

ЧУЙСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 27 сентября 2003 года

с $MS=7.3$, $K_p=17$ (Горный Алтай)

А.Ф. Еманов, А.А. Еманов, Е.В. Лескова, Ю.И. Колесников, А.В. Фатеев, А.Г. Филина

Алтае-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН, г. Новосибирск, emanov@gs.nsc.ru

27 сентября 2003 г. в 11^h33^m на территории Горного Алтая в долине р. Чуя в горной перемычке между Чуйской и Курайской впадинами произошло землетрясение с магнитудой $MS=7.3$ [1], $\varphi=50.06^\circ N$, $\lambda=87.97^\circ E$ [2]. За инструментальный период сейсмологических наблюдений это самое крупное землетрясение на территории Алтае-Саянской складчатой области. Данное событие у сейсмологов из Новосибирска получило название «Чуйское землетрясение» [3], а у специалистов из ИФЗ РАН, принимавших участие в обследовании эпицентральной зоны [4, 5], а также в ГС РАН [6] – «Алтайское землетрясение» (*ред.*). Чуйское землетрясение ощущалось на территории России, Казахстана, Китая и Монголии. На рис. 1 показана карта пунктов-баллов на территории России с добавлением данных по некоторым пунктам Казахстана. На рис. 2 дана карта изосейст с $I=7$, 6 и 5 баллов.

В табл. 1 содержатся данные о балльности в каждом из пунктов карты.

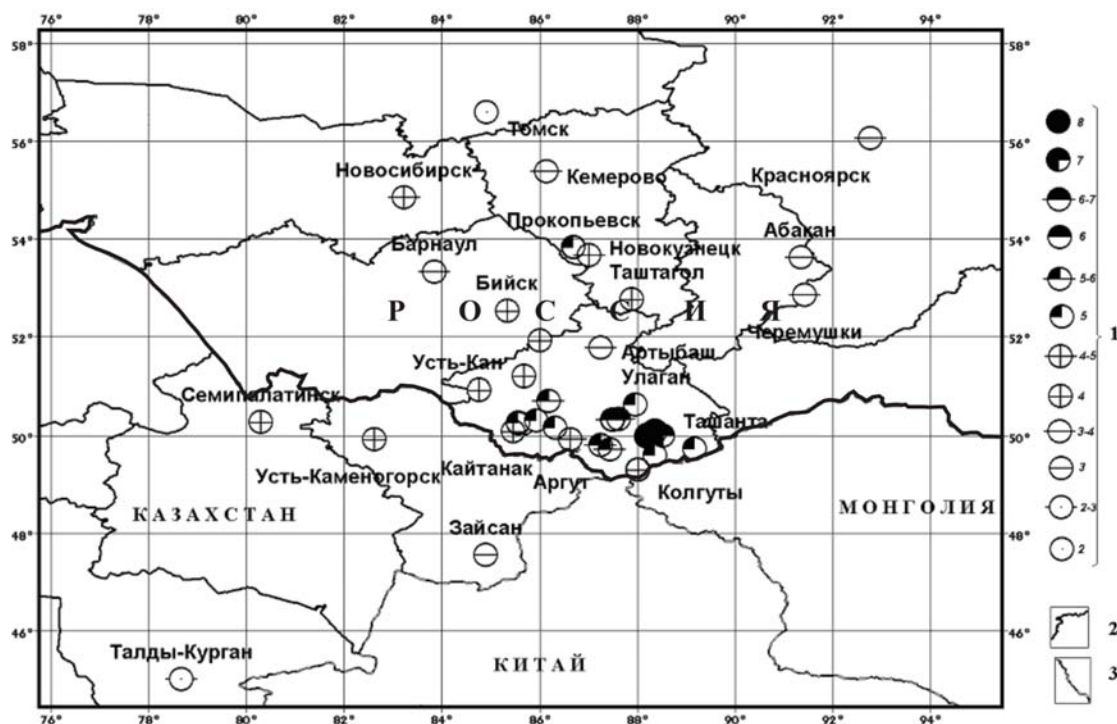


Рис. 1. Макросейсмические проявления Чуйского землетрясения 2003 г. с $MS=7.3$

1 – балльность, 2, 3 – административная и государственная граница соответственно.

Чуйское землетрясение произошло в центре локальной сети сейсмологических станций Алтайского сейсмологического полигона. Данная сеть станций была сформирована в 2002–2003 гг. [7]. Для эпицентральной зоны Чуйского землетрясения возможности сети полигона к осени 2003 г. описаны в обзорной статье [8] наст. сб. Представительная регистрация землетрясений в эпицентральной зоне начинается с $K_{\min}=5$, и точность δ определения координат в зоне эпицентра составляет $\delta=2$ км.



Рис. 2. Карта изосейст Чуйского землетрясения 2003 г. с $MS=7.3$

Обозначения см. на рис. 1.

Таблица 1. Макросейсмические данные о Чуйском землетрясении 27 сентября 2003 г. с $MS=7.3$

№	Пункт	Δ , км	№	Пункт	Δ , км
1	<u>8 баллов</u>	19	30	Новокузнецк	399
	Бельтир (Усть-Мана)		31	Новосибирск	617
2	<u>7 баллов</u>	26	<u>4 балла</u>		
	Чаган-Узун		32	Колгуты	104
	Кош-Агач		33	Тээли	179
4	Мухор-Тархата	36	34	Усть-Сема	206
			35	Усть-Кан	249
5	<u>6-7 баллов</u>	38	36	Таштагол	291
	Акташ		37	Шальмское	307
6	Чибит	45	39	Черемушки	379
			<u>6 баллов</u>	39	Усть-Каменогорск
7	Иштыкель	34	40	Барнаул	458
	Джзататор	66	41	Эрзин	503
9	<u>5-6 баллов</u>	55	42	Семипалатинск	556
	Усть-Улаган		43	Курчатов	671
10	Солонешенская	63	<u>3-4 балла</u>		
			44	Артыбаш	192
11	Аргут	70	45	Саяногорск	401
			46	Абакан	447
12	Ташанга	91	47	Арадан	460
			48	Кызыл	479
13	Онгудай	148	49	Кемерово	596
			<u>5 баллов</u>	<u>3 балла</u>	
14	Прокопьевск	420	50	Зайсан	369
			15	Тюнгур	125
16	Кызыл-Хая	130	51	Маканчи	581
			17	Чендек	154
18	Курата	169	52	Красноярск	659
			19	Усть-Кокса	172
20	Огневка	180	<u>2-3 балла</u>		
			21	Кайтанак	187
21	Ак-Довурак	202	53	Ужур	579
			54	Железногорск	789
22	<u>4-5 баллов</u>	170	55	Канск	842
	Мугур-Аксы		56	Талды-Курган	906
23	Большой Он	245	57	Алма-Ата	1128
			24	Горноалтайск	245
25	Хандагайты	287	58	Астана	1177
			<u>2 балла</u>	<u>2 балла</u>	
26	Бийск	327	59	Томск	747
			27	Джой	365
28	Верх-База	379	60	Омск	1125
			29	Верх-База	379
29	Верх-База	379	61	Нижевартовск	1360

В течение 2003 г. дважды разворачивались сети временных станций в Чуйско-Курайской зоне (подробную информацию о станциях временных сетей можно найти в [9]). Таким образом, точность определения координат гипоцентров перед землетрясением и сразу после него была выше, чем за 2003 г. в целом.

Алгоритмы обработки данных. При стандартной обработке землетрясений в региональном центре, ориентированной на разреженную сеть сейсмологических станций, рассчитываются только координаты эпицентра при фиксированной глубине 15 км. Решения делаются с использованием двухслойной скоростной модели с постоянными скоростями $v_p=6.1$ км/с, $v_s=3.5$ км/с в земной коре, и $v_{pn}=8.1$ км/с и $v_{sn}=4.6$ км/с – в мантии.

В данной работе представлены гипоцентральные решения, которые были сделаны программой HYPOINVERSE-2000 [10] с использованием скоростной модели, полученной по данным сейсмической томографии с большим числом землетрясений в период до Чуйского землетрясения и по редкой сети станций [11]. Стоит отметить, что геология Алтае-Саянского региона очень разнообразна, поэтому одномерная слоистая модель, использованная в расчете, подбиралась для района главного события и его афтершокового процесса. В табл. 2 показана скоростная модель для продольных волн. Для поперечных волн скоростная модель получена с использованием отношения $v_p/v_s=1.74$. Поскольку почти все станции установлены на выходах коренных пород, то в модели не принимается во внимание скорость в осадочном слое. Модель построена до границы Мохоровичича, а на границе (>55 км) указана скорость головной волны.

Таблица 2. Скоростная модель для продольных волн [11]

№ слоя	h , км	v_p , км/с	№ слоя	h , км	v_p , км/с
1	0–3	6.00	5	15–20	6.40
2	3–6	6.25	6	20–30	6.55
3	6–9	6.30	7	30–55	6.75
4	9–15	6.35	8	>55	8.10

Заметим, что и для P - и S -волн использованы только первые вступления. Интерпретация того, является ли волна прямой или рефрагированной (головной), полностью зависит от скоростной модели.

В алгоритме использованной программы HYPOINVERSE-2000 заложена «умная» система взвешивания, когда сначала вычисляется грубое приближение решения гипоцентра с использованием всех данных и фиксированной глубиной, затем оно начинает итеративно уточняться. При достижении точного решения эпицентра глубины освобождается и начинается ее определение. В процессе вычислений на заданной итерации включается фильтрация и взвешивание данных по двум параметрам – невязке и расстоянию. При взвешивании по невязке из расчетов удаляются наблюдения, на которых разность наблюденного и теоретического (вычисленного с помощью модели) времени пробега превышает некоторую величину, обычно 0.16 с, а остальным данным присваиваются веса в зависимости от невязки.

