

**АЛТАЙСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 27 сентября 2003 года: эпицентральные
сейсмологические наблюдения**

**С.С. Арефьев, В.В. Быкова, И.В. Матвеев, Н.В. Матвеева, А.Г. Михин,
С.Г. Молотков, К.Г. Плетнев**

Институт физики Земли РАН, г. Москва, sserg@ifz.ru

Алтайское (Чуйское) землетрясение 27 сентября 2003 г. в 11^h33^m – сильнейшее на территории Центральной России за последние десятилетия. По данным Геофизической службы РАН, землетрясение имело магнитуду $MS=7.3$ [1], СМТ (Гарвард) дает значение $M_w=7.2$ [2]. Землетрясение с магнитудой такой величины вполне соответствует прогнозным оценкам на карте ОСР-97 [3], хотя в окрестностях очага сильных землетрясений инструментально зарегистрировано не было. Некоторые села в эпицентральной зоне сильно пострадали, были раненые, но по счастливой случайности никто не погиб: район очаговой зоны землетрясения малонаселенный. По результатам исследования этого землетрясения и его проявлений имеется весьма обширная библиография, содержащая в частности публикации [4–12].

Группа сейсмологов Института физики Земли начала наблюдения в эпицентральной зоне только в июне 2004 г. и провела два полевых сезона наблюдений (с 25 июня по 3 сентября 2004 г. и с 10 августа по 14 сентября 2005 г.) в эпицентральной зоне землетрясения. Уже при работах в поле отмечалось, что сейсмическая активность в очаговой области даже спустя два года после главного толчка оставалась высокой. Это является отклонением от нормы, поскольку обычно афтершоки «отсекаются» временным окном длительностью несколько месяцев, максимум один год [13]. С точки зрения адекватной оценки сейсмической опасности исследование таких отклонений имеет большое значение. Поэтому Алтайское землетрясение было исследовано весьма детально различными методами. Особо хотелось бы отметить работы сеймотектонической группы, возглавляемой Е.А. Рогожиным [14], детально исследовавшей выход разрыва в очаге на поверхность. Кроме многих других важных результатов [11, 14], выход разрыва определяет расположение очага землетрясения, что весьма полезно при оценках достоверности и точности локации эпицентров афтершоков и главного толчка различными системами сейсмологических наблюдений.

Параметры основного толчка и сильнейшие афтершоки приведены в табл. 1. Как обычно, положение основного толчка по данным различных источников различается весьма значительно. В табл. 1 использованы результаты специальной работы [15], где положение основного толчка было уточнено методами групповой гипоцентрии. На всех картах, представленных ниже, положение главного толчка показано по этим данным, а афтершок в 11^h58^m показан по [2].

Таблица 1. Основные параметры главного события и наиболее сильных афтершоков Алтайского землетрясения 27 сентября 2003 г.

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	Гипоцентр			Магнитуды		
			φ° , N	λ° , E	h , км	MS	Ms	M_w
Основной толчок								
1	27.09	11 33 25	50.042	87.838	9.7	7.3	7.4	7.2
Наиболее сильные афтершоки								
2	27.09	11 58 07	49.975	88.092	10.0	5.4	6.3	
3	27.09	18 52 47	50.080	87.763	16.0	6.6	6.6	6.4
4	01.10	01 03 25	50.165	87.703	11.2	6.9	7.0	6.6

Полевые инструментальные сейсмологические наблюдения проведены в очаговой зоне Алтайского землетрясения в полевые сезоны 2004 и 2005 гг. Для этого была развернута сеть временных сейсмических станций, состоявшая из телеметрической системы (8 пунктов, включая центр сбора и обработки данных), автономных станций на базе цифрового 24-битного сейсмического автоматического регистратора СЕЙСАР-1 (4 пункта) и цифровых акселерометров SMACH (5 пунктов). Датчиками служили короткопериодные приборы СМ-3 и КМВ (табл. 2, 3).

