300	96	pP	4.2	13
LSA				sP	6.2	14
HIA	Hailar	50.008	57	pP	4.1	13
HIA				sP	6.6	15
ENH	Enshi	53.628	82	pP	3.8	12
ENH				sP	6.9	15
BGSA	Bogon	45.881	214	pP	4.6	15
Среднее по pP						13
Среднее						14

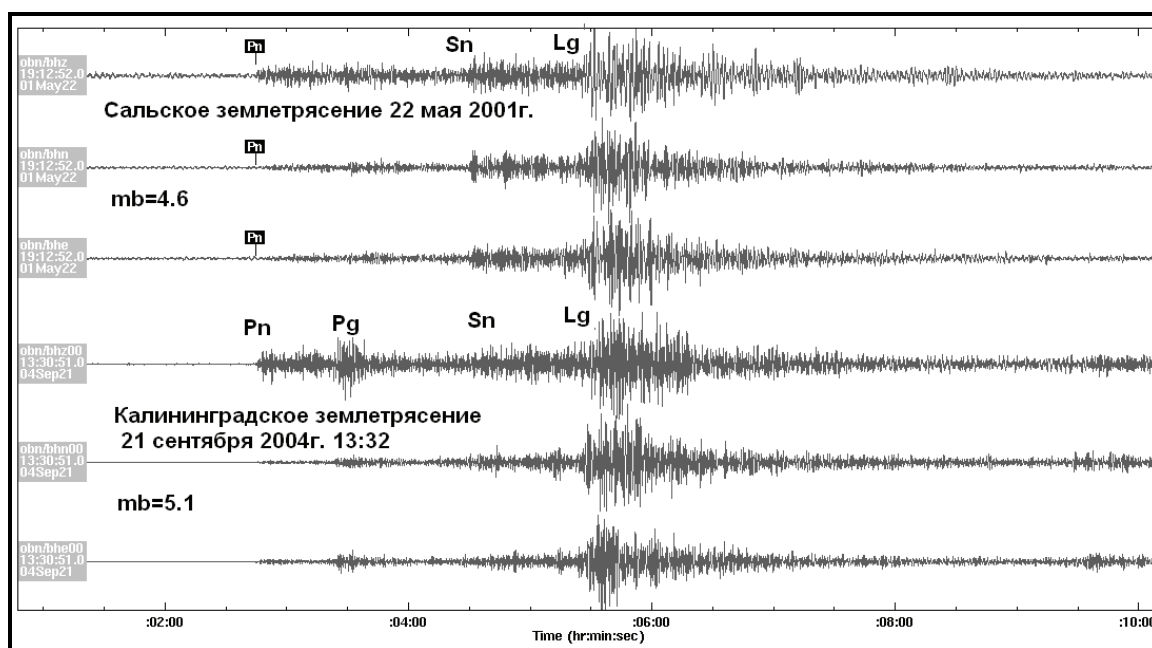


Рис. 2. Трехкомпонентные записи на станции «Обнинск» платформенных землетрясений 22 мая 2001 г. и 21 сентября 2004 г.

Записи выравнены по первому вступлению.

Аналогичная волновая картина и на записи станции «Михнево» с $\Delta=9.0^\circ$ (рис. 3). Если взять за основу полученное в наст. ст. при сводной обработке время возникновения землетрясения $19^h13^m22.6^s$, то на станции «Михнево» волна Pn зарегистрирована через 2 мин 10 с, Sn – через 97.6 с после Pn , Lg – через 54.3 с после Sn . Таким образом, кажущиеся скорости этих волн составили 7.7 км/с, 4.36 км/с и 3.57 км/с для Pn , Sn и Lg -волн соответственно. Поверхностная волна Рэлея Rg имела нормальную дисперсию и характеризовалась периодами колебаний от 7.7 с до 11 с, максимальная фаза колебаний в поверхностной волне Рэлея имела кажущуюся скорость 3.0 км/с и период 7.7 с.

Спектральный состав колебаний в различных фазах хорошо иллюстрирует разложение записи по частотным полосовым фильтрам (рис. 4) (использована программа GEOTOOL [17]). Максимально четко волны Pn выделяются при фильтровании в области частот 4–8 Гц, хотя хорошо заметны уже после 0.5 Гц и выше. Обращает на себя внимание «высокочастотность» волны Sn , имеющей крутой фронт вступления особенно в полосах 3–6 Гц и 4–8 Гц. Максимальная по амплитуде группа поперечных волн наиболее отчетливо выделяется в диапазоне частот 0.5–3 Гц и максимум спектра колебаний в этой волне лежит близко к 1 Гц, что послужило основанием интерпретации ее как каналовой волны Lg . Общий максимум записи относится к волнам Lg , эта фаза имеет максимальные амплитуды колебаний на компоненте E–W.

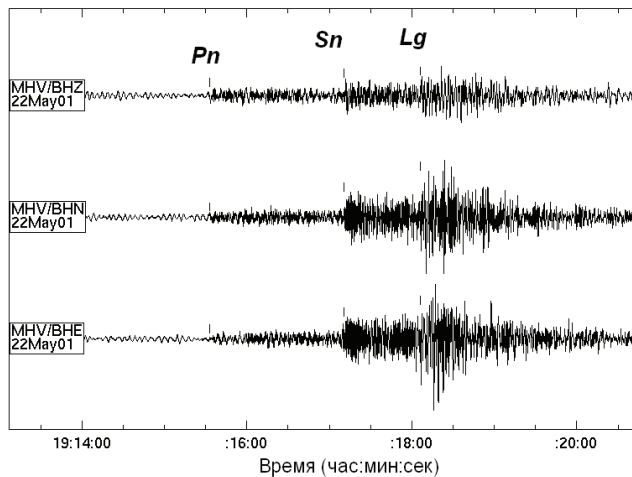


Рис. 3. Трехкомпонентная запись Сальского землетрясения 22 мая 2001 г. на станции «Михнево»

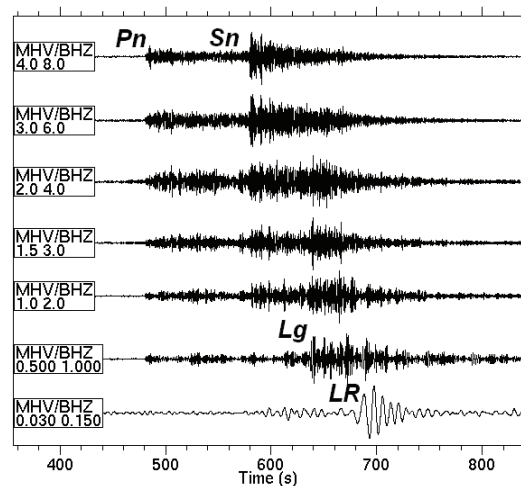


Рис. 4. Разложение записи вертикальной компоненты на серию частотных полос

Уточнение магнитуды и энергетического класса. Знание о магнитуде особенно важно для расчета интенсивности в эпицентре и населенных пунктах. Поэтому были проведены дополнительные магнитудные исследования, для чего собраны цифровые записи нескольких станций, ранее недоступных, таких, как «Михнево» (MHV) в России, «Malatya» (MALT) в Турции, «Kalwaria Paclawska» (KWP) и «Suwalki» (SUW) в Польше, «Piszkes» (PSZ) в Венгрии, предоставленные информационным ресурсом GEOPHON (Потсдам) Германии [18].

