

## АЛТАЙ И САЯНЫ

А.Ф. Еманов, А.Г. Филина, А.А. Еманов, А.В. Фатеев, Е.В. Лескова

Алтае-Саянский филиал ГС СО РАН, г. Новосибирск, emanov@gs.nsc.ru, filina@gs.nsc.ru

В 2001 г. сейсмическая сеть региона состояла из 18 станций, две из которых («Кайтанак» и «Кызыл») – новые, а одна («Быстровка») работала, как и в 2000 г. [1], в режиме опытно-производственной эксплуатации. Продолжено оснащение станций цифровой аппаратурой типа Байкал-11: с 1 февраля – «Усть-Кан» и «Акташ», с 1 марта – «Годжа», с 15 марта – «Тээли», с 1 апреля – «Верх-База», с 15 сентября – «Ельцовка», с 1 декабря – «Мина», с декабря – «Эрзин». Гальванометрическая регистрация сохранилась лишь на станции «Арадан». Параметры аппаратуры приведены в табл. 1, 2.

**Таблица 1.** Сейсмические станции Алтая и Саян (в хронологии их открытия), работавшие в 2001 г., и их параметры для аналоговой аппаратуры

№	Станция			Дата открытия	Координаты			Аппаратура				
	Название	Код			$\varphi^\circ, N$	$\lambda^\circ, E$	$h_y, м$	Тип прибора	Композитента	$V_{max}$	$\Delta T_{max}, c$	
		межд.	рег.									
1	Ельцовка	ELT	ЕЛЬ	05.07.1962	53.261	86.239	235	СКМ-3	N, E, Z	50000	0.25–1.3	
				15.09.2001				СКМ-3	E	5000	0.25–1.3	
цифровая станция Байкал-11												
2	Усть-Кан	UKR	У-К	09.12.1962	50.940	84.769	1057	СКМ-3	N, E, Z	50000	0.25–1.3	
				01.02.2001				СКМ-3	E	5000	0.25–1.3	
цифровая станция Байкал-11												
3	Эрзин	ERNS	ЭРЗ	08.07.1963	50.264	95.162	1100	СКМ-3	N, E, Z	40000	0.25–1.3	
				00.12.2001				СКМ-3	E	4000	0.25–1.3	
цифровая станция Байкал-11												
4	Новосибирск	NVS	НСК	10.11.1965	54.841	84.234	168	СКД	N, E, Z	1200	0.20–18	
				01.05.1999				цифровая станция Байкал-11				
5	Верх-База	VEN	В-Б	05.03.1967	53.255	90.299	550	СКМ-3	N, E, Z	40000	0.25–1.3	
				01.04.2001				СКМ-3	E	4000	0.25–1.3	
цифровая станция Байкал-11												
6	Тээли	TEL	ТЭЛ	01.10.1971	51.024	90.195	992	СКМ-3	N, E, Z	50000	0.25–1.3	
				15.03.2001				СКМ-3	E	5000	0.25–1.3	
цифровая станция Байкал-11												
7	Тюнгур	TUNR	ТНГ	01.01.1981 (закрита 00.11.1993)								
				01.08.1998	50.163	86.317	864	цифровая станция Байкал-11				
8	Артыбаш	ART	АРТ	22.06.1981	51.798	87.281	511					
				01.07.2000				цифровая станция Байкал-11				
9	Акташ	AKAR	АКТ	01.01.1985	50.325	87.621	1421	СКМ-3	N, E, Z	40000	0.25–1.3	
				01.02.2001				СКМ-3	E	4000	0.25–1.3	
цифровая станция Байкал-11												
10	Мина	MINR	МИН	29.07.1985	54.977	94.127	544	СКМ-3	N, E, Z	50000	0.25–1.3	
				01.12.2001				СКМ-3	E	5000	0.25–1.3	
цифровая станция Байкал-11												
11	Таштагол	TASR	ТШТ	01.09.1988	52.762	87.880	553	СКМ-3	N, E, Z	15000	0.25–1.3	
				01.12.1999				СКМ-3	E	1000	0.25–1.3	
цифровая станция Байкал-11												