Таблица 2. Временные сейсмические станции ИФЗ РАН в эпицентральной области Алтайского землетрясения 2003 г. с $MS=7.3$

№	Станция			Период работы в		Координаты		
	Название	Код	Тип	2004 г.	2005 г.	φ°, N	λ°, E	Высота над уровнем моря, м
1	Таныс-Каин	TAN	автон.	25.VI–01.IX		50.3295	87.2080	1240
2	Арка	ARC	автон.	25.VI–02.IX	10.VIII–13.IX	50.2332	87.7612	1270
3	Бельтир	BLT	автон.	24.VI–03.IX		49.9720	88.1618	1910
4	Ойбок	OIB	автон.	24.VI–03.IX	13.VIII–14.IX	88.0317	49.9602	1980
5	Акташ	AKT	автон.		11.VIII–14.IX	87.6212	50.3245	1380
6	Курай	KUR	телем.	23.VI–03.IX	10.VIII–13.IX	53.3876	49.4838	1440
7	Колду-Юрт	KOL	телем.	24.VI–03.IX	11.VIII–13.IX	50.2962	87.8458	2060
8	Лесная	FRS	телем.	23.VI–02.IX	10.VIII–12.IX	50.1268	87.8948	1600
9	Чуйская	CHU	телем.	24.VI–02.IX	10.VIII–13.IX	50.1783	88.1738	1900
10	Орготыт	ORZ	телем.	24.VI–03.IX	10.VIII–13.IX	50.29017	87.9275	1900
11	Восточная	WEZ	телем.	24.VI–03.IX	10.VIII–13.IX	50.2398	87.8378	1700
12	Сары	SAZ	телем.	23.VI–02.IX	10.VIII–13.IX	50.1663	87.8330	1800
13	Араджан	ARZ	телем.	24.VI–03.IX	11.VIII–12.IX	50.1640	88.0282	1800
14	Чибит	CHS	аксел.	26.VI–01.IX	11.VIII–10.IX	87.5032	50.3137	1200
15	Бельтир	BLS	аксел.	24.VI–03.IX	13.VIII–09.IX	88.1732	49.9755	1900
16	Курай	KRS	аксел.	23.VI–03.IX	10.VIII–13.IX	87.9372	50.2161	1440
17	Акташ	AKS	аксел.	25.VI–01.IX	11.VIII–10.IX	87.6212	50.3245	1380
18	Чоган-Узун	CSH	аксел.	26.VI–01.IX	13.VIII–11.IX	88.3580	50.1017	1800

Таблица 3. Данные об аппаратуре временных цифровых станций ИФЗ РАН на Алтае

№	Код станции	Тип АЦП и датчика	Перечень каналов	Частотный диапазон, Гц	Частота опроса данных, Гц	Эффективная разрядность АЦП	Чувствительность, велосиграф – отсчет/(м/с), акселерограф – отсчет/(м/с ²)
1	TAN	Сейсар + СМЗ	(N, Z, E)v	0.8–30	100	19	82.0; 117.0; 95.0
2	ARC	Сейсар + КМВ	(N, Z, E)v	0.4–40	100	19	3245; 3395; 3145
3	BLT	Сейсар + СМЗ	(N, Z, E)v	0.8–30	100	19	29.7; 31.4; 24.1
4	OIB	Сейсар + СМЗ	(N, Z, E)v	0.8–30	100	19	31.3; 25.8; 26.1
5	AKT	Сейсар + СМЗ	(N, Z, E)v	0.8–30	100	19	29.7; 31.4; 24.1
6	KUR	DAS + СМЗ	(N, Z, E)v	0.8–30	100	19	62.5; 62.5; 45.5
7	KOL	TDAS + КМВ	(N, Z, E)v	0.4–40	100	19	3948; 4102; 3541
8	FRS	TDAS + КМВ	(N, Z, E)v	0.4–40	100	18	3527; 3532; 3460
9	CHU	TDAS + КМВ	(N, Z, E)v	0.4–40	100	18	4274; 4010; 4013
10	ORZ	TDAS + СМЗ	(Z)	0.8–30	100	18	30.4
11	WEZ	TDAS + СМЗ	(Z)	0.8–30	100	18	29.9
12	SAZ	TDAS + СМЗ	(Z)	0.8–30	100	18	122.2
13	ARZ	TDAS + СМЗ	(Z)	0.8–30	100	18	120.3
14	CHS	SMACH	(N, Z, E)a	0.3–30	128	10	
15	BLS	SMACH	(N, Z, E)a	0.3–30	128	10	
16	KRS	SMACH	(N, Z, E)a	0.3–30	128	10	
17	AKS	SMACH	(N, Z, E)a	0.3–30	128	10	
18	CSH	SMACH	(N, Z, E)a	0.3–30	128	10	