Дополнительно были определены локальные магнитуды M_L Рихтера по записям станций «Обнинск» (OBN) и «Кисловодск» (KIV), входящих в глобальную сеть IRIS и оснащенных сейсмометром STS-1 с полосой столообразной части амплитудно-частотной характеристики в интервале 0.003–5 Гц. Использовался способ «симуляции» записи короткопериодного сейсмометра Вуда-Андерсона из широкополосных цифровых записей. «Симуляция» производилась в программе WSG, где реализована не только эта процедура, но и методика расчета локальной магнитуды с использованием обобщенной российской калибровочной функции [19]. Для станции KIV с $\Delta=2.3^\circ$ значение $M_L=5.2$ (рис. 5), для OBN с $\Delta=9.5^\circ$ – $M_L=5.4$. Среднее значение – $\bar{M}_L=5.3$. Учитывая формулу соотношения локальной магнитуды и энергетического класса, выведенную В.Д. Феофилактовым [20],

$$K_p=3.51 + 1.84 M_L, \quad (1)$$

получаем $K(M_L)=13.3$.

«Симулированием» записей прибором СКМ-3 на KIV был получен энергетический класс, равный $K_p=12.5$. При этом значении K_p рассчитано значение магнитуды $MS \sim M$ по формуле (2) Т.Г. Раутиан [21]:

$$K_p=4.0 + 1.8 M \quad (2)$$

и значение магнитуды M_L по формуле (1) В.Д. Феофилактова, соответственно, равные: $MS=4.7$, $M_L=4.9$.

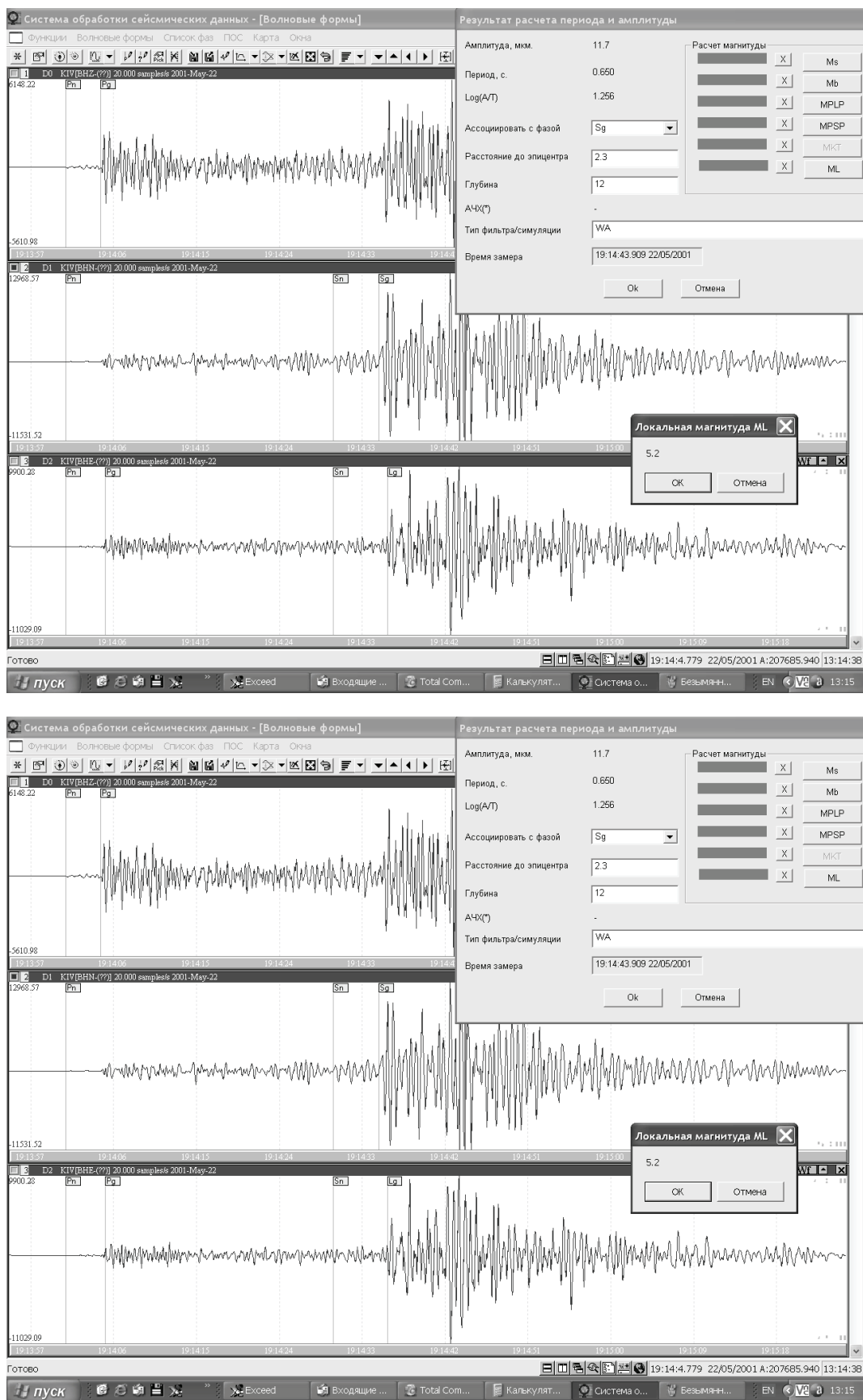


Рис. 5. Волновая картина землетрясения 22 мая 2001 г. на станции «Кисловодск» и вычисление локальной магнитуды по «симулированной» записи короткопериодного прибора Вуда–Андерсона (программа WSG)

Эти исследования были проведены для возможного объяснения низкого значения магнитуды по поверхностным волнам MS , полученным по стандартной методике, используемой при составлении сейсмологического бюллетеня ГС РАН. Так, анализ значений магнитуд MS по поверхностной волне, рассчитанной на расстояниях от 8° до 15° по калибровочной функции [22], показал значительный разброс значений от $MS=3.2$ до $MS=4.3$ [2]. При этом величины периодов на близких и региональных расстояниях $\Delta=2.2-15^\circ$ составляют $T=9-13$ с, что значительно превышает рекомендуемые периоды для замеров амплитуд в максимальной фазе MLR Эйри поверхностной волны Рэлея [23]. Возможно, это связано с применением при обработке цифровых записей полосового фильтра $0.01-0.1$ Гц, рекомендованного для телесейсмических расстояний.

На основе анализа скоростных амплитудных спектров на станциях «Михнево» и «Пулково» (рис. 6) установлено, что необходимо изменить частотную полосу для произведения замеров амплитуд и периодов в MLR , расширив ее в сторону меньших периодов. Был применен для этих целей фильтр Баттерворта с частотной полосой $0.03-0.15$ Гц. Полученные динамические замеры, соответствующие максимуму колебательной скорости в волне Рэлея и соответствующие значения магнитуд, приведены в табл. 3.