№	Станция			Дата открытия	Координаты			Аппаратура				
	Название	Код			φ°, N	λ°, E	h <sub>y</sub> , м	Тип прибора	Композита	V <sub>max</sub>	ΔT <sub>max</sub> , с	
		межд.	рег.									
12	Черемушки	CERR	ЧЕР	05.09.1990	52.857	91.415	400	СКМ-3	N, E, Z	50000	0.25–1.3	
				01.12.2000						цифровая станция Байкал-11	5000	0.25–1.3
13	Арадан	ARDR	АРД	06.06.1992	52.580	93.428	958	СКМ-3	N, E, Z	60000	0.25–1.3	
14	Тоджа	TDJR	ТДЖ	27.07.1980	52.423	96.095	992					
				(закрыта в 1994)								
				05.1997	52.453	96.093	1000	СКМ-3	N, E, Z	50000	0.25–1.3	
				01.03.2001						цифровая станция Байкал-11	5000	0.25–1.3
15	Берчикуль	BRCR	БРЧ	01.09.1998	55.635	88.299	381				цифровая станция Байкал-11	
16	Быстровка	BST	БСТ		54.568	82.653	121				цифровая станция Байкал-11	
17	Кызыл	KZL	КЗЛ	15.03.2001	51.705	94.453	654				цифровая станция Байкал-11	
18	Кайтанак	KTNK	КТН	18.05.2001	50.145	84.465	1031				цифровая станция Байкал-11	

Таблица 2. Данные об аппаратуре цифровых станций Алтая и Саян в 2001 г.

Название станции	Тип станции и сейсмоприемника	Перечень каналов	Частотный диапазон, Гц	Частота опроса данных, Гц	Эффективная разрядность АЦП, не менее	Чувствительность, велосигграф – отсчет/(м/с)
Акташ	Байкал-11+СКМ-3	SH(Z, N, E) v	0.5–20	100	17	1.5·10 <sup>9</sup>
Артыбаш	Байкал-11+СКМ-3	SH(Z, N, E) v	0.5–20	100	17	1.5·10 <sup>9</sup>
Берчикуль	Байкал-11+СМЗ-КВ	SH(Z, N, E) v	0.5–20	100	17	3.6·10 <sup>9</sup>
Быстровка	Байкал-11+СКМ-3	SH(Z, N, E) v	0.5–20	100	17	1.5·10 <sup>9</sup>
Верх-База	Байкал-11+СКМ-3	SH(Z, N, E) v	0.5–20	100	17	1.5·10 <sup>9</sup>
Ельцовка	Байкал-11+СКМ-3	SH(Z, N, E) v	0.59–50	100	17	1.5·10 <sup>9</sup>
Кайтанак	Байкал-11+СМЗ-КВ	SH(Z, N, E) v	0.59–50	100	17	3.6·10 <sup>9</sup>
Кызыл	Байкал-11+СМЗ-КВ	SH(Z, N, E) v	0.59–50	100	17	3.5·10 <sup>9</sup>
Мина	Байкал-11+СКМ-3	SH(Z, N, E) v	0.5–20	100	17	2.1·10 <sup>9</sup>
Новосибирск	Байкал-11+СМЗ-КВ	SH(Z, N, E) v	0.5–20	100	17	1.5·10 <sup>9</sup>
	Байкал-11+СКД	SH(Z, N, E) v	0.1–20	100	17	3.0·10 <sup>7</sup>
Таштагол	Байкал-11+СМЗ-КВ	SH(Z, N, E) v	0.5–7.1	100	16	2.0·10 <sup>8</sup>
Тоджа	Байкал-11+СКМ-3	SH(Z, N, E) v	0.5–20	100	17	1.5·10 <sup>9</sup>
Тээли	Байкал-11+СКМ-3	SH(Z, N, E) v	0.5–7.1	100	17	1.7·10 <sup>9</sup>
Тюнгур	Байкал-11+СКМ-3	SH(Z, N, E) v	0.5–20	100	17	2.0·10 <sup>9</sup>
	Байкал-11+СКД	SH(Z, N, E) v	0.05–10	100	17	3.2·10 <sup>7</sup>
Усть-Кан	Байкал-11+СКМ-3	SH(Z, N, E) v	0.5–20	100	17	1.5·10 <sup>9</sup>
	Байкал-11+СКД	SH(Z, N, E) v	0.05–10	100	17	3.2·10 <sup>7</sup>
Черёмушки	Байкал-11+СМЗ-КВ	SH(Z, N, E) v	0.5–12.5	100	16	5.0·10 <sup>8</sup>
Эрзин	Байкал-11+СКМ-3	SH(Z, N, E) v	0.5–20	100	17	1.5·10 <sup>9</sup>

Замена аналоговой аппаратуры на цифровую открыла новые возможности в регистрации сейсмических событий. В частности, увеличилась дальность регистрации землетрясений разных классов, что обеспечило снижение уровня  $K_{min}$  представительных землетрясений.