Такое взвешивание зачастую уточняет решение, отбрасывая некачественные данные, но при этом возможна ситуация, когда одно плохое наблюдение может стянуть решение к неверному результату, поэтому необходимо контролировать качество решения. При взвешивании по расстоянию на определенной итерации удаляются из вычислений наблюдения на станциях, находящихся дальше определенного расстояния от эпицентра, а остальные данные взвешиваются. В качестве отсекающего расстояния обычно использовалось 50 км, только в некоторых случаях увеличивая его, чтобы захватить большее число станций. Такое взвешивание гарантирует, что на последних итерациях при определении положения гипоцентра будут использоваться только близкие станции, при этом далекие станции не смогут внести ошибку, обусловленную в первую очередь несоответствием скоростной модели на больших расстояниях от таковой в эпицентральной зоне. В изучении структуры отдельных элементов афтершоковой области для уточнения взаимного расположения эпицентров использован метод двойных разностей [12], а для уточнения скоростной модели и совместного уточнения координат гипоцентров применялся метод сейсмической томографии с двойными разностями (DD-томографии) [13].

Главное событие и крупнейшие афтершоки представлены параметрами механизмов их очагов в табл. 3.

Таблица 3. Параметры гипоцентров и фокальных механизмов главного толчка Чуйского землетрясения и некоторых крупных афтершоков

Дата д м	t_0 , ч мин с	Эпицентр		h , км	K_p	Оси главных напряжений				Нодальные плоскости						
		φ°, N	λ°, E			T		P		$NP1$			$NP2$			
						PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	$SLIP$	STK	DP	$SLIP$	n
27 9	11 33 24	50.027	87.932	8.76	17.0	14	271	0	181	315	80	170	47	80	10	27
27 9	18 52 51	50.204	87.703	11.95	16.6	14	77	14	343	120	70	-180	30	90	-20	28
27 9	20 30 25	50.080	87.906	5.38	13.0	18	282	4	191	325	75	170	58	80	15	16
1 10	1 3 26	50.160	87.741	7.14	16.4	27	253	14	351	35	60	10	300	81	150	34
6 10	5 11 26	49.935	88.102	7.00	10.6	31	86	5	353	125	65	160	224	72	26	15
7 10	9 39 55	50.218	87.546	11.62	10.6	6	281	65	23	170	55	-120	35	45	-54	15
7 10	13 58 55	50.249	87.543	8.52	10.7	19	68	55	308	0	70	-60	121	36	-144	17
15 10	0 12 3	50.229	87.500	4.82	10.7	69	109	4	9	120	45	120	261	52	63	15
17 10	5 30 21	50.178	87.663	6.59	12.6	4	80	4	350	125	85	-180	35	90	-5	20
17 10	8 18 47	49.911	88.162	4.64	10.6	24	100	41	213	340	80	-130	238	41	-15	15
17 10	12 36 23	50.216	87.555	6.68	11.7	27	82	27	188	315	90	-140	225	50	0	17
22 10	14 59 11	49.851	88.201	9.80	8.6	37	43	46	184	295	85	-110	192	21	-14	12
22 10	21 12 54	50.098	87.780	14.82	8.2	18	222	30	121	170	85	-40	264	50	-173	16
23 10	0 25 46	49.814	88.271	3.43	13.5	1	117	38	26	65	65	-30	169	63	-152	19
23 10	3 54 26	50.243	87.539		11.1	14	281	0	191	325	80	170	57	80	10	19
17 11	1 35 47	50.232	87.762	19.74	13.9	33	257	33	143	20	90	50	290	40	180	24

Построение фокальных механизмов выполнялось пакетом программ FPFIT [14] по знакам первых вступлений. Для каждого расчета использовались данные от 15 до 34 станций Алтае-Саянской сети, а в некоторых случаях дополнительно через Интернет скачивались волновые формы станций IRIS и сейсмологических сетей Монголии и Казахстана. Более подробную информацию о переопределении координат и фокальных механизмов можно найти в [15, 16].

На сегодняшний день главному толчку Чуйского землетрясения посвящен целый ряд работ [3, 6, 15, 17]. В большинстве упомянутых работ не использованы данные близких к очагу станций Алтайского сейсмологического полигона. В данном разделе представлены материалы обработки наибольшего числа близких станций. Определение механизма очага главного толчка проводилось по 27 наблюдениям первых вступлений на различных станциях, ближайшая из которых находилась в 30 км от эпицентра. Три станции располагались в пределах 100 км от эпицентра. Погрешность положения плоскостей разлома составила 3° для углов падения и 5° для углов простираения. В табл. 4 приведены расчеты механизма главного толчка, полученные в разных центрах и различными методами [15].

Таблица 4. Расчеты механизма главного толчка, полученные различными методами в разных обрабатывающих центрах

Оси главных напряжений				Нодальные плоскости						Центр
T		P		$NP1$			$NP2$			
PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	$SLIP$	STK	DP	$SLIP$	
14	271	0	181	47	80	10	315	80	170	АСФ ГС СО РАН
13	275	10	8	52	74	2	321	88	164	ИОЦ ГС РАН
10	262	18	356	38	70	-5	130	85	-160	NEIC
32	92	11	355	227	76	32	129	59	164	HRVD

Примечание. АСФ ГС СО РАН – Алтае-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН; ИОЦ ГС РАН – Информационно-обрабатывающий центр Геофизической службы РАН; NEIC – Национальный центр информации о землетрясениях Геологической службы США; HRVD – Гарвардский центр (США).

Полученное в АСФ ГС СО РАН региональное решение лучшим образом согласуется с решением, полученным ИОЦ ГС РАН. При этом следует отметить, что региональное решение строилось большей частью по данным близких станций, тогда как все остальные были построены по данным удаленных телесейсмических станций. Различие между этими результатами превышает точность региональных измерений. Можно считать, что проведенное исследование уточняет данные, полученные в [6].

В табл. 3 представлены данные о наиболее крупных афтершоках, произошедших в 2003 г. Вне сомнения, два афтершока Чуйского землетрясения по своей энергии превосходят все остальные. Это афтершок 27 сентября в $18^{\text{h}}52^{\text{m}}$ с $K_p=16.6$, $M_S=6.3$ и афтершок 1 октября в $01^{\text{h}}03^{\text{m}}$ с $K_p=16.4$, $M_S=6.7$ [8]. Роль этих событий в развитии афтершокового процесса рассмотрена ниже.

Структура и фазы развития афтершокового процесса. Даже по предварительным данным станций Алтая было обнаружено существование двух фаз в развитии афтершокового процесса [3]. Облако афтершоков, изометричное по форме в начальной стадии, превратилось в линейно вытянутую зону афтершоков в последующем. Важным моментом, обнаруженным в развитии афтершокового процесса, является поэлементная структура области афтершоков [15, 16]. Более детально поэлементная структура изучалась в исследовании [18], результаты которого составляют основу данного раздела.

Известно, что в первые дни протекания афтершокового процесса произошло изменение его структуры, но в данной работе уточняется, когда точно это произошло, и выясняется, связано ли это с крупнейшими афтершоками. В исследовании поэлементного строения области афтершоков представляет интерес вопрос: сохраняется ли структура во времени и связаны ли элементы структуры с крупнейшими событиями данной активизации?

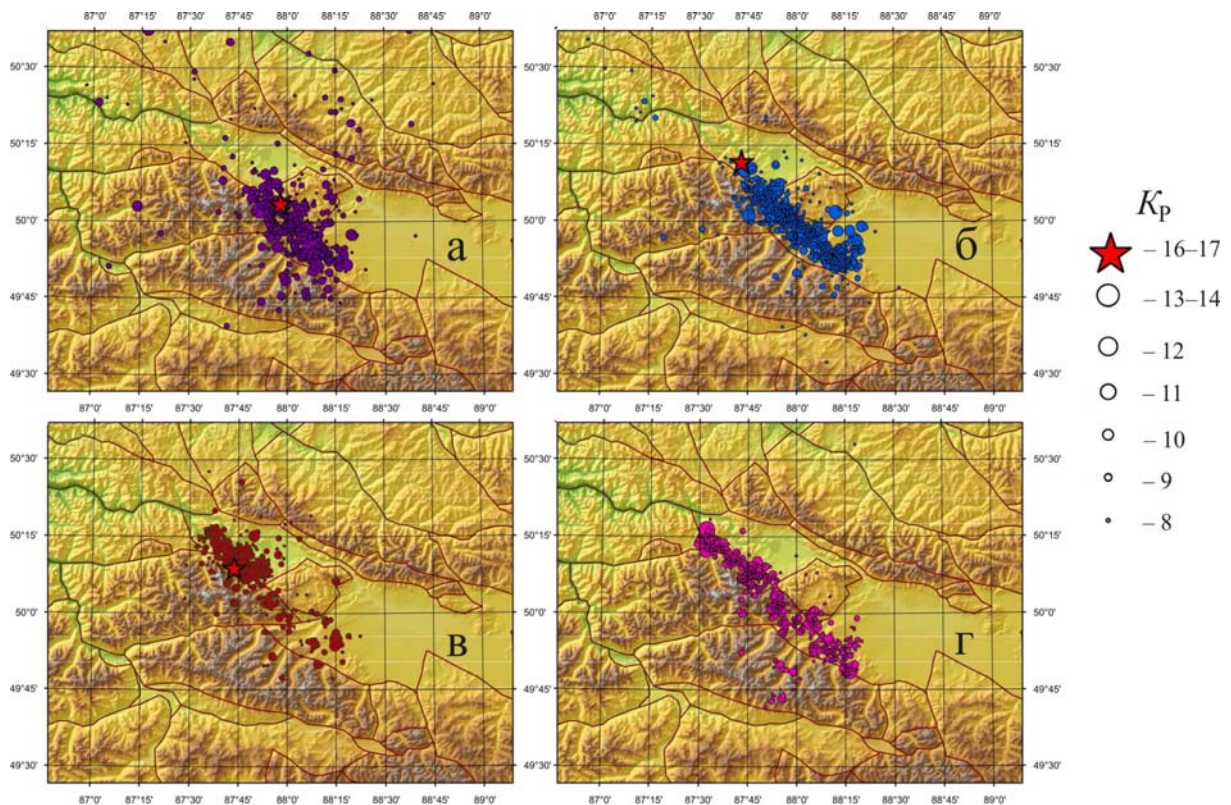


Рис. 3. Карты афтершоков с $K_p > 7.5$ Чуйского землетрясения в разные периоды: после главного толчка 27 сентября в $11^{\text{h}}33^{\text{m}}$ с $M_S=7.3$ до первого крупного ($M_S=6.6$) афтершока 27 сентября в $18^{\text{h}}52^{\text{m}}$ (а); после него и до второго крупного ($M_S=6.9$) афтершока 1 октября в $01^{\text{h}}03^{\text{m}}$ (б); с 1 октября в $01^{\text{h}}04^{\text{m}}$ по 3 октября (в); с 4 по 31 октября (г).