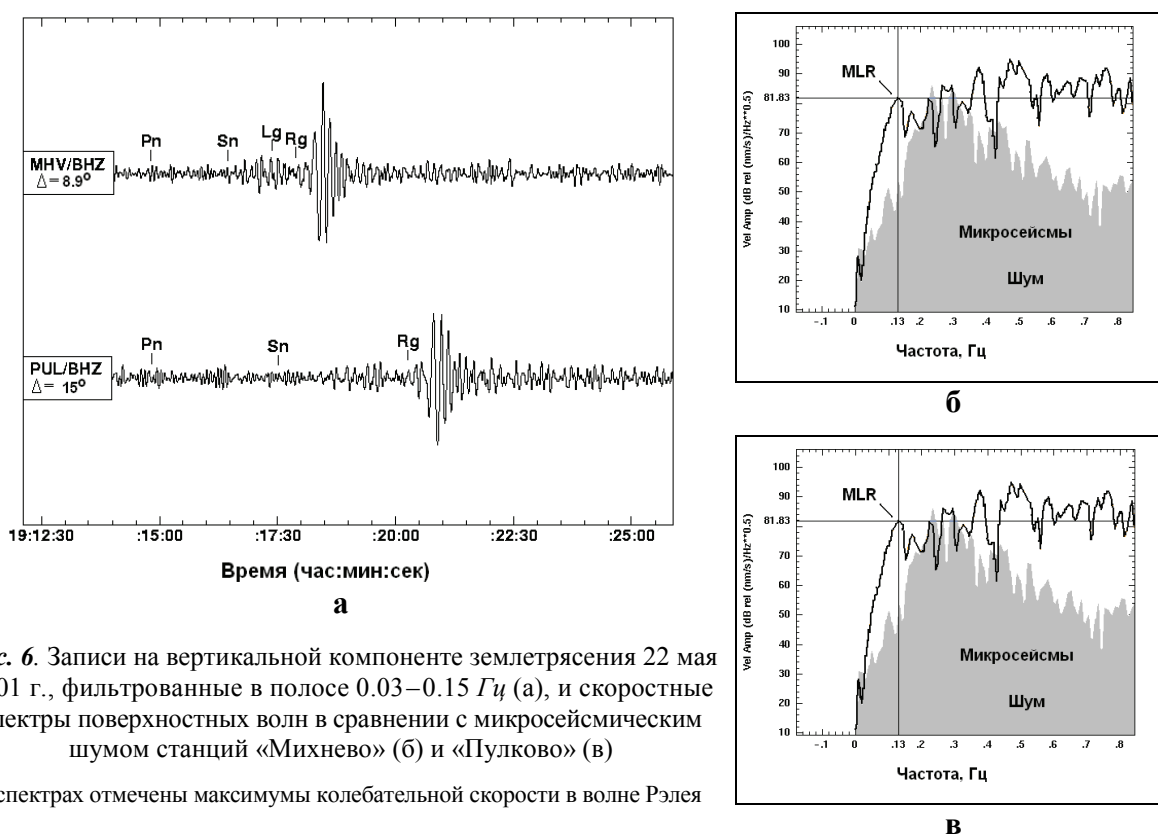


Рис. 6. Записи на вертикальной компоненте землетрясения 22 мая 2001 г., фильтрованные в полосе $0.03-0.15$ Гц (а), и скоростные спектры поверхностных волн в сравнении с микросейсмическим шумом станций «Михнево» (б) и «Пулково» (в)

На спектрах отмечены максимумы колебательной скорости в волне Рэлея

Таблица 3. Результаты определения магнитуды MS по записям станций сети GEOFON Program, GFZ Potsdam, Germany [18] и России

Станция	Код	Δ°	AZM°	A , μ	T , с	MS
Обнинск, Россия	OBN	9.5	156	0.856	7.8	4.0
Михнево, Россия	MHV	8.9	160	0.705	7.7	3.9
Malatya, Турция	MALT	8.5	19	0.117	8.3	3.3
Kalwaria Paclawska, Польша	KWP	13.4	96	0.353	7.5	3.9
Suwalki, Польша	SUW	14.2	115	0.233	9.9	3.6
Арти, Россия	ARU	14.3	228	0.245	8.9	3.7
Пулково, Россия	PUL	15	146	0.504	8.9	4.1
Piszkes, Венгрия	PSZ	15.2	88	0.182	8	3.5
Среднее значение						3.8

Однако все эти действия не позволили получить магнитуду по поверхностной волне, сопоставимую с пересчетными значениями MS из оценок по энергетическому классу и из локальной магнитуды, и, на наш взгляд, соответствующей макросейсмическим эффектам от этого землетрясения. Можно предположить, что это связано с необходимостью использования иной калибровочной функции, отражающей региональное затухание энергии поверхностных волн. Учитывая это, а также установленный в результате спектрального анализа записей факт принадлежности максимума энергии, обусловленный каналовыми волнами Lg , к области, близкой 1 Гц , было принято решение взять в качестве характеристики MS расчетное значение из $K_p=12.5$, равное $MS=4.7$.

Кроме того, была выполнена оценка моментной магнитуды M_w на основе спектров продольных P -волн, зарегистрированных широкополосной аппаратурой IRIS на станциях «Обнинск» (OBN), «Арти» (ARU), «Талая» (TLY). Станционные спектры, полученные на различных расстояниях ($\Delta_{\text{OBN}}=9.4^\circ$, $\Delta_{\text{ARU}}=14.3^\circ$, $\Delta_{\text{TLY}}=39.6^\circ$), приведены к очагу в соответствии с методикой [24]: исправлены за характеристику аппаратуры, за геометрическое расхождение фронта P -волн, за поглощение среды на пути очаг–станция.

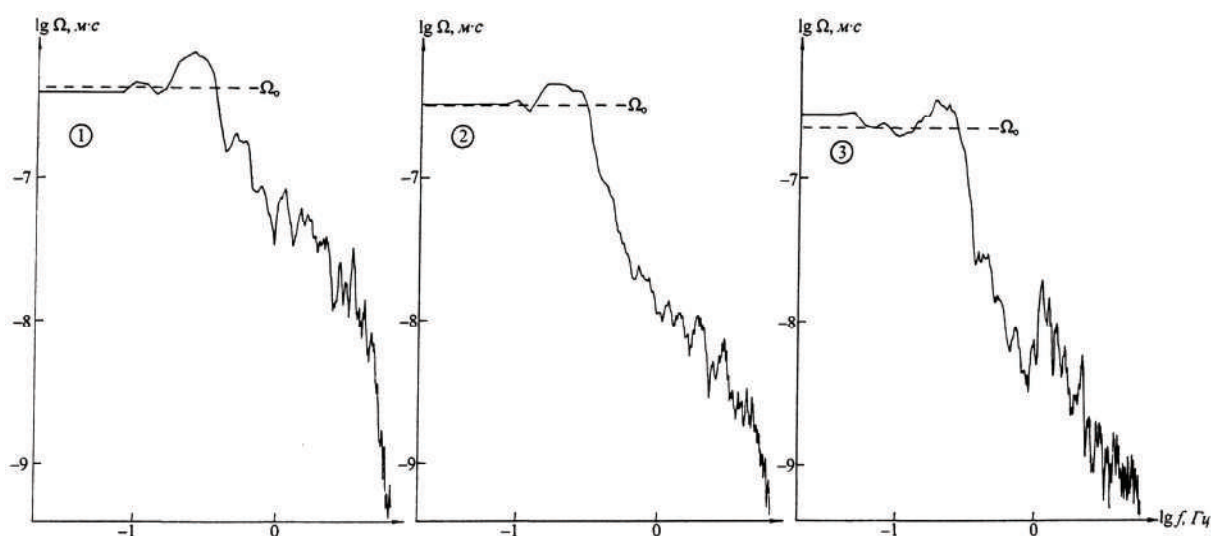


Рис. 7. Очаговые спектры P -волн, записанных на станции «Обнинск». Номера спектров соответствуют номерам землетрясений в табл. 1.