Методика расчета энергетической представительности  $K_{min}$  и погрешности локализации землетрясений не изменилась [2]. Результаты расчета  $K_{min}$  представлены на рис. 1. Сравнивая данную карту с аналогом в 2000 г. [1], можно отметить существенное улучшение: землетрясения с  $K_p=9$  и 8 стали регистрироваться без пропусков не только в пределах площади, для которой составляется региональный каталог, но и далеко за ее пределами; изолиния  $K_{min}=7$  охватывает почти всю площадь; появились изолинии с  $K_{min}=6$  и  $K_{min}=5$ . Изолиния  $K_{min}=6$  охватывает практически все наиболее активные структуры Алтая и Саян, исключая Монгольский Алтай и Зайсанскую впадину. Уверенная регистрация  $K_{min}=5$  получена на участках в центральных частях Тувинской котловины и Западного Саяна, в северо-западной части Восточного Саяна, а также в Горной Шории в районе Таштагола и прилегающей к ней Хакасии (рис. 1).

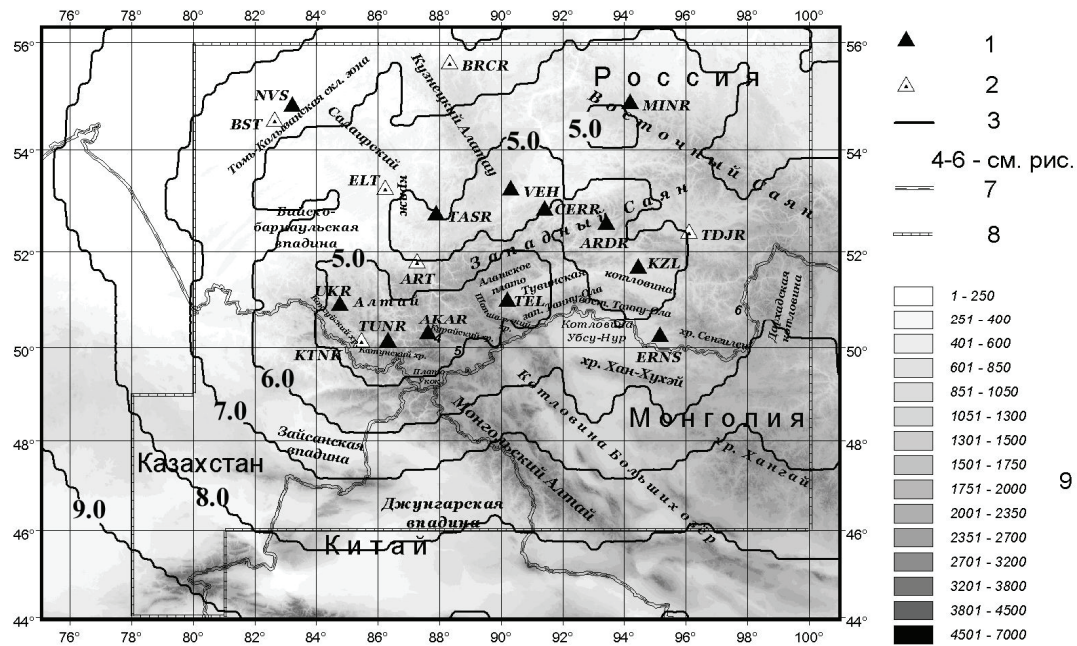


Рис. 1. Карта энергетической представительности  $K_{min}$  землетрясений Алтая и Саян в 2001 г.

1 – сейсмическая станция; 2 – станция, работавшая непродолжительное время; 3 – изолиния  $K_{min}$ ; малыми цифрами 4–6 на рисунке отмечены три впадины (Курайская, Чуйская, Бусийингольская соответственно); 7 – государственная граница; 8 – граница площади, для которой составлен каталог; 9 – высота  $h$ , над уровнем моря, м.

На рис. 2 представлена карта погрешности  $\delta$ , км определения координат эпицентров на примере землетрясений с  $K_p=9$ . Существенных изменений в этой карте, в сравнении с аналогичной в 2000 г. [1], нет: для большей части Алтае-Саянской горной области эпицентры землетрясений определяются с ошибкой  $\delta \leq 10$  км.