На рис. 3 представлены карты афтершоков, характеризующие развитие афтершокового процесса во времени. На картах для разных временных интервалов нанесены все землетрясения с $K_p > 7.5$. Координаты гипоцентров рассчитаны с учетом слоистой скоростной модели среды.

На карте 3 а представлены главное событие (звездочка) и афтершоки до первого из двух крупнейших афтершоков. На карте 3 б звездочкой показан первый крупный афтершок и события после него до второго крупного афтершока. Карта 3 в представляет второй крупный афтершок и события в течение трех дней после него. На карту 3 г нанесены эпицентры событий за последующий месяц. Карта 3 а показывает, что возникший афтершоковый процесс преимущественно протекает на границе Чаган-Узунского блока с Северо-Чуйским хребтом. Афтершоковое облако достаточно широкое и ветвями входит в северо-западный угол Чуйской впадины. Землетрясения небольших энергий имеются по всему Чаган-Узунскому блоку. Небольшое число землетрясений происходит в Курайском хребте и даже севернее его. Курайская впадина лишь чуть затронута процессом и выглядит как блок, ограничивающий афтершоковый процесс. Первый крупный афтершок происходит посередине границы Курайской впадины с Северо-Чуйским хребтом, т.е. на участке, прежде свободном от афтершоков. Облако событий после этого афтершока стало более узким и вытянутым, но северо-западным окончанием афтершоковой области стал сам наиболее сильный афтершок. Землетрясения вытянулись от него в юго-восточном направлении. Второй крупный афтершок, представленный на карте 3 в, происходит вблизи первого, чуть южнее. Три дня после него наиболее активна вся граница Курайской впадины с Северо-Чуйским хребтом. Произошло удлинение афтершоковой области. За последующий месяц сформировалась вытянутая и узкая афтершоковая область, именно в таком виде она видна в последующие годы.

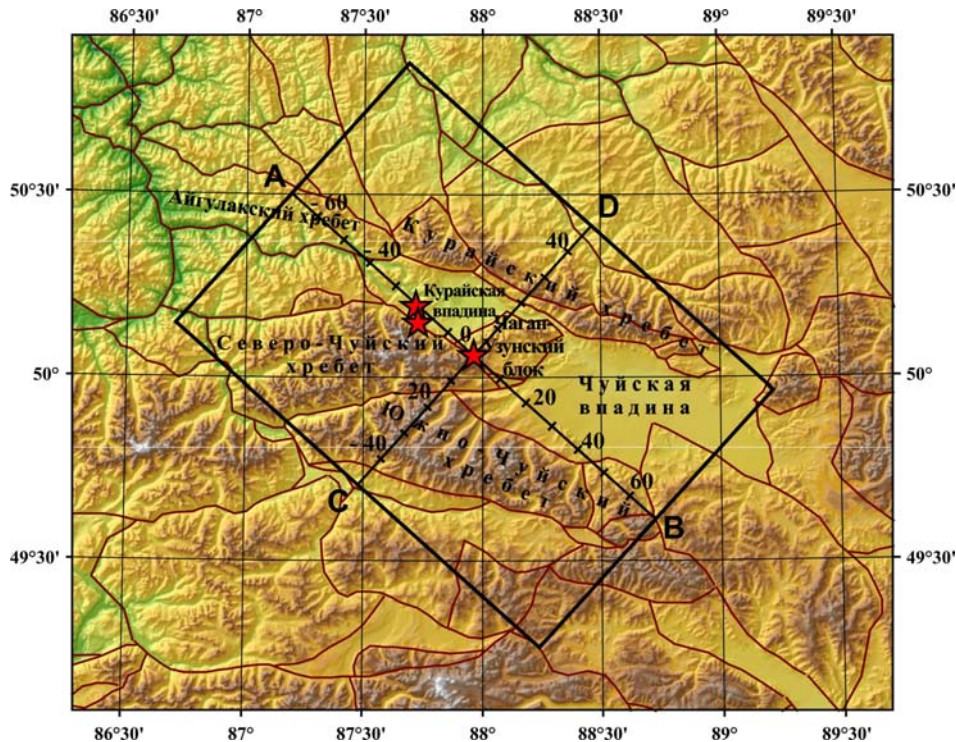


Рис. 4. Область и линии сноса для пространственно-временного анализа афтершокового процесса и крупнейшие ($M > 6$) события активизации

Набор карт на рис. 3 демонстрирует эволюционные изменения афтершокового процесса. В этом случае теряется разрешение в изучении эволюции во времени. Чтобы восполнить этот недостаток, можно исключить одно из пространственных измерений и добавить время. На рис. 4 изображен прямоугольник, в площади которого все землетрясения будут проецироваться на два перпендикулярных вертикальных разреза, пересекающихся в эпицентре Чуйского землетрясения, с последующей разверткой во времени. Таким образом можно рассмотреть развитие во времени афтершокового процесса вдоль и поперек линейной зоны активизации (рис. 5). Главное событие вызвало афтершоковый процесс по направлению вдоль длинной оси в зоне длиной около 50 км, а с учетом малоинтенсивного процесса – около 90 км, такие же примерно размеры были и по ширине активизированной области, но длина афтершоковой зоны быстро сошлась к

50 км, а ширина наиболее интенсивной части составила 10 км. Афтершок 27 сентября с $MS=6.6$ фактически не меняет параметров афтершокового процесса. Ширина области афтершоков остается прежней, а увеличение длины области, вызванное афтершоками, почти синхронными с этим толчком, через несколько часов исчезло. Из рис. 3 б видно, что после этого афтершока в районе его эпицентра событий практически не происходит. Данное событие не внесло значимых изменений в протекание афтершокового процесса.

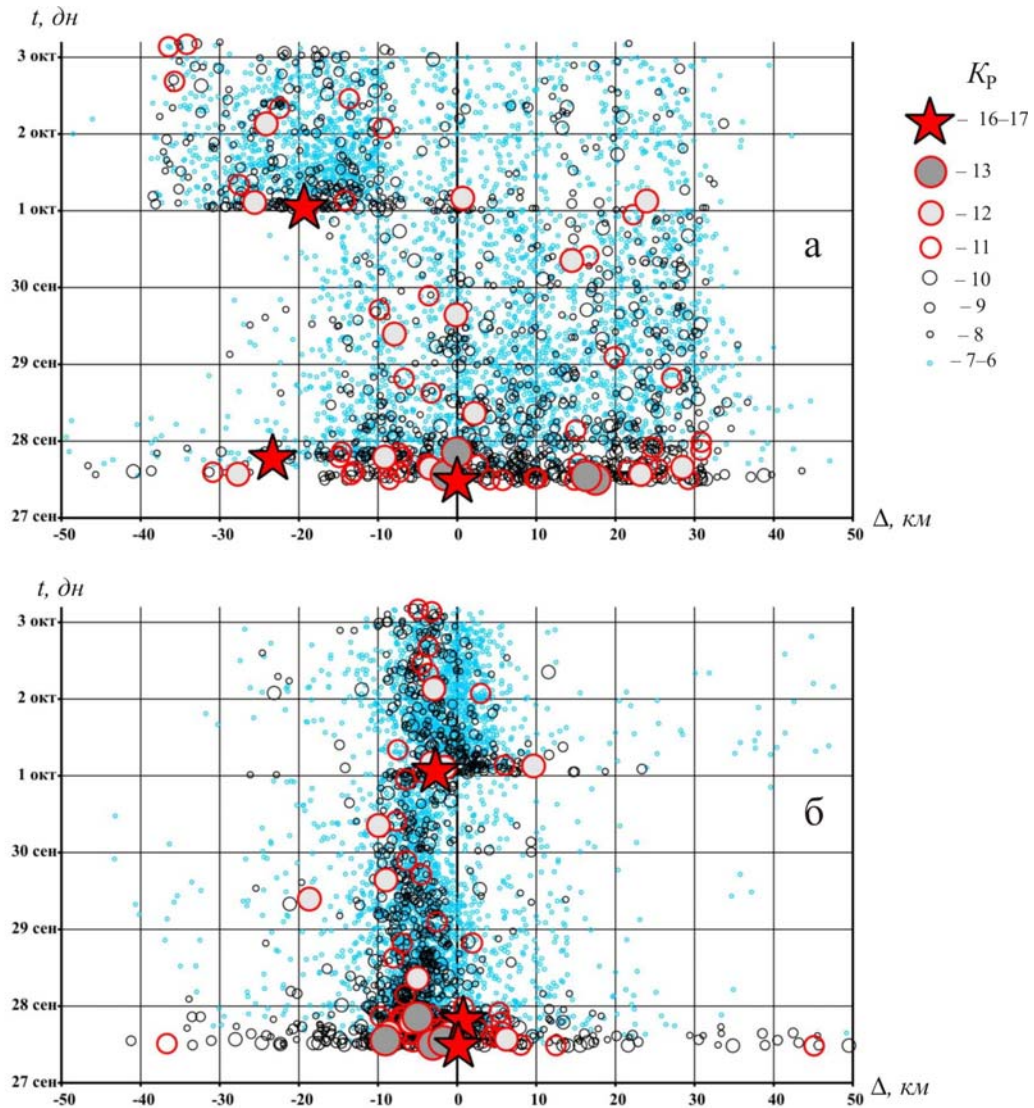


Рис. 5. Пространственно-временной анализ афтершоков с $K_p > 6$ за период с 27 сентября по 3 октября 2003 г. вдоль (а) и поперек (б) активизации

Второй крупный афтершок оказал огромное влияние на весь процесс. На рис. 5 а видно, что процесс сместился к северо-западу. Вдоль границы Курайской впадины и Северо-Чуйского хребта длина зоны интенсивного афтершокового процесса составила 30 км. Интенсивность афтершокового процесса в остальной области снизилась. Из рис. 5 б следует, что рассматриваемое событие вызвало активизацию, быстро распространившуюся в глубь Курайской впадины и стянувшуюся в полосу, несколько смещенную к впадине от прежнего процесса.

Афтершок 1 октября в значительной степени изменил протекание афтершокового процесса и с него начинается развитие второй фазы, когда наблюдается активизация в пределах линейно вытянутой узкой области афтершоков.