Уровень очагового спектра в области длинных периодов был использован для расчета сейсмического момента M_0 . Среднее значение M_0 по данным трех станций составило $M_0=2.0 \cdot 10^{16} \text{ Н}\cdot\text{м}$, значение моментной магнитуды равно $M_w=4.8$. M_w была рассчитана из сейсмического момента M_0 по формуле Н. Канамори [25]:

$$M_w = \frac{2}{3} \lg M_0 - 10.7. \quad (3)$$

Механизм очага Сальского землетрясения рассчитан по знакам первых вступлений P -волн, выделенных на 29 станциях, из них на 16 зарегистрированы волны сжатия (знаки «плюс»), на 13 – волны разрежения (знаки «минус»). Станции расположены на эпицентральных расстояниях $\Delta=1.4\text{--}46^\circ$ в азимутальном створе $26^\circ\text{--}316^\circ$. Решения механизма очага в стереографической проекции (нижняя полусфера) показаны на рис. 8,а, параметры механизма очага представлены в табл. 4. На рис. 8,б приведены решения по методу тензора момента, полученные в Швейцарском сейсмологическом центре (ZUR) [3]. Как видно, решения, полученные разными методами, близки. Землетрясение произошло под действием превалирования напряжений сжатия, ориентированных в близмеридиональном направлении. Одна из нодальных плоскостей $NP1$ в двух решениях имеет северо-западное простирание ($STK=306\text{--}323^\circ$) и пологое залегание ($DP=25\text{--}33^\circ$). Другая плоскость – $NP2$ – имеет близширотное простирание ($STK=66\text{--}75^\circ$) и крутое падение ($DP=68\text{--}84^\circ$). Тип движения по крутой плоскости – взброс, по пологой – надвиг с правосторонней сдвиговой компонентой.

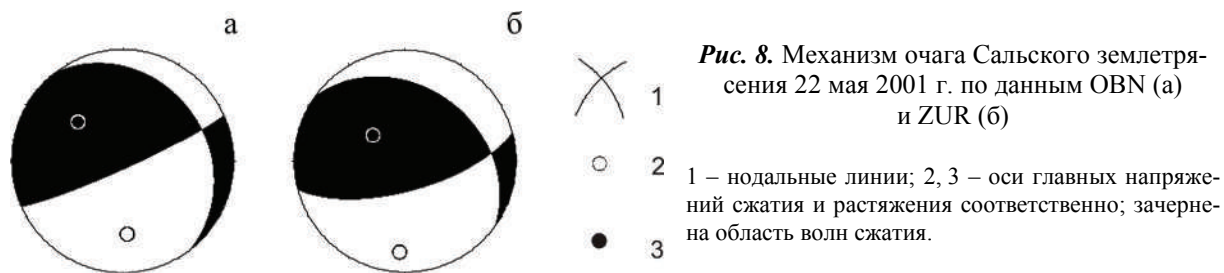


Рис. 8. Механизм очага Сальского землетрясения 22 мая 2001 г. по данным OBN (а) и ZUR (б)

1 – нодальные линии; 2, 3 – оси главных напряжений сжатия и растяжения соответственно; зачерненная область волн сжатия.

Таблица 4. Параметры механизма очага землетрясения Сальского землетрясения 22 мая 2001 г.

Центры	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости					
	T		N		P		NP1			NP2		
	PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP
OBN	46	311	24	68	35	176	323	25	166	66	84	66
ZUR [3]	59	310	23	85	19	184	306	33	136	75	68	65

Направление пологой нодальной плоскости $NP1$ совпадает с простираем активного Маньчжурского разлома. Полученный тип подвижки и направление простираем пологой нодальной плоскости согласуются со сведениями, полученными при интерпретации материалов сейсморазведки в этом районе, предполагающими существование здесь продольных разломов надвигового характера [26].

Макросейсмические сведения. Предварительные данные по ощутимости Сальского землетрясения, полученные МЧС и опубликованные в [1–3], свидетельствуют об отсутствии разрушений в окрестности очага.

Описываемое ниже обследование из-за ряда организационно-технических проблем было проведено спустя 8 месяцев после землетрясения и в очень ограниченные сроки в 36 населенных пунктах на площади $110 \times 170 \text{ км}^2$. Оценки интенсивности базировались на опросных анкетах местного населения и визуальной экспертной инспекции. Поскольку по предварительным данным [1] землетрясение не вызвало повреждений, было ясно, что оценка интенсивности будет базироваться главным образом на реакции людей. В принципе, это позволяет различать интенсивность сотрясений вплоть до 5 баллов.

При интенсивности 6 баллов уже должны возникать повреждения первой степени в уязвимых строениях согласно европейской шкале EMS-98 [27], которой и придерживались. В частности, когда данные не позволяют однозначно оценить интенсивность, например, в 5 или 6 баллов, дается интервал 5–6 баллов. Это значение балльности отражает неопределенность оценки. Таким образом, запись «5–6» баллов не означает 5.5 балла, что подразумевает точность, по крайней мере, 0.5 балла. Заметим, что «половинки» баллов не легализованы ни в одной шкале, в том числе и в MSK-64 [28], но в шкале EMS-98 впервые это оговорено в явном виде. Согласно тем же рекомендациям по применению шкалы EMS-98 недопустимо введение поправок за счет локальных эффектов в оценку интенсивности. Балльность должна строго соответствовать наблюдавшейся картине макросейсмического эффекта. Напротив, локальный эффект – это то, что должно быть обнаружено в ходе планомерного обследования пространственного распределения интенсивности аномальных областей усиления или ослабления сотрясений.

Следует отметить, что рельеф в зоне обследования преимущественно плоский и существенного влияния на интенсивность сотрясений оказать не может. Кроме того, уровень грунтовых вод около 1 м и мало варьирует в пределах эпицентральной области. Здесь, в сельской местности, в основном частная застройка; преобладающий тип конструкций (более 80%) – кладка из красного кирпича на цементном растворе. Дома одноэтажные, квадратные в плане и находятся в неплохом состоянии. Можно считать, что они соответствуют типу В или С, в зависимости от качества скрепляющего раствора (согласно шкале EMS-98). Многоэтажные дома (вплоть до 9 этажей) есть только в Сальске. Чтобы избежать искажающего влияния на оценку интенсивности высотных зданий и различий в типе конструкции, и в Сальске интенсивность оценивалась только по одноэтажным кирпичным домам на цементном растворе.

В целом населенные пункты в эпицентральной области мало отличаются по территории и числу жителей, за редкими исключениями. Чтобы избежать влияния размера населенного пункта на оценку опасности, везде раздавалось одинаковое число анкет в разных частях населенных пунктов, поэтому ситуация при обследовании была благоприятной для получения однородных оценок интенсивности, и нет оснований ожидать каких-либо серьезных искажений в пространственном распределении сейсмичности из-за локальных условий и других артефактов.

Балльность в населенных пунктах приведена в табл. 5, карта изосейст – на рис. 9.

Таблица 5. Макросейсмические данные о Сальском землетрясении 22 мая 2001 г. в 19^h13^m с $K_p=12.5$

№	Пункт	Δ, км	№	Пункт	Δ, км
	<u>6 баллов</u>		22	Сальск	60
1	Яшалта	4		<u>3 балла</u>	
2	Манычский	5	23	Волочаевский	34
3	МТФ «Манычский»	5	24	Октябрьский	44
	<u>5–6 баллов</u>		25	Орловский	59
4	Эркетен	9		<u>2–3 балла</u>	
5	Ульяновское	9	26	Львов	35
6	Березовское	14		<u>2 балла</u>	
	<u>5 баллов</u>		27	Зимовники	87
7	Бага Тугтун	16	28	В. Серебрянка	112
8	Краснополе	17		<u>Не ощущалось</u>	
9	Эсто-Алтай	19	29	Грушевка	80
10	Бараники	35	30	Верхолотов	114
	<u>4–5 баллов</u>		31	Красноярский	124
11	Романовка	12	32	Волгодонск	127
12	Сладкое	21	33	Вербовый Лог	131
13	Н. Егорлык	33	34	Подгоренская	134
	<u>4 балла</u>		35	Цымлянск	143
14	Соленое	24	36	Алдабульск	146
15	Виноградное	30	101	Суво	261
16	Цорос	33	102	Красный Чикой	271
17	Крупский	36	103	Шимбилик	290
18	Сандата	43	104	Аршан	294
	<u>3–4 балла</u>		105	Баянгол	293
19	Городовиковск	40	106	Кырен	320
20	Манычстрой	55	107	Утата	322
21	Пролетарск	57	108	Зима	349

Оценка точности определения балльности. Как указывалось, на проведение обследования было отпущено очень мало времени. Поэтому в каждом населенном пункте заполнялось 7–10 анкет. Даже для небольших, как правило, размеров населенных пунктов, это очень ограниченная выборка, поэтому необходимо каким-то образом определить точность оценок интенсивности. С этой целью случайным образом был выбран один населенный пункт (Ульяновское), в котором после оценки интенсивности по стандартной выборке в 7 анкет, дополнительно было роздано еще 38 анкет. По этой расширенной выборке оценка интенсивности оказалась в точности такой же, как и по стандартной. Учитывая, что интервалами интенсивностей пользовались в неуверенных случаях, можно считать, что приведенные в таблице величины балльности вполне надежны.