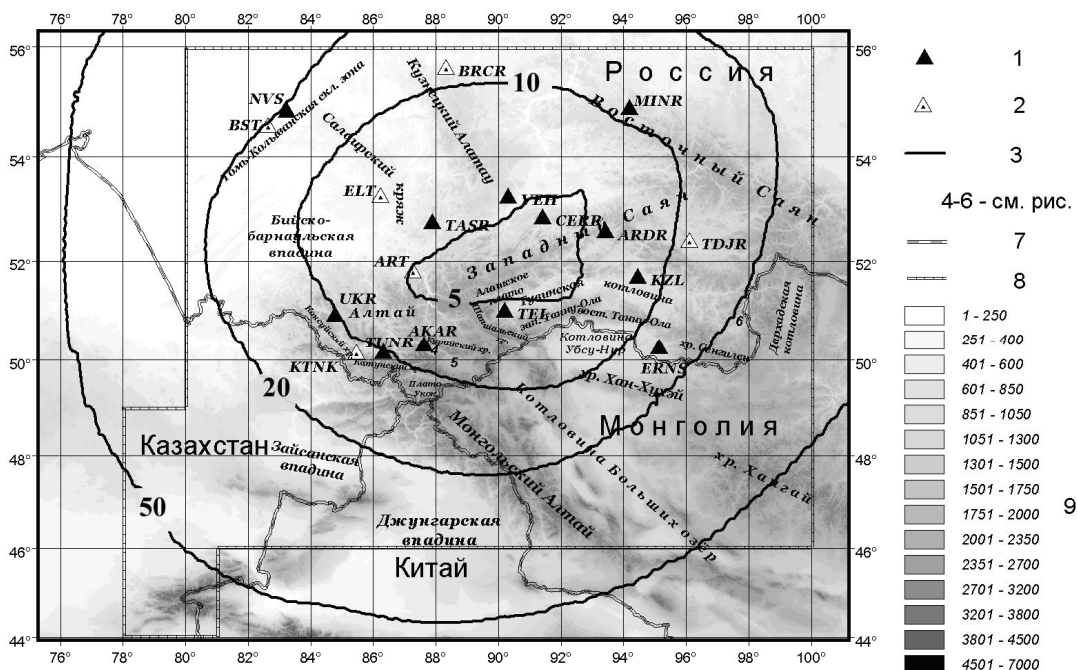


Рис. 2. Погрешность  $\delta$ , км локализации эпицентров землетрясений Алтая и Саян в 2001 г. (на примере событий с  $K_p=9$ )

1 – сейсмическая станция; 2 – станция, работавшая непродолжительное время; 3 – изолиния погрешности  $\delta$ , км; цифрами 4–6 на рисунке отмечены три впадины (Курайская, Чуйская, Бусийингольская соответственно); 7 – государственная граница; 8 – граница площади, для которой составлен каталог; 9 – высота  $h$ , над уровнем моря, м.

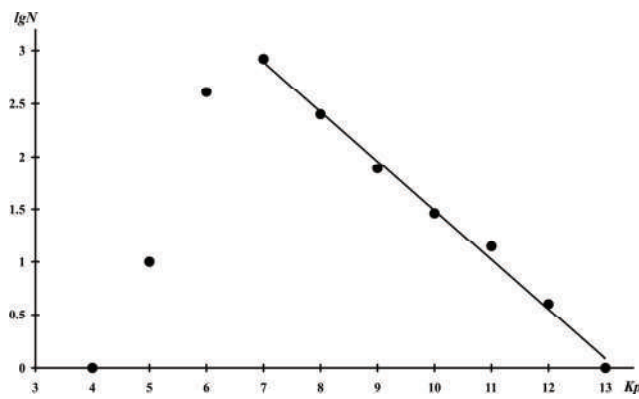
Общее число локализованных в 2001 г. землетрясений составило  $N_{\Sigma}=1635$  в диапазоне  $K_p=4.0-12.6$ , из которых 19 с  $K_p \geq 10.6$ , в том числе одно – тринадцатого класса и четыре – двенадцатого. Помещенный в наст. сб. каталог [3] включает лишь землетрясения с  $K_p \geq 7.6$ . Распределение землетрясений по энергетическим классам приведено в табл. 3.