Уже в предыдущих работах [12, 19] было доказано, что афтершоковый процесс во второй фазе своего развития не является простой линейной зоной. Были выявлены элементы структуры афтершоковой области.

Для изучения поэлементной структуры афтершоковой зоны и определения степени ее устойчивости во времени использован набор высокоточных данных за отдельные ограниченные периоды наблюдений. Эти данные получены в экспериментах с локальными временными сетями [9], которые проводились ежегодно после Чуйского землетрясения в его эпицентральной зоне. Фактически анализируются данные за период 2003–2007 гг. с перерывами. На рис. 6 представлена карта эпицентров анализируемых событий. Черные линии, перпендикулярные активизации, являются границами ранее выделенных элементов афтершокового процесса. Даже на карте можно видеть, что поэлементное деление афтершоковой области устойчиво сохраняется во времени. Еще лучше это представлено на вертикальном разрезе по линии А-В.

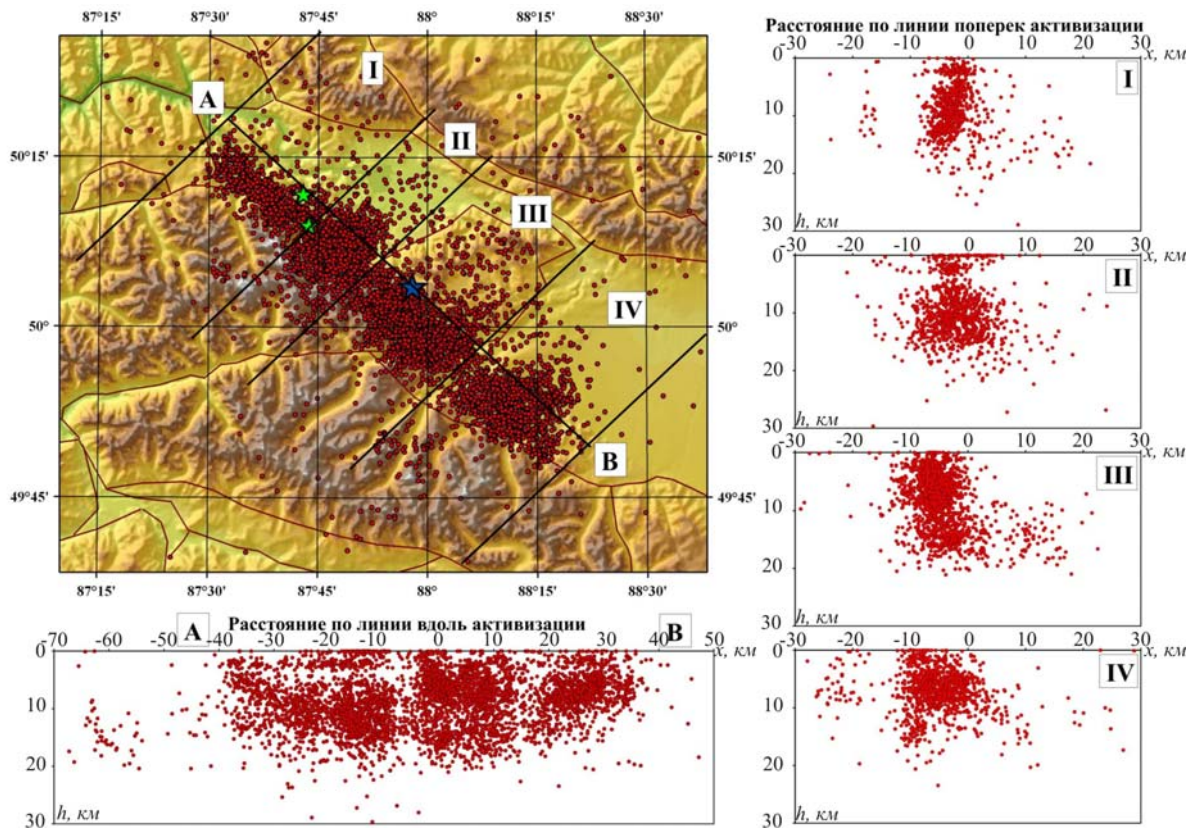


Рис. 6. Трехмерная структура афтершокового процесса

Сейсмический процесс на границе Чаган-Узунского блока с Северо-Чуйским хребтом образует самостоятельный элемент III, отделенный от соседних областей вертикальными зонами с пониженным числом афтершоков. Землетрясения в этом элементе распределены в интервале глубин $h=0-20$ км. Наибольшее число афтершоков происходит в интервале глубин 4–10 км. Разрез вкрест данного элемента показывает, что область афтершоков шириной 10 км слегка наклонена в сторону Чаган-Узунского блока, а на глубинах 10–20 км более редкое облако афтершоков в виде горизонтального сейсмоактивного слоя заходит под этот блок на всю его площадь. Чуйской впадине соответствует элемент IV. Он отделен вертикальной зоной затишья от сейсмического процесса в Чаган-Узунском блоке. Наблюдается постепенное выклинивание к дневной поверхности сейсмоактивного слоя с удалением от эпицентра Чуйского землетрясения. Обнаруживается двухъярусное по глубине строение сейсмоактивного слоя в этом элементе. Первый ярус составляют землетрясения на глубинах до 2 км. После понижения плотности гипоцентров при $h=1-2$ км начинается основная область активизации. В плане данный элемент похож на треугольник, одна из вершин которого примыкает к соседнему элементу афтершокового процесса. В поперечном разрезе IV данный элемент имеет сложный вид. Такой вид активизированной области, охватывающий северо-западный угол Чуйской впадины, по-видимому, связан со сложным процессом деструкции без того приподнятого блока впадины. Здесь нет единого разлома, а процесс заканчивается ветвлением и выходом на поверхность.

Элемент II от угла Чаган-Узунского блока до долины р. Актру является самым коротким элементом афтершокового процесса. Он отделен вертикальной зоной затишья от Чаган-Узунского блока и имеет также двухъярусное строение. Верхний ярус составляют землетрясения на глубинах до $h=2$ км. На глубинах 2–5 км обнаруживается слой пониженной сейсмической активности. Он хорошо виден и в поперечном разрезе II. Основная сейсмоактивная область данного элемента не достигает глубин $h=20$ км. В поперечном разрезе видна сейсмоактивная область, расширяющаяся с глубиной.

Элемент I – северо-западное окончание афтершоковой области, на котором видно такое же двухъярусное строение сейсмоактивной области. Кроме того, виден сейсмоактивный слой, плавно выклинивающийся к окончанию афтершоковой области. В поперечном сечении можно отметить уверенный наклон активизированной области под Северо-Чуйский хребет. Некоторые другие особенности структуры этого элемента можно найти в [12, 15].

Развитие афтершокового процесса во времени демонстрирует рис. 7. Здесь использованы данные локальных экспериментов с детальными сетями, проведенных в разное время. На рис. 7 а представлен разрез вдоль линии А-В рис. 6 для первой фазы афтершокового процесса. На разрезе присутствуют события с энергетическим классом $K_p > 7.5$. Видно, что первый крупный афтершок не вызвал значимой активизации вокруг себя. Начало второй фазы активизации представлено на рис. 7 б. Второй крупный афтершок активизировал северо-западный элемент афтершокового процесса. Сформировалась наклонная, выклинивающаяся к поверхности, область афтершоков. Активен приповерхностный слой. На рис. 7 в видна умеренная активность всех элементов в последующие годы (2004–2006 гг.). На рис. 7 г показано, что в 2007 г. наибольшая сейсмическая активность присутствует в III и IV элементах. Поэлементная структура афтершокового процесса устойчиво сохраняется во времени. Интересным является факт появления группы землетрясений на рис. 7 г слева на глубинах $h=10-20$ км. Эта группа событий относится к Айгулакскому хребту. Чуйское землетрясение вызвало описываемый афтершоковый процесс, и в этот момент прежде сейсмически активные до землетрясения Курайский и Айгулакский хребты оказались практически асейсмичными. В 2007 г. наблюдается как бы удлинение афтершоковой области и возобновление активности одной из сейсмоактивных структур на Айгулакском хребте.

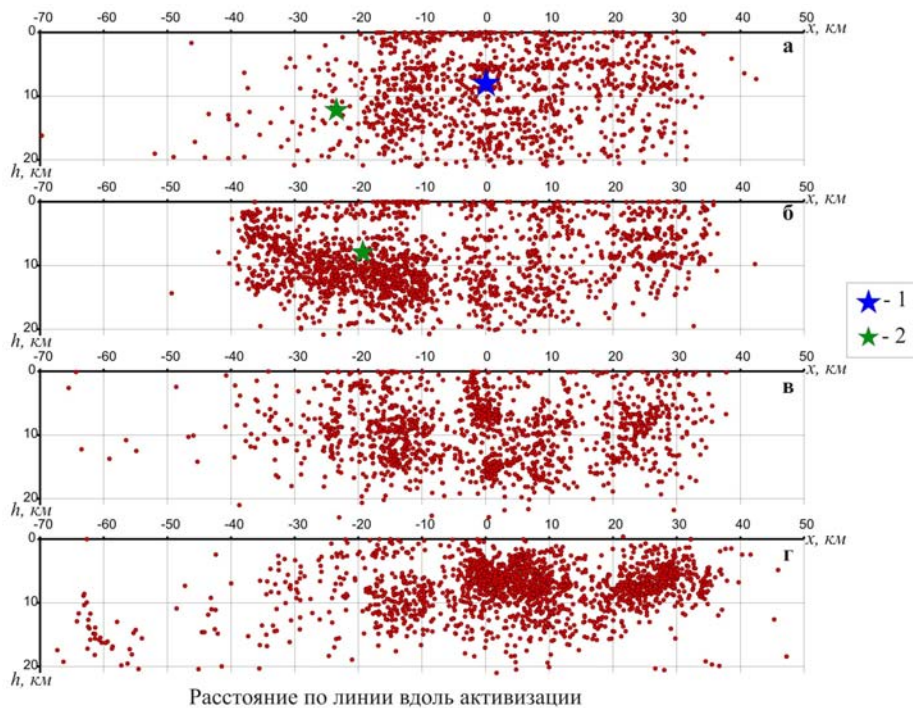


Рис. 7. Развитие афтершокового процесса во времени: события первой фазы развития афтершокового процесса с 27 сентября по 1 октября 2003 г. (а); после афтершока 1 октября в 01^h03^m до конца 2003 г. (б); наблюдения временных сетей за 2004–2006 гг. с выборочной обработкой для 2004–2005 гг. и полной – для 2006 г. (в); наблюдения временной сети в 2007 г. с полной обработкой данных (г)

Механизмы очагов получены для событий разных энергий. Попытаемся для зоны Чуйского землетрясения детально определить локальные характеристики напряженного состояния зоны афтершоков посредством общего анализа механизмов наиболее сильных ($K_p > 10.5$) из них. Детальный анализ строится на основе фокальных механизмов 183 событий афтершоковой серии с $K_p = 4-17$.