Карта изосейст. Средний радиус 6-балльной изосейсты оказался большим (около 20 км), по сравнению с радиусом 5-балльной изосейсты (40 км). Это может зависеть от разных причин. Возможно, что где-то внутри 6-балльной изосейсты присутствует область более интенсивных 7-балльных колебаний, которая не может быть обнаружена из-за того, что эпицентральной

область расположена в малонаселенном районе соляных болот. Другая причина может быть связана с локальным усилением колебаний в населенном пункте Манычский, расположенном у берега р. Маныч. Такое локальное усиление сотрясений в Манычском привело бы к искусственному раздуванию 6-балльной изосейсты. Тем не менее макросейсмический эпицентр определяется довольно надежно (в пределах ± 5 км). На основании наблюдаемого распределения балльности в населенных пунктах эпицентральная интенсивность может быть определена равной $I_0=6-7$ баллов.

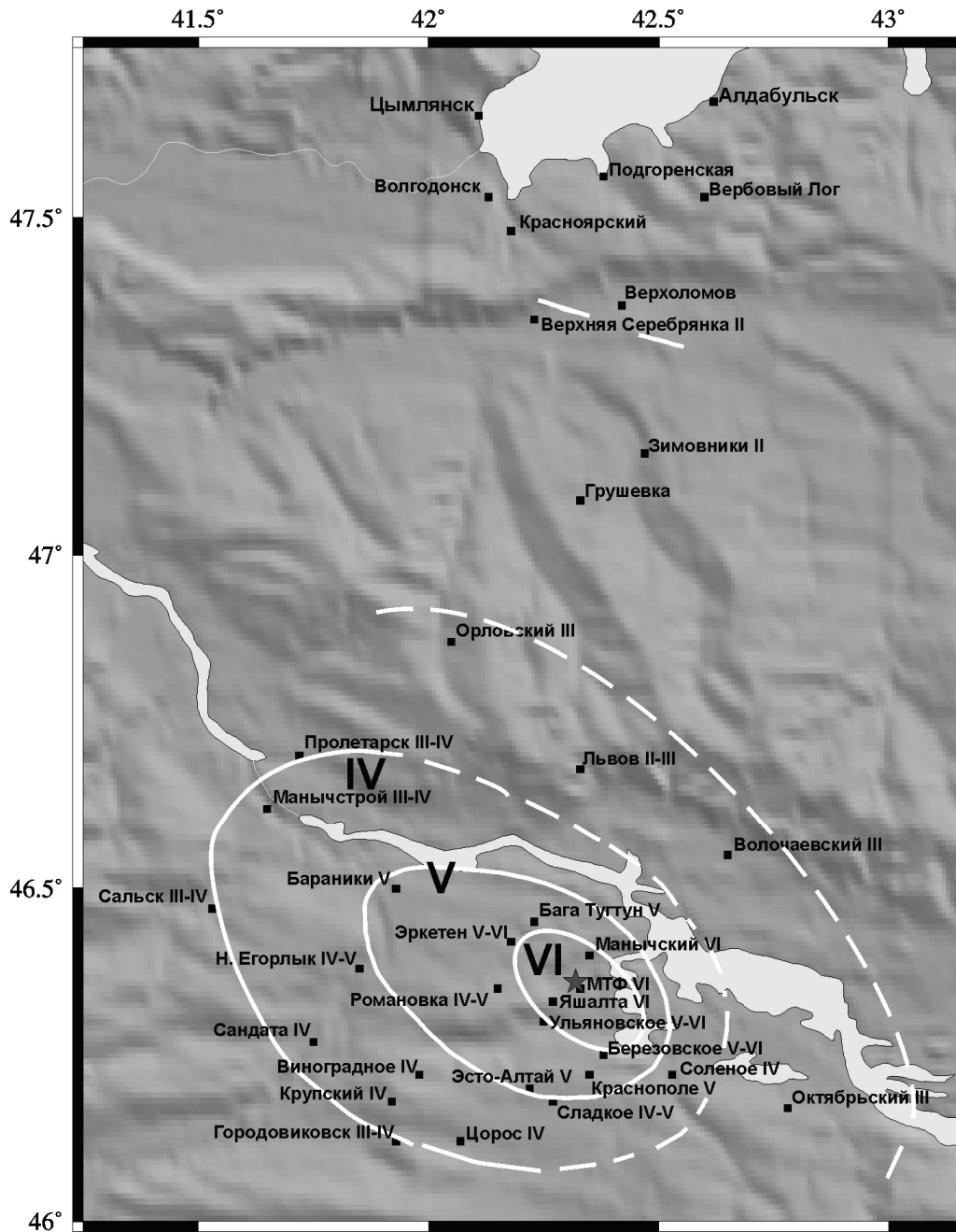


Рис. 9. Карта изосейст Сальского землетрясения 2001 г.

Вытянутость 5-балльной изосейсты в сторону населенных пунктов Бараники и Н. Егорлык может быть связана как с геометрией очага и направлением вспарывания, так и с локальным усилением сотрясений из-за того, что эти населенные пункты расположены на берегу реки. Вытянутость 4-балльной изосейсты в сторону Сальска соответствует очертаниям 5-балльной изосейсты. Косвенно это свидетельствует в пользу нелокального характера причин, которые определяют конфигурацию изолиний. Вероятно, что как характеристики очага, так и

локальные условия совместно определяют особенности макросейсмического поля. Не вдаваясь в причины наблюдавшегося пространственного распределения интенсивностей, можно констатировать, что в западном и южном направлениях сотрясения были более интенсивными. Это также подтверждается оперативными данными ГС РАН об ощутимости Сальского землетрясения на юг вплоть до Пятигорска (около 200 км). Обычно признается, что добротность на платформе высокая. Но наблюдающееся макросейсмическое поле не соответствует этим представлениям: на север, в сторону платформы, землетрясение не ощущалось уже на расстоянии 120 км. Скорее всего, существует некоторый специфический механизм, контролирующий распространение волн, по крайней мере, в макросейсмическом диапазоне частот, не определяющийся только параметром добротности среды. Следует также помнить о том, что, в принципе, макросейсмическое поле, представленное на рис. 9, отражает не только реальное распределение интенсивностей, но и неточности в определении балльности. Но методика проведения макросейсмического обследования в целом обеспечивает довольно надежные оценки интенсивности, поэтому нельзя отмеченную особенность объяснить только точностями.

Южнее Сальского землетрясения на Ставропольской возвышенности известны ощутимые землетрясения, севернее же таких землетрясений не известно, поэтому макросейсмические эффекты к северу от эпицентра были обследованы более тщательно, чем к югу. Здесь не только более тщательно прослежена изосейста в 4 балла, но и определены предельные расстояния, на которых наблюдались 3-балльные сотрясения и началась область не ощутимых сотрясений.