**Таблица 3.** Распределение числа землетрясений разных классов и суммарная сейсмическая энергия Алтая и Саян в 2001 г.

$K_p$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	$N_{\Sigma}$	$\Sigma E \cdot 10^{12}, \text{ Дж}$
$N(K)$	1	10	410	837	252	77	29	14	4	1	1635	8.587

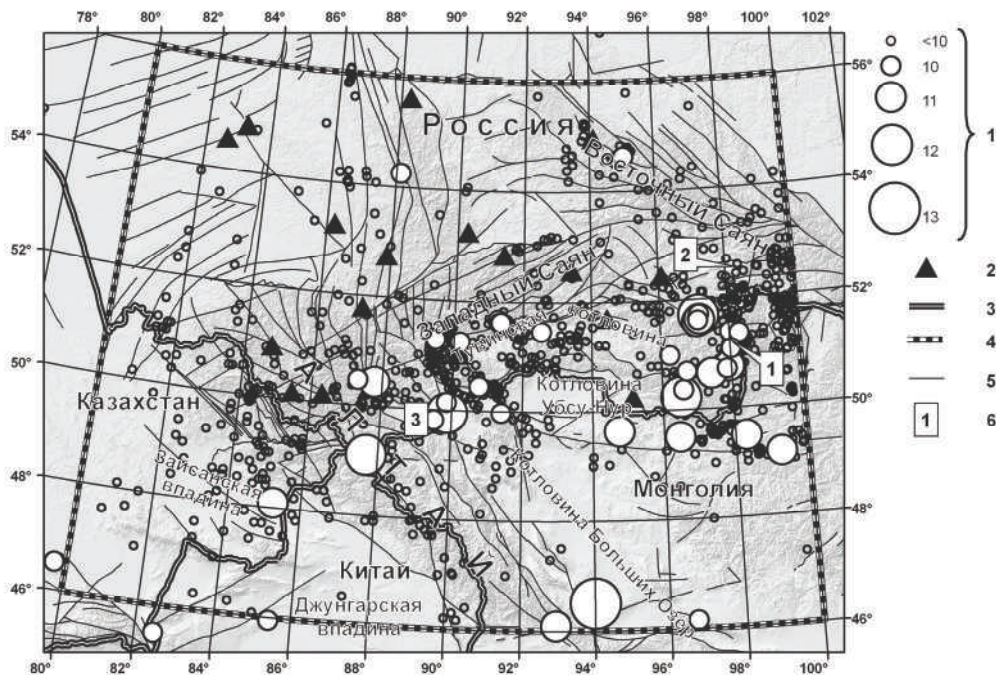
Построенный по данным табл. 3 график повторяемости землетрясений (рис. 3) свидетельствует о снижении энергии землетрясений, регистрируемых без пропусков по региону в целом до  $K_p=7$ . Уравнение этого графика имеет вид:

$$\lg N = 6.17 - 0.468 K_p.$$



**Рис. 3.** График повторяемости землетрясений Алтая и Саян в 2001 г.

Суммарная сейсмическая энергия, высвобожденная в очагах всех землетрясений Алтая и Саян, составила  $\Sigma E=15.77 \cdot 10^{12} \text{ Дж}$ . На рис. 4 дана карта их эпицентров.



**Рис. 4.** Карта эпицентров землетрясений Алтая и Саян в 2001 г.

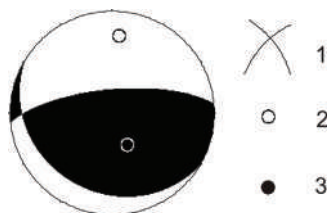
1 – энергетический класс  $K_p$ ; 2 – сейсмическая станция; 3 – государственная граница; 4 – граница региона; 5 – неотектонический разлом; 6 – впадины (Бусингольская (1), Белинская (2), Чуйская (3)).

Самое сильное ( $K_p=12.6$ ) землетрясение 2001 г., произошедшее 1 марта в 03<sup>h</sup>12<sup>m</sup>, расположено в горном обрамлении южной окраины Котловины Больших Озер. Фактически это удаленный от российской границы район Монгольского Алтая. Для него имеется решение механизма очага, рассчитанное в Гарвардском центре США по методу тензора момента центраида [4], приведенное (*ред.*) в табл. 4 и на рис. 5.