Для расчетов механизмов очагов афтершоков использовались гипоцентральные решения, а также азимуты и углы выхода луча из очага для каждого наблюдения, рассчитанные в рамках слоистой скоростной модели. Для каждого события в расчетах участвовало от 8 до 34 наблюдений полярности первых вступлений на станциях Алтае-Саянской региональной сейсмической сети, Алтайского сейсмологического полигона, временных сейсмологических сетей в зоне Чуйского землетрясения. В некоторых случаях дополнительно использовались волновые формы Байкальской региональной сейсмологической сети, сейсмологической сети Казахстана, станций сети IRIS и сейсмологической сети Монголии.

Для анализа отбирались только те события, для которых имеется однозначное решение плоскости разрыва. Погрешность δ в определении координат землетрясений составила $\delta = 0.2-2$ км (в среднем $\delta_{cp} = 0.7$ км), глубины – в среднем порядка $\delta h = 2.5$ км. Среднеквадратическая невязка *RMS* по времени (невязка между наблюдаемыми временами пробега на станциях и временами в рамках выбранной модели) варьирует в пределах от 0.02 до 0.2 с (среднее значение – около 0.1 с). Максимальный разброс в определении положения нодальных плоскостей для отдельных событий составил по азимуту простирания, углу падения и углу подвижки, соответственно, 20°, 30° и 30° (средние значения этих параметров для всех событий – 7°, 11° и 11°).

Таким образом, был получен каталог фокальных механизмов для зоны активизации Чуйского землетрясения, который, помимо гипоцентральных решений, включает в себя параметры, характеризующие положение нодальных плоскостей и главных осей напряжений.

Особенностью данного каталога является то, что фокальные механизмы рассчитаны в основном для афтершоков, зарегистрированных во время полевых экспериментов с временными станциями в зоне Чуйского землетрясения. Поэтому механизмы очагов получены для разных конфигураций сетей станций, в отдельные временные периоды и, что самое важное, для землетрясений разных энергий. Полученный каталог механизмов очагов включает в себя параметры фокальных механизмов как крупных событий, так и землетрясений малых энергий, начиная с $K_p = 4$.

Рассмотрим пространственное распределение механизмов очагов крупных афтершоков. На карту с рельефом, разломами (по И.С. Новикову) и положением событий вынесены фокальные механизмы, построенные для отдельных крупных ($K_p \geq 10.5$) землетрясений (рис. 8). Эпицентры афтершоков рассчитаны с использованием метода сейсмической томографии с двойными разностями [8, 12, 14]. События, для которых построены механизмы очагов, выделены белыми кружками.

Основным типом подвижки в очагах афтершоков Чуйского землетрясения, учитывая нанесенные разломы, является правый сдвиг. Изменение вида фокальных механизмов наблюдается на концах разломной зоны. Особенно они разнообразны на ее юго-восточном окончании. Также обращает на себя внимание событие с $K_p = 13.2$, расположенное в районе долины Тюте, в зоне взаимодействия Чаган-Узунского блока с Курайской впадиной, в очаге которого подвижка типа взброс.

Для удобства восприятия и анализа разделим все афтершоки по типу подвижки в их очагах в зависимости от значения углов погружения главных осей напряжения на сдвиги, взбросы и сбросы, минуя промежуточные типы (табл. 5).

Таблица 5. Идентификация механизмов очагов землетрясений по углам погружения главных осей напряжения.

Углы погружения	Сдвиги	Взбросы	Сбросы
Ось сжатия	$< 45^\circ$	$\leq 45^\circ$	$\geq 45^\circ$
Ось растяжения	$< 45^\circ$	$\geq 45^\circ$	$\geq 45^\circ$

Полученные в результате такой классификации типы подвижек в очагах афтершоков Чуйского землетрясения следующие: наиболее часты (52%) сдвиги, меньше всего сбросов (13%),

оставшиеся 35 % приходятся на взбросы. Таким образом, напряженное состояние зоны афтершоков можно обозначить как взбросо-сдвиговое с преобладанием механизмов очагов типа сдвиг.

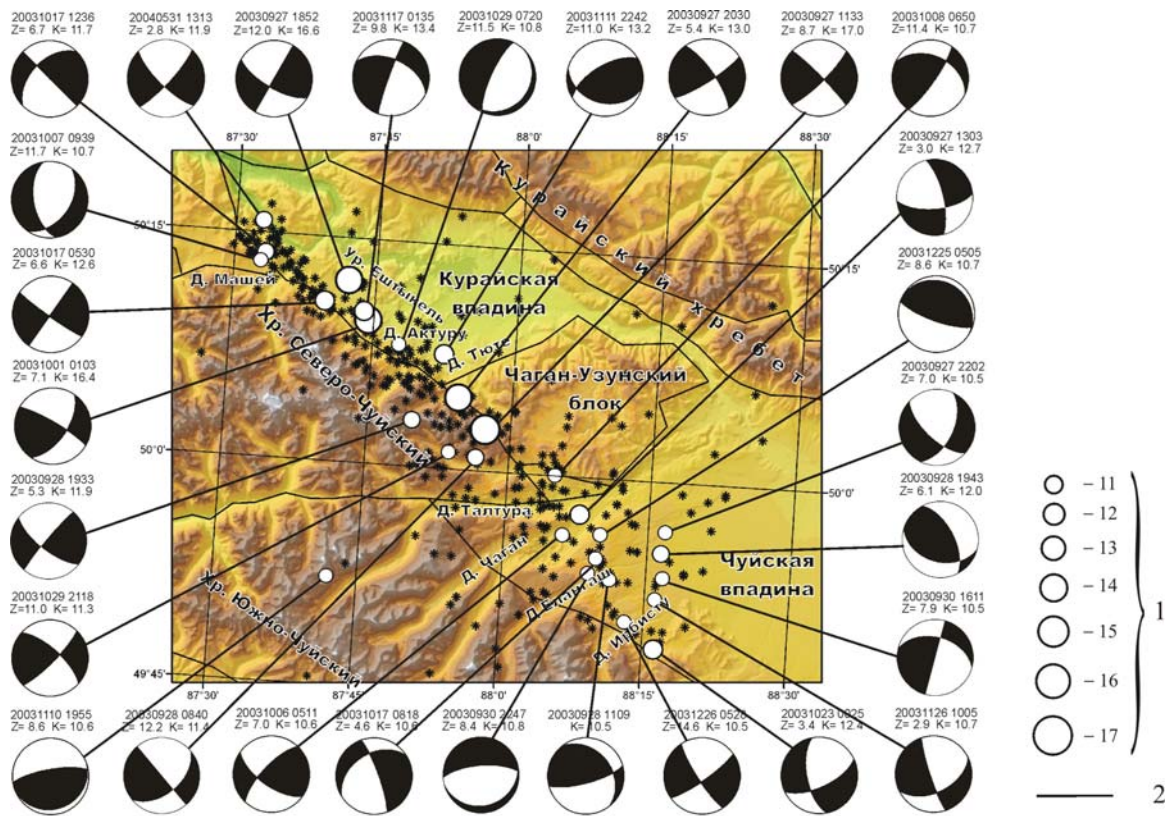


Рис. 8. Фокальные механизмы некоторых крупных ($K_p \geq 10.5$) афтершоков Чуйского землетрясения 2003 г. с $M_S=7.3$

1 – энергетический класс K_p ; 2 – разлом.

Рассмотрим пространственное распределение событий по типам фокальных механизмов отдельно. Для этого на карту с рельефом и разломами нанесены землетрясения в зависимости от вида механизма очага согласно предложенному разделению (рис. 9).

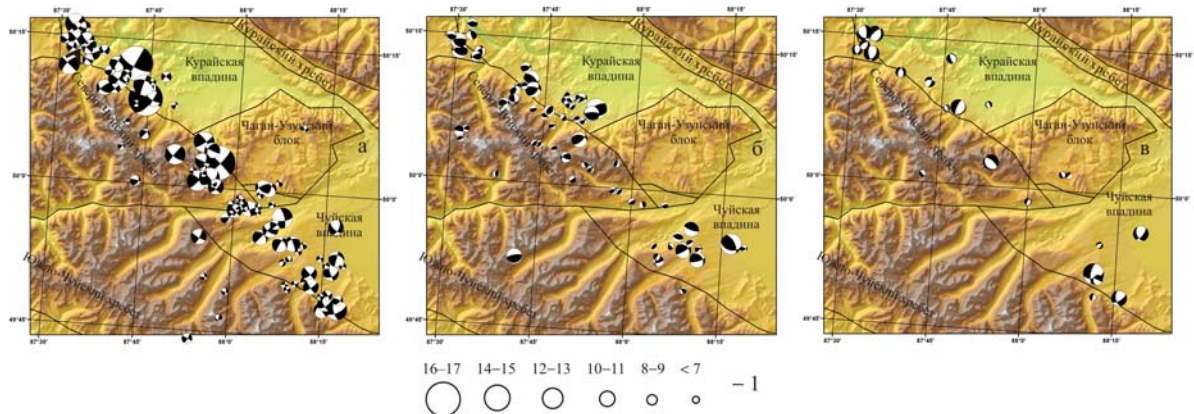


Рис. 9. Пространственное распределение афтершоков по типам подвижек: сдвиги (а), взбросы (б), сбросы (в)

1 – энергетический класс K_p .

Сдвиги, как уже было отмечено по фокальным механизмам крупных афтершоков, характерны для всей зоны активизации, за исключением области сочленения Чаган-Узунского блока

с Курайской впадиной (рис. 9 а). На этом участке активизации в основном наблюдаются механизмы взбросового типа.