Благодаря тому, что землетрясение произошло в вечернее время, когда большинство людей находились дома, но еще не спали (т.е. были в наиболее чувствительном к сотрясениям состоянии), сообщения о толчках поступали на максимальных расстояниях от эпицентра для землетрясения такой величины. Спадание интенсивности с расстоянием к северу от эпицентра приведено в табл. 6.

Таблица 6. Распределение интенсивности с расстоянием от эпицентра на север

I_0 , баллов по шкале EMS-98	Среднее расстояние, км	I_0 , баллов по шкале EMS-98	Среднее расстояние, км
6	7.5	3	40
5	15	2	до 110
4	25	не ощущалось	от 120

Окончательно получены следующие макросейсмические параметры Сальского землетрясения 22 мая 2001 г.: координаты эпицентра – 46.36°N, 42.32°E, интенсивность в эпицентре – $I_0=6-7$ баллов, глубина очага – $h_m=9$ км. Решение гипоцентра по макросейсмическим данным достаточно хорошо согласуется с уточненными инструментальными данными, описанными выше. Расхождений в φ нет вовсе (с точностью до округления в сотые градуса), по λ оно составляет около 5 км; расхождение по $\delta h=3$ км. Северо-западная ориентация длинной оси изосейст находится в полном согласии с азимутом простирания нодальной плоскости NP1 (табл. 4). Это позволяет считать, что именно по ней происходило движение в очаге.

Уравнение макросейсмического поля. Интересен результат статистического анализа макросейсмических данных (рис. 9) с целью получения уравнения макросейсмического поля конкретно для Сальского землетрясения и сравнения полученных параметров с уже известными формулами для Северного Кавказа [28]:

$$I_0 = 1.6 M - 3.1 \lg h + 2.2 \quad (4)$$

и осредненной для всей территории Северной Евразии формулы уравнения макросейсмического поля [28]:

$$I_0 = 1.5 M - 3.5 \lg h + 3.0. \quad (5)$$

Как видно из рис. 9, разброс наблюдаемых макросейсмических значений I_0 значителен, достигает одного–двух баллов. Уравнение макросейсмического поля, полученное по всей совокупности макросейсмических данных по Сальскому землетрясению, характеризуется достаточно высоким коэффициентом затухания ($v=4.2$).

Полученное уравнение макросейсмического поля для пунктов вдоль вытянутости изолиний

$$I_i = 1.6M - 3.6 \lg r + 2.2, \quad (6)$$

рассчитанное с использованием данных только тех пунктов, которые находились в зоне северо-запад–юго-восток, т.е. в сторону вытянутости изосейст, совпадает по значению свободного члена в уравнении (4) для Северного Кавказа, но отличается значением $\nu=3.6$ (в формуле (4) $\nu=3.1$). Значение коэффициента затухания $\nu=4.7$ в (7), полученное для пунктов вкrest простираия изолиний (север–юг), характеризует повышенное поглощение среды в этом направлении:

$$I_i = 1.6M - 4.7 \lg r + 3.5. \quad (7)$$

Осредненное по Сальскому землетрясению уравнение макросейсмического поля, полученное по всей совокупности макросейсмических данных, имеет вид:

$$I_i = 1.6M - 4.2 \lg r + 2.9. \quad (8)$$

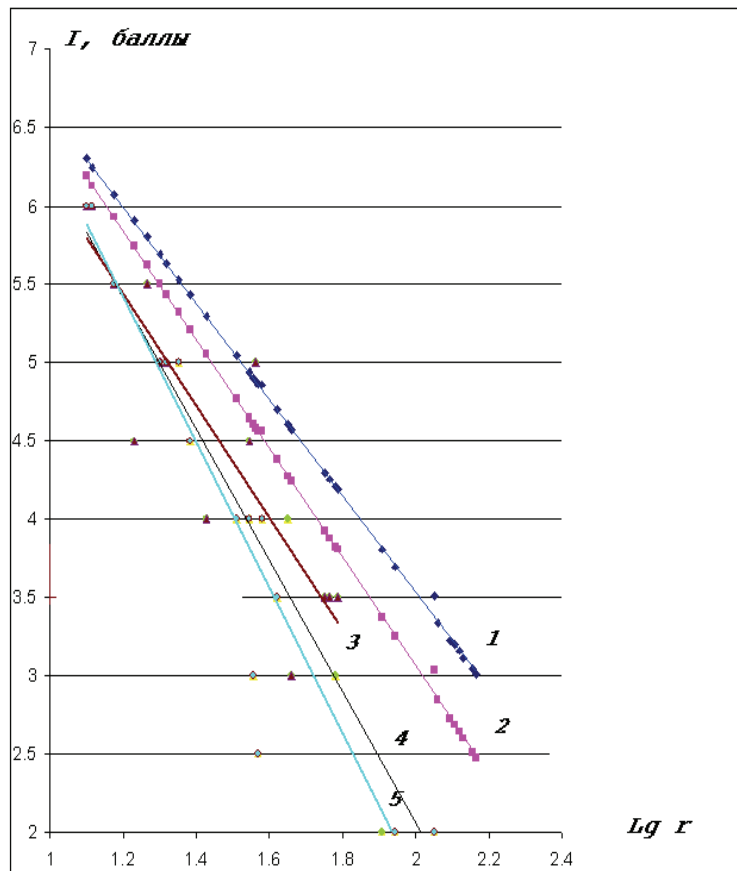


Рис. 10. Графики затухания макросейсмической интенсивности по разным данным: по [28] для Северного Кавказа (1), для Восточно-Европейской платформы (2); для Сальского землетрясения вдоль вытянутости изосейст (3), в среднем (4) и поперек вытянутости изосейст (5)

Конечно, полученные данные могут рассматриваться только как частный случай и не могут быть применены для региона в целом, но в то же время могут быть использованы в дальнейшем, по мере накопления информации, для корректировки уравнения макросейсмического поля для северной части Северного Кавказа.

Структурно-тектоническая позиция Сальского землетрясения определяется, с одной стороны, принадлежностью к северной части Скифской плиты и одновременно к зоне поддвига молодой Скифской плиты под древнюю Восточно-Европейскую платформу [26]. Эта зона отделяется от Предкавказья Манычским прогибом, заложенным по крупным разломам в фундаменте. Вдоль Манычского прогиба и одноименного разлома (по Е.А. Рогожину – Новочеркасского),

следующего на северо-запад к южной окраине Донбасса, и проходит северная граница геологического региона Кавказа. Манычский (Новочеркасский) разлом составляет лишь один из отрезков крупнейшей зоны глубинных разломов юга европейской части бывшего СССР и запада Средней Азии [30].

С другой стороны, для построения модели очага этого землетрясения следует учесть, что оно произошло в зоне линейного Манычского прогиба, имеющего западное–северо-западное простирание, и обрамленного с севера Сальско-Манычской системой поднятий (мегантиклиналей) [26, 45], а с юга – Ейским новейшим поднятием. Эти поднятия входят в систему платформенных структур, продолжающих субмеридиональную зону Транскавказского поперечного поднятия, выделяемую в структуре Кавказа, Закавказья и Предкавказья [31, 32]. Характерно, что целый ряд сильных землетрясений Кавказа связывается с Транскавказским поперечным поднятием, в частности Спитакское 07.12.1988 г. с $MLH=6.8$, $I_0=10$ баллов [33] и Рачинское 29.04.1991 г с $MLH=6.9$, $I_0=8-9$ баллов [34]. Теперь Сальское землетрясение 22 мая 2001 г. дополняет этот ряд и является пока самым северным землетрясением этой глобальной структуры. Схема основных тектонических элементов показана на рис. 11.