**Таблица 4.** Параметры механизма очага землетрясения 1 марта в 03<sup>h</sup>12<sup>m</sup> с  $K_p=12.6$ ,  $M_w=5.1$  (метод ТМЦ)

Дата, д м	$t_0$ , ч мин с	$h^{ISC}$ , км	$M_c$	$M_w$	$\Delta MS$ # $M_s$	$\Delta MPSP$ # $m_b$	$K_p$	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости					
								T		N		P		NP1			NP2		
								PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP
01.03	03 12 23.2	33 28*	5.0	5.1	^4.6 #4.5	^5.2 #4.9	12.6	62	154	13	269	25	5	121	23	124	265	71	76

Это землетрясение возникло под действием превалирующих сжимающих напряжений, ориентированных на север. Тип движения в очаге по пологой ( $DP=23^\circ$ ) плоскости NP1 северо-западного простирания представляет надвиг с компонентами правостороннего сдвига, по крутопадающей ( $DP=71^\circ$ ) плоскости NP2 широтного простирания – взброс с компонентами левостороннего сдвига.



**Рис. 5.** Стереодиаграмма механизма очага землетрясения 1 марта в 03<sup>h</sup>12<sup>m</sup> с  $M_w=5.1$  в проекции нижней полусферы

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

Карта эпицентров за 2001 г. (рис. 4) отражает общие закономерности связи сейсмического режима Алтая и Саян с рельефом местности. По сейсмической активности рассматриваемый регион в этом году можно считать спокойным.

Землетрясения главным образом концентрировались в горных обрамлениях впадин, образуя упорядоченный из года в год процесс. В 2001 г. практически отсутствуют землетрясения в Котловине Больших Озер, Убсу-Нур, Тувинской, значительно ниже сейсмическая активность Зайсанской впадины. Однако активна по-прежнему Белино-Бусингольская система рифтовых впадин и ее горное окружение на восточной окраине региона, причем этот район – один из самых сейсмоактивных, начиная с конца 1991 г., после Бусингольского землетрясения 27.12.1991 г. с  $K_p=16.2$ ,  $M=6.5$  [5, 6]) и поныне. Сейсмически активно также в 2001 г. горное обрамление Кызыльской впадины, являющейся центральным элементом Тувинской котловины.

Ниже более детально анализируются наиболее интересные в 2001 г. сейсмические процессы в Чуйско-Курайской зоне Горного Алтая, карта эпицентров которой дана на рис. 6, и рой землетрясений на участке с координатами 51°10'–52°N, 90°40'–92°E (в верхнем правом углу). Картирование представленных на рисунке блокоразделяющих разломов выполнено на основе морфотектонического анализа [7, 8].

Для четырех наиболее сильных землетрясений Чуйско-Курайской зоны, произошедших 7 января в 14<sup>h</sup>21<sup>m</sup> с  $K_p=11.7$ , 2 мая в 20<sup>h</sup>23<sup>m</sup> с  $K_p=10.6$ , 21 октября в 14<sup>h</sup>38<sup>m</sup> с  $K_p=10.5$  и 23 ноября в 20<sup>h</sup>57<sup>m</sup> с  $K_p=12.0$ , удалось определить механизм очагов по первым вступлениям P-волн (табл. 5 [9]), стереодиаграммы которых также изображены на рис. 6.

**Таблица 5.** Параметры механизмов очагов землетрясений в Чуйско-Курайской зоне Горного Алтая

№	Дата, д м	$t_0$ , ч мин с	$h$ , км	$M_c$	$K_p$	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости					
						T		N		P		NP1			NP2		
						PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP
I	07.01	14 21 26.8	6	4.4	11.7	11	300			3	209	75	85	10	344	80	175
II	02.05	20 23 27.7	5	3.6	10.6	15	218			49	327	100	70	-130	348	44	-30
III	21.10	14 38 24.5	20	3.5	10.5	15	142			49	33	80	70	-50	192	44	-150
IV	23.11	20 57 14.5	10	4.3	12.0	60	226			22	90	345	70	70	212	28	133