Выбор мест для установки приборов является сложной задачей, и ее решение всегда является компромиссом. С одной стороны, очаговую зону следует равномерно окружить пунктами регистрации, с другой – это требование невыполнимо из-за трудностей доступа, невозможности обеспечить регулярное обслуживание приборов и сохранность аппаратуры в западном секторе очаговой зоны, где находятся высокие горы, покрытые ледниками. По этой причине западный сектор остался почти совсем не обеспеченным наблюдениями. Размещение временных сейсмических станций показано на рис. 1.

Наблюдения 2004 г. Организация сети временных сейсмических станций и результаты наблюдений, выполненных летом 2004 г., подробно изложены в работе [8, 9].

Наблюдения 2005 г. При развертывании временных сейсмических станций была поставлена задача разместить их в тех же пунктах, что и при работах 2004 года. Эта задача в целом была выполнена. За небольшими исключениями (несколько автономных сейсмостанций не было установлено), наблюдательная сеть 2005 г. совпадает с сетью 2004 года. Из рис. 1 можно видеть, что сеть далеко не идеальна по своей конфигурации. Западная часть очаговой зоны располагалась в практически недоступной горной местности. Потому расставить сейсмические станции там не удалось. Это несколько снизило общее качество определений гипоцентров, но, как было показано в [9], гипоцентры тем не менее удалось лоцировать с высокой точностью: средняя ошибка $\delta \leq 1$ км.

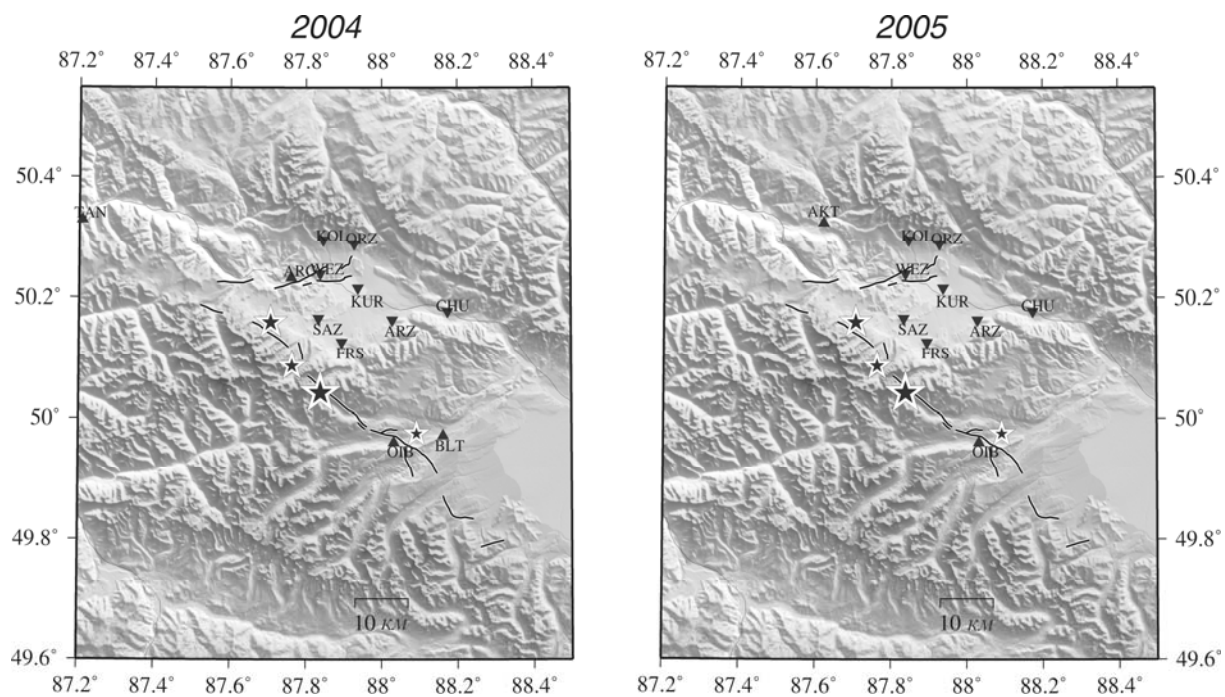


Рис. 1. Сеть временных сейсмических станций (прямые треугольники – автономные станции, перевернутые – телеметрические) в полевые сезоны 2004 и 2005 гг. (показан выход разрыва в очаге на поверхность и положение главного толчка и сильнейших афтершоков)