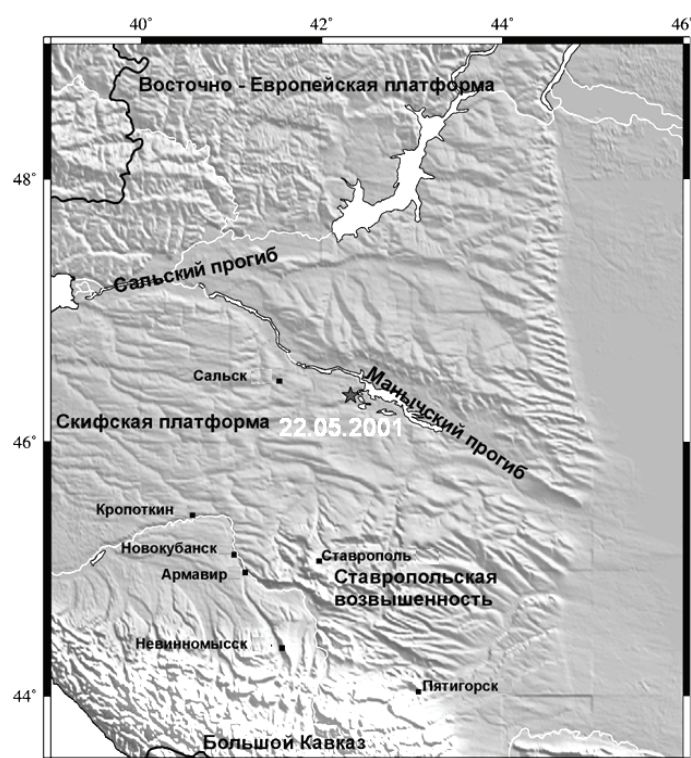


Рис. 11. Схема основных структурных элементов зоны Сальского землетрясения 22 мая 2001 г.

Заметим, что Сальское землетрясение является не только самым крупным сейсмическим событием района инструментального времени, но и исторического [35]. Но следует помнить о том, что известная сейсмическая история коротка (не превышает 150 лет). Объясняется это просто отсутствием здесь постоянных населенных пунктов. Например, Яшалта, ближайший к эпицентру населенный пункт, отметил 125-летие в 2002 г. Сальск (бывшая Торговая) был основан в самом конце XIX в., когда строилась железная дорога на Кавказ. Зимовники, один из самых крупных населенных пунктов района, был основан в 1898 г. На этом основании можно предположить, что период повторяемости землетрясений с умеренными магнитудами, составляет, по крайней мере, 150 лет.

Исторические сведения. В «инструментальный период» мониторинга на Северном Кавказе, непосредственно в окрестностях Сальского землетрясения, в зоне Манычского (Новочеркасского) разлома известны лишь три небольших землетрясения с $K_p=8.9$ (26.04.1984 г. в 12^h09^m [36]), $K_p=9.0$ (02.12.1996 г. в 12^h25^m [37, 38]) и $K_p=7.8$ (23 мая 2001 г. в 20^h30^m [39]). Вместе с тем в «исторический период» [35, 40–42] также отмечалось проявление сеймотектонической

активности в зоне этого разлома. 25 ноября 1907 г. было зафиксировано землетрясение с магнитудой 3.2 (3.6) на северо-западной оконечности разлома (рис. 12), ощущавшееся с интенсивностью 5 баллов в станице Пролетарская (Великокняжеская) – в домах колебалась мебель, жители в страхе выбегали на улицу [35, 42]. Около 100 км западнее известно ощутимое землетрясение 15.06.1882 г., при котором в селах Лопанка и Белая Глина (урочище Медвежанское) были отмечены сотрясения в 5 баллов [42, 43]. Все эти эпицентры показаны на рис. 12 на фоне активных разломов Северного Кавказа [44].

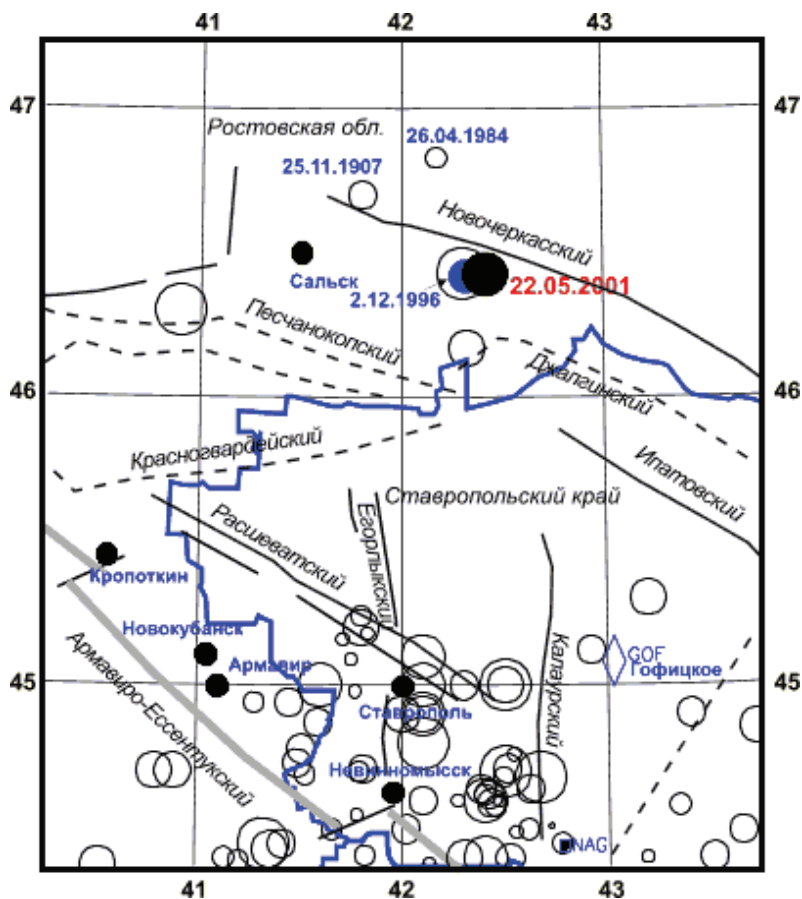


Рис. 12. Сейсмичность окрестности Сальского землетрясения 22 мая 2001 г.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты № 05-05-64316 и № 07-05-00702).

Л и т е р а т у р а

1. Информационное сообщение о землетрясении 22 мая 2001 г. на юго-западе России // www.ceme.gsras.ru
2. Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2001 год / Отв. ред. О.Е. Старовойт. – Обнинск: ГС РАН, 2001–2002.
3. Bulletin of the International Seismological Centre for 2001. – Berkshire: ISC, 2002–2003.
4. Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1: 8 000 000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных районах. – М.: ИФЗ РАН, 1999. – 57 с.
5. Оперативный сейсмологический каталог по региону Северный Кавказ (Приложение к оперативному сейсмологическому бюллетеню ГС РАН). – Обнинск: ГС РАН, 2001–2002.
6. Tatevossian R.E., Arefiev S.S., Pletnev K.G. Macroseismic survey of Salsk (Russian platform) earthquake of 22 May 2001 // Joint Institute of Physics of the Earth, RAS. – Russian J. of Earth Sciences. – 2002. – 4. – № 2. – P. 163–169.