Интересно распределение взбросов (рис. 9 б) и сбросов (рис. 9 в) вдоль области активизации. Взбросовые и сбросовые фокальные механизмы определены для землетрясений, происшедших на концах активизированного участка, и связаны, по всей вероятности, со структурами оперения, характерными для окончаний сдвиговых зон. Обращает на себя внимание линия взбросов в урочище Ештыкель (рис. 8–9), расположенная ортогонально к линии распространения афтершоков. Учитывая простираание плоскости сместителя, также ортогональное основному разлому, такое положение событий взбросового типа можно связать с окончанием одной из структур, выделенной по данным переопределения гипоцентров афтершоков методом сейсмической томографии с двойными разностями [12].

Отмечается серия мелких событий взбросового типа непосредственно под Северо-Чуйским хребтом. Можно предположить, что в условиях сжатия горные хребты, являясь менее консолидированными, чем впадины, испытывают поднятие, которое и отражается в механизмах очагов землетрясений малых энергий.

Анализ диаграмм распределения параметров главных осей напряжения (рис. 10) позволил выявить тенденцию в направлениях осей сжатия P и растяжения T . Основное направление для осей сжатия зоны активизации почти строго в направлении север–юг с небольшим преобладанием север–северо-западной ориентации. Для растяжения, соответственно, основное направление с востока на запад с наибольшим числом событий на направлении 280° .

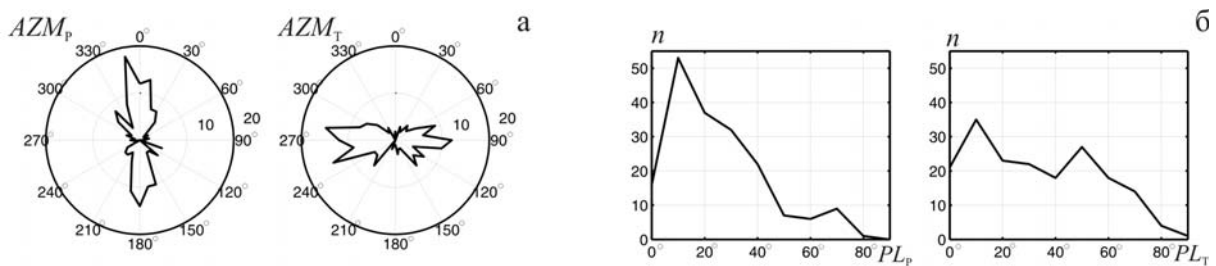


Рис. 10. Распределение азимутов (а) и углов погружения (б) главных осей напряжения – сжатия P и растяжения T

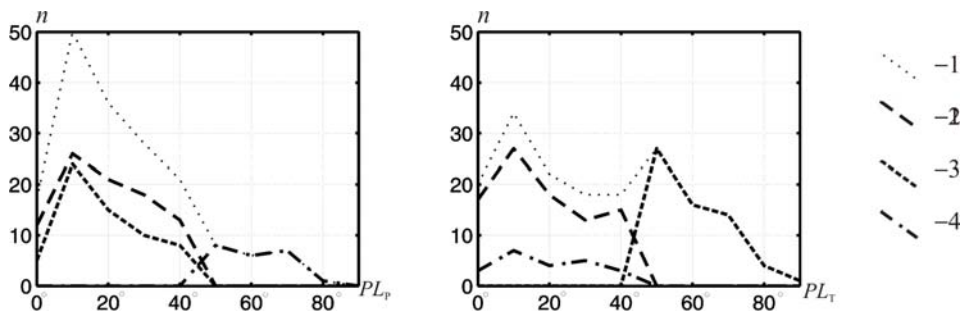


Рис. 11. Распределение углов погружения (PL) главных осей напряжения P и T в зависимости от типа подвижки в очаге

1 – все события; 2–4 – сдвиги, взбросы и сбросы соответственно.

Для углов погружения (рис. 11) максимальное число событий приходится на 10° для оси сжатия (ось близгоризонтальная), для оси растяжения отмечается два максимума: на 10° (близгоризонтальная ось) и 50° (в таком случае одна из нодальных плоскостей близгоризонтальна, другая – близвертикальна). На рис. 11 показано распределение углов погружения главных осей напряжения в зависимости от типа механизма очага. Таким образом, для оси сжатия максимум $DP_{\max}(P)=10^\circ$ соответствует максимумам для сдвигов и взбросов. Причем для сдвигов также отмечается большое число событий с $DP=20-30^\circ$. Для оси растяжения основной максимум на $DP_{\max}(T)=10^\circ$ составляют события сдвигового типа, на 50° – надвиги. Афтершоки с подвижками типа сброс ввиду малого их числа вид графиков практически не изменяют.

В качестве основных результатов данной работы по исследованию фокальных механизмов афтершоков Чуйского землетрясения можно выделить следующие.

- Наиболее характерный тип подвижки в очагах афтершоков Чуйского землетрясения является сдвиг с некоторой вертикальной составляющей. Учитывая тектоническую обстановку района, это правый сдвиг. Правый сдвиг характерен для большинства сильных и слабых афтершоков.

- Подвижки типа взброс и сброс наблюдаются на окончаниях зоны активизации. Об этом свидетельствует пространственное расположение событий, для которых определены фокальные механизмы этих типов.

- Для афтершоков в области взаимодействия Чаган-Узунского блока с Курайской впадиной со стороны Северо-Чуйского хребта характерна подвижка типа взброс.

- Анализ диаграмм распределения азимутов осей сжатия и растяжения позволил выявить определенную тенденцию в направлениях главных осей напряжения: основное направление осей сжатия P для зоны активизации почти строго с севера на юг, осей растяжения T с востока на запад.

- Анализ значений углов PL погружения главных осей напряжения показал: оси сжатия P для большей части афтершоков близгоризонтальны (максимум приходится на $PL_{\max}(P)=10^\circ$); для оси растяжения $PL_{\max}(T)$ проявились два максимума – на 10° и 50° .

Томографическое исследование очаговой зоны. Афтершоковый процесс Чуйского землетрясения, регистрируемый плотной сетью станций Алтайского сейсмологического полигона и временными сетями эпицентральных наблюдений, дает надежные данные для исследования глубинного строения Чуйско-Курайской зоны.

Для уточнения положения гипоцентров землетрясений использованы два подхода. В первую очередь введена в расчеты уточненная многослойная скоростная модель земной коры. Это позволило получить более точные абсолютные значения координат землетрясений. Затем был использован метод двойных разностей, который не очень чувствителен к параметрам модели и дает достаточно точное определение положения гипоцентров относительно друг друга. В настоящей работе использован метод сейсмической томографии с двойными разностями, так называемая DD-томография [20]. Эта методика обработки объединяет возможности метода двойных разностей [13] и сейсмической томографии.

В качестве референтной модели для томографических построений использовалась горизонтально слоистая модель (табл. 2). При вычислениях была развернута система координат на 45.5° против часовой стрелки относительно направления на север, как показано на рис. 12. Таким образом, активизированная область стала располагаться вдоль оси Y . Черными точками обозначены узлы модели, для которых вычислялись скорости волн, скорость между узлами рассчитывалась с помощью трилинейной интерполяции. Вдоль линии активизации было увеличено число узлов для того, чтобы более детально описать моделью хорошо обеспеченную данными активную зону.

На рис. 12 показана скоростная модель для слоя на глубине $h=3-6$ км. Более высокими скоростями выделяются северо-западная часть Курайской впадины, которая также выделяется в рельефе – приподнята относительно юго-восточной части, и север Чаган-Узунского блока. Интересно, что со стороны южного борта Курайской впадины, как раз вдоль зоны активизации и Северо-Чуйского хребта, проходит область пониженных скоростей, которая может свидетельствовать о более низких скоростях в разломной зоне.

Следующим шагом добавили к афтершокам Чуйского землетрясения события, которые наблюдались в 2002–2003 гг. до землетрясения. Всего было взято 799 событий. За счет того, что фоновая сейсмичность до Чуйского землетрясения и область распространения афтершоков пространственно не совпадают, увеличилась область томографических построений. Полученные результаты представлены на рис. 13 а–в в виде горизонтальных разрезов для глубин $h=3-6$, $6-9$ и $15-20$ км. На этих рисунках система координат повернута против часовой стрелки на 45.5° таким образом, что ось ординат располагается вдоль зоны активизации.

На рис. 13 а видно, что сохраняются повышенные значения скоростей продольных волн в районе Чаган-Узунского блока и северо-восточной части Курайской впадины, отмеченные ранее при томографических построениях только по афтершокам Чуйского землетрясения (см. рис. 12). Эти аномалии также видны на глубинах $h=6-9$ км (рис. 13 б), но исчезают на глубинах $15-20$ км (рис. 13 в). При этом на всех глубинах отмечается, что зона активизации связана с контрастами высоких и низких скоростей распространения продольных волн в среде.