Сейсмическая активность повторных толчков была высокой, и за период летних полевых работ было зарегистрировано и обработано более 1 500 афтершоков в 2004 г. и более 500 – в 2005 г., т.е. сейсмическая активность в очаговой области даже спустя два года после главного толчка была высокой, хотя и уменьшилась в три раза. Однако следует отметить, что уменьшение это происходило гораздо медленнее, чем обычный спад активности афтершоков для таких землетрясений.

Таким образом, в результате двух сезонов полевых наблюдений в эпицентральной зоне Алтайского землетрясения были получены цифровые записи более чем 2 000 афтершоков [16], выполнить исследование очаговой зоны методом локальной сейсмической томографии [11] и сделать определенные выводы о структуре очаговой зоны.

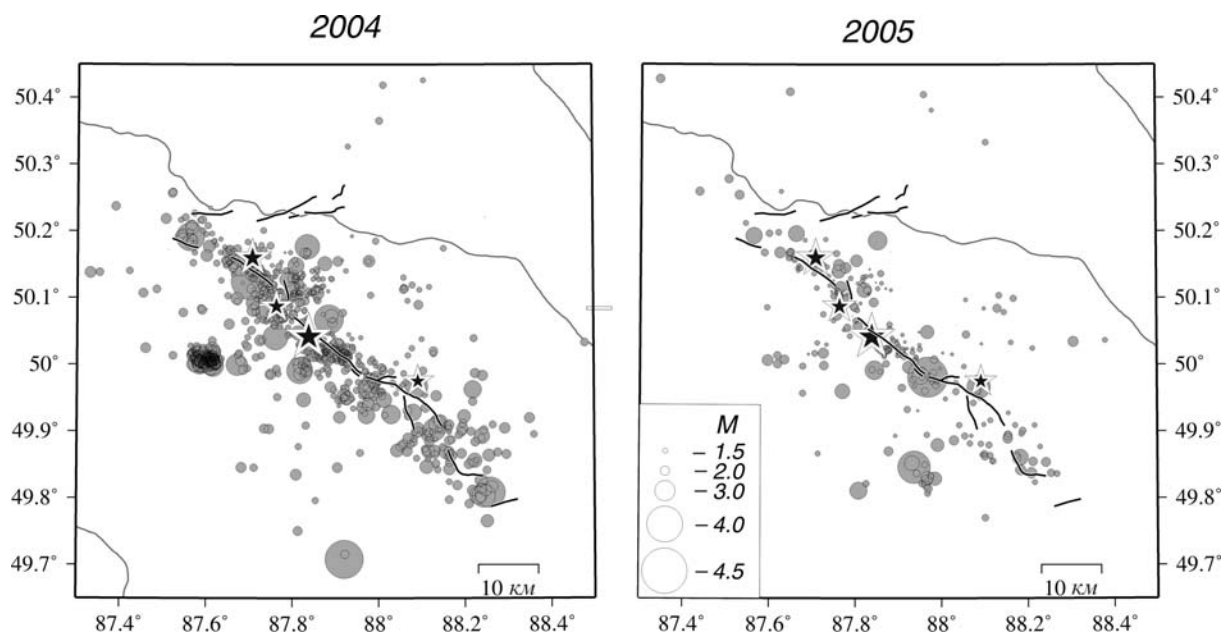


Рис. 2. Карта эпицентров афтершоков за 30 дней (август) 2004 г. и 30 дней (август–сентябрь) 2005 г.

В частности, использование локальной сейсмической томографии позволило не только получить весьма детальную информацию о трехмерной скоростной модели среды, но и уточнить положение гипоцентров афтершоков. Это дает более точную картину пространственного распределения афтершоков и, соответственно, объема очага землетрясения. На рис. 3. показана карта эпицентров наиболее точно определенных афтершоков и вертикальные разрезы вдоль линий А, В, ..., F. Это рисунок дает представление об объемном распределении афтершоков, позволяет увидеть отдельные кластеры, которые, по-видимому, отражают сегментность основного толчка землетрясения и сильнейших афтершоков.