7. **Preliminary Determination of Epicenters (PDE).** – Earthquake Bulletins and Catalogs at the USGS National Earthquake Information Center (NEIC). – 2001.
8. **Reviewed Event Bulletin of the CTBT-IDC.** – 2001.
9. **Сводный бюллетень записи землетрясений ближней зоны ИГ НАНУ.** – Симферополь: Отдел сейсмологии ИГ НАНУ, 2001.
10. **Bratt S.R. and Bache T.C.** Locating events with a space network of regional arrays // Bull. Seismol. Soc. Am. – 1988. – 78. – P. 780–798.
11. **Kennet B.L.N. (Editor).** **IASPEI 1991 Seismological Tables** – Research School of Earth Sciences Australian National University, 1991.
12. **Габсатарова И.П., Чепкунас Л.С., Бабкова Е.А.** Проявление сейсмичности в платформенной области на юго-западе России (Сальское землетрясение 22 мая 2001 г.) // Активные геологические и геофизические процессы в литосфере. Методы, средства и результаты изучения. Материалы XII Международной конференции. Том I [А-М]. – Воронеж: ВГУ, 2006. – С. 128–131.
13. **Щукин Ю.К.** Глубинное строение и динамика земной коры Восточно-Европейской платформы // Землетрясения Северной Евразии в 1995 году. – М.: ГС РАН, 2001. – С. 143–150.
14. **Пасечник И.П.** Характеристики сейсмических волн при ядерных взрывах и землетрясениях. – М.: Наука, 1970. – 193 с.
15. **Manual of Seismological Observatory Practice.** WWW-edition which is regularly updated within the Commission on Practice of IASPEI. (http://www.seismo.com/msop/msop_intro.html). 2002. – Chapter 11. – P. 70.
16. **Юдахин Ф.Н., Щукин Ю.К., Макаров В.И.** Глубинное строение и современные геодинамические процессы в литосфере Восточно-Европейской платформы. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 300 с.
17. **John Coyne, Karen Clark, Stephen Lloyd.** IDC Documentations Geotool Software User Tutorial. – 16 July 2003. – P. 59.
18. **Информационный сайт GEOFON Earthquake Information Service.** [http://www.gfz-potsdam.de/geofon/new/eq_inf.html].
19. **Габсатарова И.П.** Внедрение в рутинную практику подразделений ГС РАН процедуры вычисления локальной магнитуды // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Международной сейсмологической школы, посвященной 100-летию открытия сейсмических станций «Пулково» и «Екатеринбург». – Обнинск: ГС РАН, 2006. – С. 49–53.
20. **Феофилактов В.Д.** Калибровочная функция для расчета магнитуды по объемным волнам на расстояниях менее 20°. – Обнинск: Фонды ГС РАН, 2005. – 10 с.
21. **Раутиан Т.Г.** Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности (Тр. ИФЗ АН СССР; № 9 (176)). – М.: ИФЗ АН СССР, 1960. – С. 75–114.
22. **Ванек И., Затопек А., Карник В. и др.** Стандартизация шкал магнитуд // Известия АН СССР. – Сер. геофизическая – 1962. – № 2. – С. 153–158.
23. **Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях Единой системы сейсмических наблюдений СССР.** – М.: Наука, 1982. – 273 с.
24. **Захарова А.И., Чепкунас Л.С.** Динамические параметры очагов сильных землетрясений по спектрам продольных волн на станции «Обнинск» // Физика Земли. – 1977. – № 2. – С. 9–17.
25. **Hanks T.C., Kanamori H.** A Moment Magnitude Scale // J. Geophys. Res. – 1979. – 84. – № 35. – P. 2348–2350.
26. **Копп М.Л.** Мобилистическая неотектоника платформ Юго-Восточной Европы. – М.: Наука, 2004. – 344 с.
27. **Grunthal G. (editor).** European Macroseismic Scale 1998 // Cahiers du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie (Luxembourg). – 1998. – 15. – P. 5.
28. **Медведев С.В. (Москва), Шпонхойер В. (Иена), Карник В. (Прага).** Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. – М.: МГК АН СССР, 1965. – 11 с.
29. **Шебалин Н.В.** Коэффициенты уравнения макросейсмического поля по регионам // Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. – М.: Наука, 1977. – С. 30.
30. **Ризниченко Ю.В. (отв. ред.).** Сейсмическая сотрясаемость территории СССР. – М.: Наука, 1979. – С. 59.
31. **Милановский Е.Е., Хаин В.Е.** Геологическое строение Кавказа. – М.: МГУ, 1963. – 355 с.

32. **Рогожин Е.А.** Современная геодинамика и потенциальные очаги землетрясений Кавказского региона // Современные математические и геологические модели природной среды. – М.: ОИФЗ РАН, 2002. – С. 244–254.
33. **Геодакян Э.Г., Голинский Г.Л., Папалашвили В.Г., Хромецкая Е.А., Шебалин Н.В.** 1991. Спитакское землетрясение 7 декабря 1988 г., карты изосейст // Землетрясения в СССР в 1988 году. – М.: Наука. – С. 74–86.
34. **Габсатарова И.П., Захарова А.И., Старовойт О.Е., Чепкунас Л.С.** Каталог Рачинского землетрясения 29 апреля 1991 года и его афтершоков (по данным региональных сейсмических станций). – Обнинск: ОМЭ ИФЗ АН СССР, 1992. – 40 с.
35. **Макаров В.И., Макарова Н.В., Несмеянов С.А., Макеев В.М., Дорожко А.Л., Зайцев А.В., Зеленщиков Г.В., Серебрякова Л.И., Суханова Т.В.** Новейшая тектоника и геодинамика. Область сочленения Восточно-Европейской платформы и Скифской плиты. – М.: Наука, 2006. – 206 с.
36. **Папалашвили В.Г. (отв. сост.), Агаларова Э.А., Кахиани Л.К., Саргсян Г.В., Казанцева Т.Н.** Кавказ (каталог) // Землетрясения в СССР в 1984 г. – М.: Наука, 1987. – С. 194–203.
37. **Габсатарова И.П., Девяткина Л.В.** Северный Кавказ (без Дагестана) // Землетрясения Северной Евразии в 1996 году. – М.: ГС РАН, 2002. – С. 37–42.
38. **Габсатарова И.П. (отв. сост.), Некрасова В.Н., Девяткина Л.В., Мусалаева З.А., Гамидова А.М.** Северный Кавказ (включая Дагестан) // Землетрясения Северной Евразии в 1996 году. – М.: ГС РАН, 2002. – С. 245–252.
39. **Габсатарова И.П., Амиров С.Р. (отв. сост.), Селиванова Е.А., Девяткина Л.В., Иванова Л.Е., Мусалаева З.А., Гамидова А.М., Сагателова Е.Ю., Абдуллаева А.Р.** Северный Кавказ. (См. раздел VI (Каталоги землетрясений) в наст. сб. на CD).
40. **Бабаян Т.О., Кулиев Ф.Т., Папалашвили В.Г., Шебалин Н.В., Вандышева Н.В. (отв. сост.).** П б. Кавказ [50–1974 гг., $M \geq 4.0$, $I_0 \geq 5$] // Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. – М.: Наука, 1977. – С. 69–170.
41. **Special Earthquake Catalogue of Northern Eurasia From Ancient Times Through 1995.** Eds. Kondorskaia N.V., Ulomov V.I. <http://www.scgis.ru> System of data bases, 1996.
42. **Ананьин И.В.** Сейсмичность Северного Кавказа. – М. Наука, 1977. – 148 с.
43. **Мушкетов И.В., Орлов А.П.** Каталог землетрясений Российской империи // Записки Русского геогр. общества. – 26. – Санкт-Петербург: Типография Императорской АН, 1893. – 582 с.
44. **Рогожин Е.А.** Карта важнейших разломов Кавказского региона. (Личный архив).
45. **Новейшая тектоника и геодинамика.** Область сочленения Восточно-Европейской платформы и Скифской плиты. – М.: Наука, 2006. – 205 с.