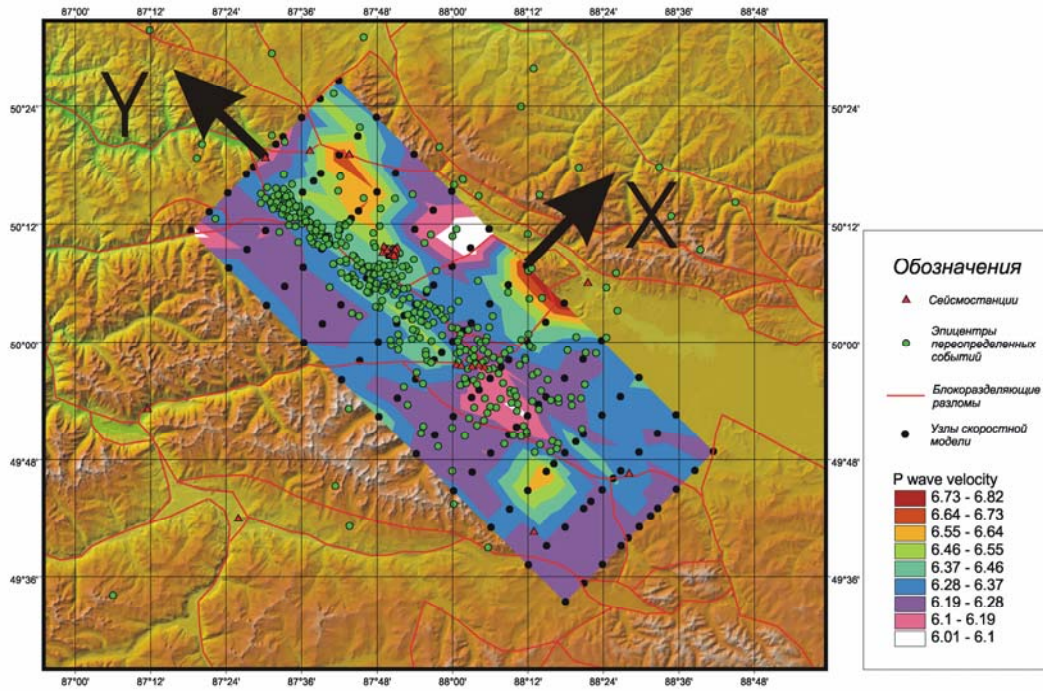


Рис. 12. DD-томография: использованное разбиение, уточненные координаты эпицентров и полученная скоростная модель в слое с $h=3-6$ км

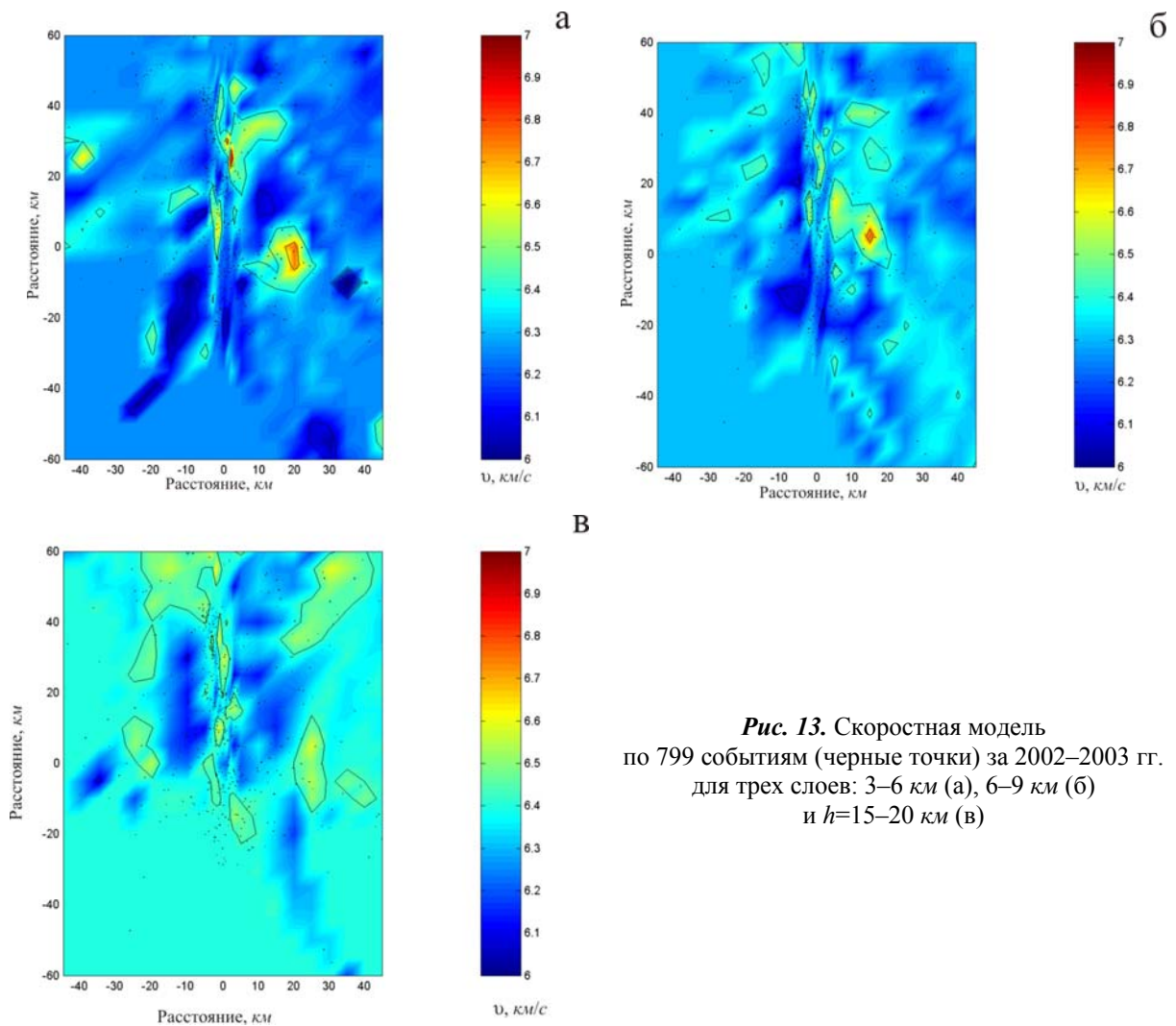


Рис. 13. Скоростная модель по 799 событиям (черные точки) за 2002–2003 гг. для трех слоев: 3–6 км (а), 6–9 км (б) и $h=15-20$ км (в)

В данной работе были рассмотрены томографические модели афтершоковой области Чуйского землетрясения с использованием данных как до землетрясения, так и после него. В работе [21] делается попытка установить: имеются ли значимые изменения в скоростной модели после землетрясения. Исследование выполнено по результатам неполной обработки данных и в дальнейшем результат будет уточнен.

Обсуждение результатов. Полученные результаты показывают, что такое крупное землетрясение, как Чуйское, вызвало сложный процесс, в значительной степени зависящий от блочного строения эпицентральной области. Эпицентральная область главного события формирует элемент афтершоковой области, по своему строению отдельный от остальных элементов. В Чуйской впадине формируется площадная активизация ее северо-западного угла. Это отделенный разломами от эпицентральной области соседний блок земной коры. Сильное воздействие Чуйского землетрясения на него создает элемент афтершокового процесса с характеристиками, соответствующими строению блока. Именно активизированный угол приподнят относительно остальной части впадины. При этом наблюдаются и наклон впадины, и ступени тектонической природы. Сейсмический процесс в этом элементе в площадном плане распределился на множество мелких разрывов и проходит при отсутствии особо крупных афтершоков.

На границе Курайской впадины с Северо-Чуйским хребтом сформировалось два элемента афтершокового процесса. При этом и Курайская впадина имеет неоднородное строение. Юго-восточная часть впадины, соприкасающаяся с элементом II, достаточно плоская, а Северо-западная часть Курайской впадины холмистая и приподнятая. Оба элемента афтершокового процесса, приуроченные к Курайской впадине, изгибаясь в районе р. Актру, уходят в Курайскую впадину, пересекая друг друга в разрезе. Наличие фаз развития афтершокового процесса говорит о распределенности во времени процесса разрядки напряженного состояния в блочной среде. Сейсмический процесс первой фазы фактически не затронул зону северо-западного элемента афтершокового процесса, землетрясений в этом элементе не было. Во второй элемент активизации входит крупный ($M_S=6.6$) афтершок 27 сентября в 18^h52^m . Удивительно, что столь крупное землетрясение не вызвало значимого усиления афтершокового процесса. Это событие произошло в Курайской впадине. Возможно, в этом и кроется причина малого влияния этого события на афтершоковый процесс. Известный специалист по сейсмичности Алтае-Саянской горной области Н.Д. Жалковский неоднократно высказывал мысль, что чем сейсмически активней геологическая структура в фоновой сейсмичности, тем более длительный и сильный афтершоковый процесс наблюдается при крупном землетрясении. В данном районе впадины асейсмичны при отсутствии активизаций. Крупное событие, произошедшее во впадине, не сопровождалось сильным афтершоковым процессом в этой зоне.

Существование северо-восточного элемента (элемент I) указывает на то, что Курайская впадина в поле афтершокового процесса – это не один блок земной коры, а два. По-видимому, тектонические процессы, обеспечившие различие в рельефе двух частей впадины, уже обозначили границу, разделяющую впадину на два блока. Ближайший к эпицентру Чуйского землетрясения блок впадины включился в афтершоковый процесс сразу, а вот северо-западный элемент активизации – с задержкой, после афтершока 1 октября в 01^h03^m с $M_S=6.9$. Этот афтершок вызвал усиление афтершокового процесса, и одновременно с ним произошла серия событий, цепью уходящих в Курайскую впадину в изгибающемся около д. Актру окончании данного элемента. В дальнейшем процесс формировался в основном в приграничной к Северо-Чуйскому хребту линейной зоне.

Известно, что для Алтая характерным является рост горных массивов за счет сокращения впадин [22, 23]. В спокойное время сейсмический процесс на Алтае приурочен к горному обрамлению впадин [24]. Если бы так было всегда, то впадины не имели бы разрывных нарушений. Наиболее вероятными периодами формирования нарушенной структуры впадин Алтае-Саянской области могут быть сейсмические активизации, вызванные крупными землетрясениями. Чуйское землетрясение – это сдвиг на границе двух горных блоков, а афтершоковый процесс, выходящий за пределы этих блоков, в заметной степени приводит к процессам, вносящим свою лепту в создание нарушенной структуры впадин.

По геологическим данным, в развитии Алтая в кайнозое шел процесс дробления территории на более мелкие блоки [25]. Чуйское землетрясение, будучи сдвигом в давно существующей разломной зоне, вносит заметный вклад в процесс разрушения впадин.

Говоря о Чуйском землетрясении в совокупности с развивающимся по сей день афтершоковым процессом, можно интерпретировать его как сдвиг в блочной среде (когда линия сдвига превышает размеры блоков). Наблюдается сдвиг плюс конвергенция. Блоки в дополнение к сдвиговому движению имеют некоторую свободу совершать независимые друг от друга движения. Они по-разному реагируют на приложенные к ним силы, появляются отличные друг от друга повороты блоков, задержки процесса во времени, и, вероятно, существуют точки бифуркации в развитии процесса (выбор, по какой грани блока идти разрыву). Блочная структура эпицентральной области в значительной степени влияла на сейсмический процесс и при других крупных землетрясениях Алтае-Саянской горной области [9, 22]. Сочетание сдвига с конвергенцией было обнаружено при изучении разрывов на поверхности, образовавшихся при Гоби-Алтайском землетрясении 04.12.1957 г. с $M=8.1$ [22]. Чуйское землетрясение обладало существенно меньшей энергией, и разрывы на поверхности, образовавшиеся при этом землетрясении, существенно труднее интерпретируются, чем при классическом Гоби-Алтайском землетрясении, но по протеканию афтершокового процесса можно говорить о влиянии блочного строения на сейсмический процесс.