В результате сеть временных сейсмических станций в зоне Алтайского (Чуйского) землетрясения позволила зарегистрировать более двух тысяч повторных толчков и с большой точностью определить координаты их гипоцентров. Тем самым была показана работоспособность и эффективность аппаратно-методического комплекса эпицентральных наблюдений, который в настоящее время находится на стадии переоснащения. Наиболее точные результаты по определению координат гипоцентров были получены методами локальной сейсмической томографии с двойными разностями. Построенные карты эпицентров афтершоков показывают хорошее согласие между пространственным распределением афтершоков и разрывами на поверхности. По данным [6, 14], протяженность разрыва на поверхности составляет $L=65$ км, а подвижка $u=0.5-1.5$ м. Линейные размеры l_{\parallel} продольной оси области афтершоков, как и ожидалось, больше: $l_{\parallel}=75$ км, вертикальный размер – 18 км, площадь области афтершоков – $S_{\text{афт}}=1350$ км².

По карте и вертикальным разрезам можно видеть особенности строения облака афтершоков. Делая вполне общепринятое предположение, что афтершоки трассируют разрывы в очаге сильного землетрясения, видим, что в северной части облака отчетливо выделяется (разрезы А и В) субвертикальный единичный разрыв с тенденцией к падению на юго-запад. На разрезе С и отчасти D картина гораздо более сложная. Отчетливо выделяется компактный кластер к западу от центральной части разрыва. На карте он выражен как небольшое сгущение эпицентров, на разрезе видна его практически вертикальная форма, напоминающая трубу или башню от 10 км по глубине до 1–2 км. А в окрестностях выхода разрыва на поверхность (перевернутые треугольники) выделяются два направления, две плоскости, причем одна падает на юго-запад, а другая – на северо-восток. Эта же тенденция сохраняется и на разрезе D. На разрезе E вновь можно выделить лишь одну плоскость, падающую на северо-восток. На разрезе F картина опять осложняется.