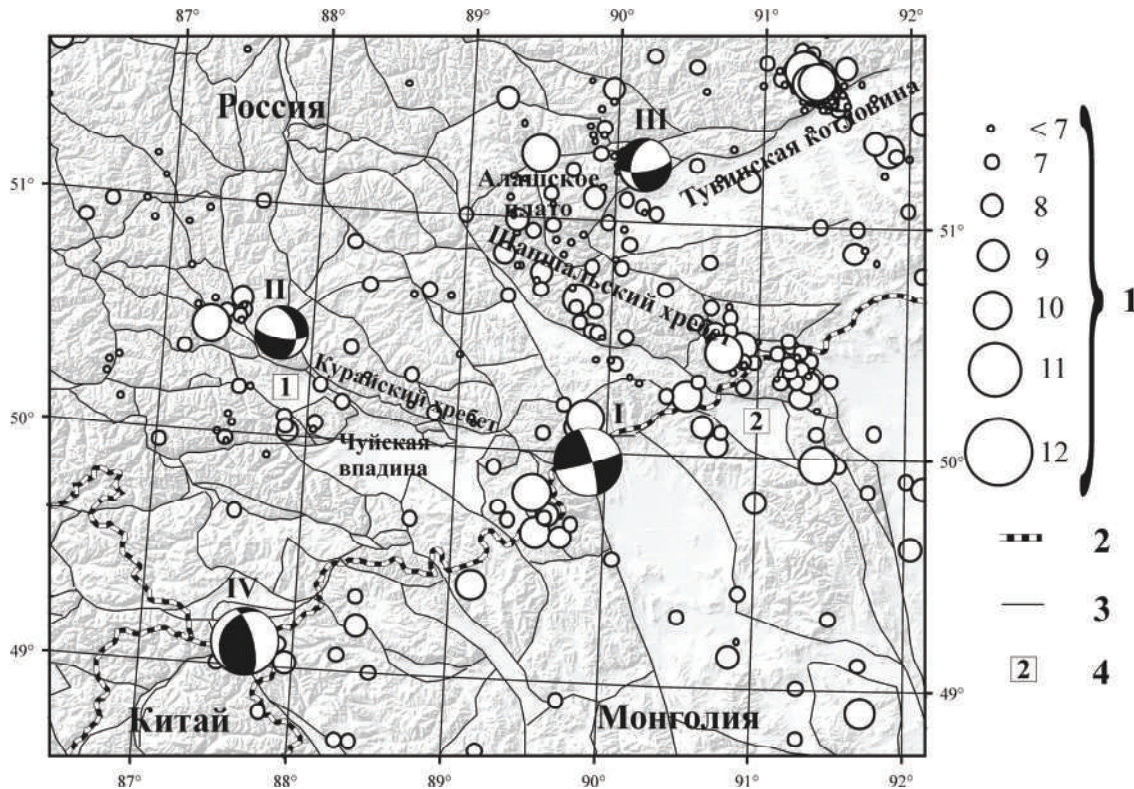


Рис. 6. Карта эпицентров землетрясений Горного Алтая в 2001 г. и фокальные механизмы наиболее крупных из них

1 – энергетический класс  $K_p$ ; 2 – государственная граница; 3 – неотектонический разлом; 4 – впадины: 1 – Курайская, 2 – Урег-Нурская. Римскими цифрами I–IV на карте (и в табл. 5) обозначены механизмы очагов землетрясений, произошедших 7 января в  $14^{\text{h}}21^{\text{m}}$  с  $K_p=11.7$ , 2 мая в  $20^{\text{h}}23^{\text{m}}$  с  $K_p=10.6$ , 21 октября в  $14^{\text{h}}38^{\text{m}}$  с  $K_p=10.5$ , 23 ноября в  $20^{\text{h}}57^{\text{m}}$  с  $K_p=12.0$  соответственно.

Землетрясение 7 января (I на рис. 6) произошло вдоль Кобдинского разлома в северо-западном углу Ачитнурской впадины. Оно возникло под действием как сжимающих напряжений, ориентированных на юго-запад, так и растягивающих, ориентированных на северо-запад. Обе нодальные плоскости залегают круто ( $DP=80-85^\circ$ ), одна из них ( $NP1$ ) имеет близмеридиональное простирание, вторая ( $NP2$ ) – близширотное. Тип движения в очаге по обеим плоскостям – сдвиг (левосторонний по  $NP1$  и правосторонний по  $NP2$ ). За истинную плоскость можно, по-видимому, выбрать плоскость  $NP2$ , поскольку по [10] для этой разломной зоны характерны правосторонние сдвиги. С такими подвижками здесь неоднократно происходили крупные землетрясения.

Землетрясение 2 мая, зарегистрированное на северо-западном окончании Курайского хребта (II на рис. 6), возникло под превалирующим действием растягивающих напряжений, ориентированных на юго-запад. Обе нодальные плоскости залегают круто ( $DP=44-70^\circ$ ). По плоскости  $NP1$  близширотного простирания тип движения в очаге – сброс с компонентами правостороннего сдвига. По плоскости  $NP2$  близмеридионального направления – левосторонний сдвиг с компонентами сброса.