Любая сейсмическая активизация имеет конец, но какой конец – это вопрос. Важным моментом было то, что в период афтершокового процесса сейсмичность смежных геологических структур снизилась почти до нуля. В 2007 г. заметно возобновление сейсмического процесса в некогда активной зоне Айгулакского хребта. По-видимому, это начало выравнивания сейсмического процесса в данном районе до уровня фоновой сейсмичности.

Резюмируя результаты описанных выше исследований, отметим наиболее важные из них:

- Выявлены временные границы первой фазы развития афтершокового процесса Чуйского землетрясения: от главного толчка 27 сентября в $11^{\text{h}}33^{\text{m}}$ с $MS=7.3$ до второго крупного афтершока 1 октября в $01^{\text{h}}03^{\text{m}}$ с $MS=6.9$.

- Показано, что первый крупный ($MS=6.6$) афтершок 27 сентября в $18^{\text{h}}52^{\text{m}}$ не оказал значительного влияния на последующий за ним афтершоковый процесс.

- Афтершоки Чуйского землетрясения образуют четыре пространственных элемента I–IV.

- Для элементов I, II, IV обнаружено существование сейсмически активизированного слоя мощностью 1–2 км у дневной поверхности, отделенного асейсмичным слоем мощностью 2–3 км от основной активизированной области с $h>3$ км.

- Северо-западное окончание афтершоковой области (элемент I) сформировалось как процесс, вызванный вторым крупным афтершоком. Фиксируется уверенный наклон активизированной области под Северо-Чуйский хребет. В районе долины р. Актру события данного элемента образуют в плане загиб в сторону Курайской впадины, а северо-западное окончание образует структуру типа «конского хвоста». Основной активизированный слой в пределах данного элемента имеет наклонное залегание с выклиниванием к дневной поверхности к северо-западному окончанию.

- Элемент II от Чаган-Узунского блока до долины р. Актру представляет из себя расширяющуюся с глубиной активизированную область. Основное число событий здесь на глубине $h>10$ км. Первый крупный афтершок относится к этому элементу, находясь на изгибе, уходящем в сторону Курайской впадины. Элементы I, II своими изгибами во впадину пересекаются друг с другом.

- III элемент – это эпицентральной область главного события на границе Чаган-Узунского блока с Северо-Чуйским хребтом. Активизирована область от дневной поверхности до глубины 20 км, имеется слабый наклон в сторону Чаган-Узунского блока. Наиболее интенсивный сейсмический процесс зафиксирован на глубинах до 10 км. На глубинах $h=10$ –20 км активизированная область заходит в виде слоя под Чаган-Узунский блок.

- Северо-западный угол Чуйской впадины (IV элемент) имеет активизированную область с двухъярусным строением (приповерхностный сейсмоактивный слой и основная активизированная область). Характерным для этого элемента является расходящийся из угла впадины веерообразный в плане процесс. Наибольшее число землетрясений происходит на глубинах $h=4$ –10 км.

- В 2007 г. в Айгулакском хребте стала проявлять себя в сейсмичности зона, активная в течение ряда лет перед Чуйским землетрясением и асейсмичная в период протекания афтершокового процесса.

– По данным сейсмической томографии эпицентральной области установлено существование зоны повышенной скорости сейсмических волн под Чаган-Узунским блоком и северо-западной частью Курайской впадины. Повышенная скорость зафиксирована в интервале глубин $h=3-9$ км. Линейная зона афтершоков связана с контрастами высоких и низких скоростей пространства продольных волн в среде.

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. Филина А.Г., Подкорытова В.Г. (отв. сост.), Данциг Л.Г., Денисенко Г.А., Кузнецова Н.В., Манушина О.А., Подлипская Л.А., Щевелёва С.С., Шевкунова Е.В. Каталог землетрясений Алтая и Саян за 2003 год. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
3. Гольдин С.В., Селезнёв В.С., Еманов А.Ф., Филина А.Г., Еманов А.А., Новиков И.С., Высоцкий Е.М., Фатеев А.В., Колесников Ю.И., Подкорытова В.Г., Лескова Е.В., Ярыгина М.А. Чуйское землетрясение и его афтершоки // Доклады РАН. – 2004. – 395. – № 4. – С. 534–536.
4. Рогожин Е.А., Овсюченко А.Н., Мараханов А.В., Ушанова Е.А. Тектоническая позиция и геологические проявления Алтайского землетрясения 2003 г. // Геотектоника. – 2007. – № 2. – С. 3–23.
5. Арефьев С.С., Погребченко В.В., Аптекман Ж.Я., Быкова В.В., Матвеев И.В., Михин А.Г., Молотков С.Г., Плетнёв К.Г. Предварительные результаты сейсмологических наблюдений в эпицентральной зоне Алтайского землетрясения // Сильное землетрясение на Алтае 27 сентября 2003 г.: Материалы предварительного изучения. – М.: ИФЗ РАН, 2004. – С. 61–67.
6. Старовойт О.Е., Чепкунас Л.С., Габсатарова И.П. Параметры Алтайского землетрясения 2003 г. и его афтершоков по телесеismicким данным // Сильное землетрясение на Алтае 27 сентября 2003 г.: Материалы предварительного изучения. – М.: ИФЗ РАН, 2004. – С. 14–24.
7. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Колесников Ю.И. Геодинамические и техногенные процессы в сейсмичности Алтае-Саянской горной области // Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования. Раздел II. – Новосибирск: СО РАН, 2008. – С. 176–266.
8. Еманов А.Ф., Филина А.Г., Еманов А.А., Фатеев А.В., Лескова Е.В. Алтай и Саяны. (См. раздел I (Обзор сейсмичности) в наст. сб.).
9. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Филина А.Г., Лескова Е.В. Пространственно-временные особенности сейсмичности Алтае-Саянской складчатой области // Физическая мезомеханика. – 2006. – 8. – № 1. – С. 49–64.
10. Klein F.W. User's Guide to HYPOINVERSE-2000, a Fortran Program to Solve for Earthquake Locations and Magnitudes // U.S. Geol. Surv., 2002. – <http://geopubs.wr.usgs.gov/open-file/of02-171/>.
11. Соловьёв В.М., Селезнёв В.С., Дучков А.Д., Лисейкин А.В. Деформационно-прочностное районирование земной коры Алтае-Саянской складчатой области // Проблемы сейсмологии III-го тысячелетия: Материалы Международной геофиз. конф., г. Новосибирск, 15–19 сентября 2003 г. – Новосибирск: Наука, СО РАН, 2003. – С. 332–337.
12. Еманов А.А., Лескова Е.В. Структурные особенности афтершокового процесса Чуйского (Горный Алтай) землетрясения // Геология и геофизика. – 2005. – 46. – № 10. – С. 1065–1072.
13. Waldhauser F., Ellsworth W.L. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the Hayward Fault, California // Bull. Seismol. Soc. Am. – 2000. – 90. – № 5 – P. 1353–1368.
14. Reasenberг P.A., Oppenheimer D. FPFIT, FPLOT and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions // U.S. Geol. Serv. – 1985. – Open-File Rep. – P. 85–739.
15. 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.
16. Еманов А.Ф., Колесников Ю.И., Еманов А.А., Филина А.Г., Подкорытова В.Г., Фатеев А.В., Ярыгина М.А. Изучение землетрясений малых энергий на локальной сети Алтайского сейсмологического полигона // Напряженно-деформированное состояние и сейсмичность литосферы (Труды Всероссийского совещания, г. Иркутск, 26–29 августа 2003 г.). – Новосибирск: СО РАН, филиал «ГЕО», 2003. – С. 324–326.

17. Михайлова Н.Н., Смирнов А.А. Анализ сейсмических и инфразвуковых станций Казахстана по Алтайскому землетрясению 2003 года // Сильное землетрясение на Алтае 27 сентября 2003 г.: Материалы предварительного изучения. – М.: ИФЗ РАН, 2004. – С. 92–103.
18. 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.
19. Лескова Е.В., Еманов А.А. Характер деформаций в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения (27 сентября 2003 г., $K_p=17$, Горный Алтай) по данным анализа фокальных механизмов афтершоков // Физическая мезомеханика. – 2006. – 9. – № 1. – С. 51–55.
20. Zhang H., Thurber C.H. Double-Difference Tomography: The Method and Its Application to the Hayward Fault, California // Bull. Seismol. Soc. Am. – 2003. – 93. – № 5. – P. 1875–1889.
21. Санина И.А., Усольцева О.А., Иванченко Г.И., Еманов А.Ф. Модель глубинного строения зоны Чуйского землетрясения по данным сейсмической томографии и дистанционного зондирования // Динамические процессы в системе внутренних и внешних взаимодействующих геосфер (Труды ИДГ РАН под ред. акад. В.В. Адушкина). – М.: ГЕОС, 2005. – С. 64–70.
22. Молнар П., Курушин Р.А., Баясгалан А., Хаднат К.В. Дислокации Гоби-Алтайского (Монголия) землетрясения 04.12.1957 г. с $M=8.1$. – Новосибирск: Наука, СО РАН, 1998. – 148 с.
23. Флоренсов Н.А. Очерки структурной геоморфологии. – М.: Наука, 1978. – 238 с.
24. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Колесников Ю.И., Фатеев А.В., Сёмин А.Ю. Сейсмический мониторинг Алтае-Саянской горной области Алтае-Саянским филиалом ГС РАН // Землетрясения России в 2005 году. – Обнинск: ГС РАН, 2007. – С. 53–60.
25. Добрецов Н.Л., Берзин Н.А., Буслов М.М., Ермиков В.Д. Общие проблемы эволюции Алтайского региона и взаимоотношения между строением фундамента и развитием неотектонической структуры // Геология и геофизика. – 1995. – 36. – № 10. – С. 5–19.