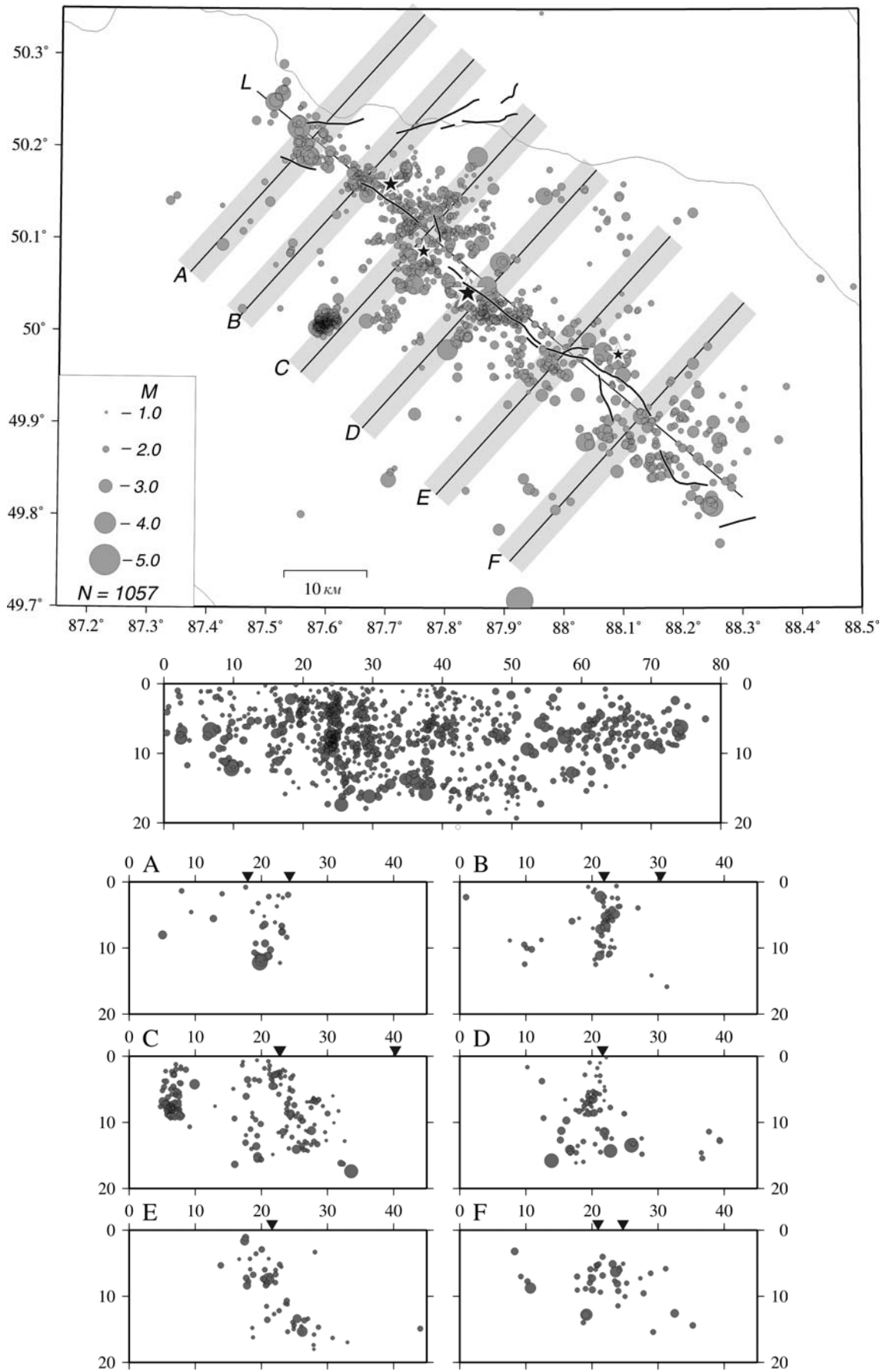


Рис. 3. Карта эпицентров афтершоков и вертикальные разрезы вдоль указанных линий для наиболее точно определенных гипоцентров (локальная сейсмическая томография)

Таким образом, в облаке афтершоков выделены отдельные кластеры. Вполне логично предполагать, что они связаны с различными осложнениями процесса в очаге землетрясения. В самом деле, редко наблюдается, чтобы вспарывание в очаге землетрясения, магнитуда которого по разным определениям равна 7.3–7.5, развивалось по единой плоскости разрыва. В процессе вспарывания могли действовать отдельные сегменты, которые при общем юго-восточном простирании имели различные направления падения, образуя при этом сложную поверхность.

Отметим, что анализируемые здесь наиболее точно определенные афтершоки произошли спустя почти год после главного события, и их непосредственная связь с плоскостью основного толчка, в принципе, может обсуждаться. Отдельную нерешенную задачу представляет вклад трех сильнейших афтершоков (табл. 1) на общую картину пространственного распределения относительно слабых афтершоков. Отдельный кластер, имеющий вид вертикально расположенного столба к юго-западу от основной полосы повторных толчков, вряд ли связан с одним из сильнейших афтершоков. Природа этого кластера остается неясной.

Выводы касаются трех аспектов:

– точная локация афтершоков методом локальной сейсмической томографии с двойными разностями показала, что их расположение в пространстве находится в хорошем соответствии с выходом разрыва в очаге землетрясения на дневную поверхность;

– по данным об афтершоках очаг Алтайского землетрясения имел следующие размеры: длина $l_{||} = 75$ км, максимальная ширина $l_{\perp} = 20$ км, вертикальный размер – 18 км;

– в облаке повторных толчков выделены кластеры, которые имеют различные направления плоскости падения. Кластеры интерпретируются как различные сегменты сложной поверхности разрыва в очаге Алтайского землетрясения.

Заметим также, что степень обеспеченности сейсмических наблюдений постоянно растет, особенно в высокоразвитых странах. В таких ситуациях роль полевых сейсмологических наблюдений невелика. Но это не относится к территории Российской Федерации, поскольку далеко не все сейсмически активные регионы обеспечены достаточным числом постоянных сейсмических станций и стандартная точность локации гипоцентров не превышает 15–20 км, и поэтому специальные эпицентральные наблюдения продолжают вносить существенный вклад в исследования структуры очаговых зон произошедших сильных землетрясений.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №№ 08-05-00598 и 07-05-00702.

Л и т е р а т у р а

1. **Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2003 год** / Отв. ред. О.Е. Старовойт. – Обнинск: ГС РАН, 2003–2004.
2. **Bulletin of the International Seismological Centre for 2003**. – Berkshire: ISC, 2005–2006.
3. **Комплект из 10 карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97**. Масштаб 1:8000000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах (Уломов В.И., Шумилина Л.С.). – М.: ОИФЗ, 1999. – 57 с.
4. **Арефьев С.С., Погребченко В.В., Аптекман Ж.Я., Быкова В.В., Матвеев И.В., Михин А.Г., Молотков С.Г., Плетнев К.Г.** Предварительные результаты сейсмологических наблюдений в эпицентральной зоне // Сильное землетрясение на Алтае 27 сентября 2003 г. Материалы предварительного изучения. – М.: ИФЗ РАН, 2004. – С. 61–67.
5. **Гольдин С.В., Селезнев В.С., Еманов А.Ф. и др.** Чуйское (Алтайское) землетрясение 2003 г.: материалы сейсмологического изучения // Сильное землетрясение на Алтае 27 сентября 2003 г. Материалы предварительного изучения. – М.: ИФЗ РАН, 2004. – С. 55–60.
6. **Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Мараханов А.В., Бурканов Е.Е., Платонова С.Г.** Тектоническая позиция и геологические проявления Алтайского землетрясения 2003 г. // Сильное землетрясение на Алтае 27 сентября 2003 г. Материалы предварительного изучения. – М.: ИФЗ РАН, 2004. – С. 25–38.
7. **Еманов А.А., Лескова Е.В.** Структурные особенности афтершокового процесса Чуйского (Горный Алтай) землетрясения // Геология и геофизика. – 2005. – 46. – № 10. – С. 1065–1072.
8. **Арефьев С.С., Аптекман Ж.Я., Быкова В.В., Погребченко В.В.** О геометрии очаговой зоны Алтайского (Чуйского) землетрясения 2003 г. Геолого-геофизические исследования в ИФЗ РАН в 2004–2005 гг. – М.: ИФЗ РАН, 2005. – № 2. – С. 16–26.

-
9. **Арефьев С.С., Аптекман Ж.Я., Быкова В.В., Матвеев И.В., Михин А.Г., Молотков С.Г., Плетнев К.Г., Погребченко В.В.** Очаг и афтершоки Алтайского (Чуйского) землетрясения 2003 года // Физика Земли. – 2006. – № 2. – С. 85–96.
 10. **Еманов А.А., Лескова Е.В.** Строение эпицентральной зоны Чуйского (Горный Алтай) землетрясения по данным метода сейсмической томографии с двойными разностями // Физическая мезомеханика. – 2006. – 9. – № 1. – С. 45–50.
 11. **Dorbath C., Van der Woert J., Arefiev S.S., Rogozhin E.A., Aptekman J.Y.** Geological and seismological field observation in the epicentral region of the 27 September 2003 *M_w* 7.2 Gorny Altay (Russia) // Bull. Seism. Soc. Am. – 2008. – 98. – № 6. – P. 2849–2865.
 12. **Еманов А.А., Лескова Е.В., Еманов А.Ф., Фатеев А.В.** Элементы структуры и фазы развития афтершокового процесса Чуйского землетрясения // Физическая мезомеханика. – 2009. – 12. – № 1. – С. 45–50.
 13. **Арефьев С.С.** Афтершоки, форшоки и рои землетрясений // Физика Земли. – 2002. – № 1. – С. 60–77.
 14. **Rogozhin E.A., Ovsyuchenko A.N., Marakhanov A.V., Ushanova E.A.** Tectonic setting and geological manifestations of the 2003 Altai earthquake // – Geotectonics. – 2007. – 41. – № 2. – P. 87–104.
 15. **Ulziibat M.** The 2003 Chuya sequence (North Altay range): tectonic context and seismological study (PhD thesis) // Nice: Université de Nice-Sophia Antipolis, 2006. – 172 p.
 16. **Арефьев С.С., Быкова В.В., Матвеев И.В., Матвеева Н.В., Михин А.Г., Плетнев К.Г.** Афтершоки Алтайского (Чуйского) землетрясения: высокая активность через два года после главного толчка // Исследования по сейсмотектонике и современной геодинамике. – М.: ИФЗ РАН, 2006. – С. 21–26.