Землетрясение 21 октября (III на рис. 6) так же, как и землетрясение 2 мая, возникло под действием превалирования растягивающих напряжений, но направленных на юго-восток. Обе нодальные плоскости имеют такие же углы наклона к горизонту ( $DP=44-70^\circ$ ), но их ориентация иная: по плоскости  $NP1$  близширотного простирания тип движения в очаге – сброс с компонентами левостороннего сдвига. По плоскости  $NP2$  близмеридионального направления – правосторонний сдвиг с компонентами сброса.

Землетрясение 23 ноября (IV на рис. 6) произошло на границе Бертекской впадины с хр. Южный Алтай (с юга от плато Укок) под превалирующим действием напряжений сжатия, ориентированных на восток. Нодальная плоскость  $NP1$  крутого падения ( $DP=70^\circ$ ) имеет близмеридиональное простирание, тип движения по ней – взброс с компонентами левостороннего

сдвига. По пологой ( $DP=28^\circ$ ) плоскости  $NP2$  юго-западного простирания тип движения в очаге – надвиг с компонентами правостороннего сдвига. По материалам морфотектоники [8, 11] в этой зоне Алтая при доминировании сдвигов также присутствуют взбросовые нарушения. Рост гор в данной части Алтая объясняется в значительной степени с этим типом подвижек [8].

Землетрясения малых энергий концентрируются в основном на северо-западном и юго-восточном окончаниях Чуйско-Курайской зоны. В Курайском и Северо-Чуйском хребтах зафиксировано небольшое число землетрясений с  $K_p \leq 7$ . Курайская впадина, Чуйская впадина, хр. Южно-Чуйский и плато Укок в 2001 г. асейсмичны.

Существенно выше сейсмическая активность наблюдается в горном обрамлении Тувинской котловины. Прежде всего, это структуры Шапшальского хребта и Алашского плато. Органически как продолжение к югу присоединяется к этому процессу зона повышенной активности вокруг небольшой Урег-Нурской впадины с наибольшей концентрацией событий в хр. Цаган-Шибету, разграничивающем Урег-Нурскую впадину и котловину Убсу-Нур. Как уже отмечено, в 2001 г. сейсмически активны линейные структуры, разделяющие Тувинскую котловину на составные части впадины: Хемчикскую, Улугхемскую и Кызыльскую [12–15]. Фактически активны в 2001 г. горные перемычки, отделяющие Улугхемскую впадину от Хемчикской и Кызыльской.

Наиболее интересный сейсмический процесс сформировался в Западном Саяне в районе примыкания к нему хр. Адар-Даш, являющегося перемычкой между Хемчикской и Улугхемской впадинами (рис. 6, верхний угол). Сейсмическая активизация приурочена к долине р. Ишкин, которая течет по разломной зоне. Район входит в структуру Алашского плато [16], составленного Алашским и Аксугским блоками. В районировании по скорости поднятия или опускания рельефа оба блока отнесены к блокам интенсивного поднятия. Аксугский блок с юга ограничен Саяно-Тувинским глубинным разломом, с севера – Саянским глубинным разломом, с востока – Хемчикским. Рой землетрясений приурочен к разломам даже нерегионального значения. Землетрясения происходят внутри Аксугского блока ближе к его восточной окраине. Известным является факт, что в зонах, приуроченных к главным блокоразделяющим разломам со сводово-блоковым поднятием Западного Саяна, обнаружена целая серия палеосейсмодислокаций [12], которые свидетельствуют о том, что здесь имели место землетрясения с  $M=7$  и  $I_0=9-10$  баллов. За время инструментальных наблюдений в этой части Западного Саяна землетрясений с  $K_p > 13$  не зарегистрировано.

Рой землетрясений, зафиксированный в 2001 г., пространственно не совпадает с известными палеосейсмодислокациями. Рассматриваемый рой землетрясений возник в районе, где за инструментальный период фиксировались только единичные землетрясения с энергией, изредка достигавшей десятого энергетического класса. Если для Байкальской рифтовой зоны роевая сейсмичность – распространенное явление [17], то в Алтае-Саянской области это большая редкость. Для изучения этого процесса был выбран район размером примерно  $100 \times 100 \text{ км}^2$  с координатами  $51^\circ 10' - 52^\circ \text{N}$ ,  $90^\circ 40' - 92^\circ \text{E}$ . В период с 12 апреля по 2 сентября 2001 г. здесь было зарегистрировано 340 землетрясений в диапазоне энергетических классов 5.6–10.2, список которых приведен в разд. VIII (Дополнительные данные) в наст. сб.

Чтобы показать необычность такого явления для исследуемой территории, обратимся к данным за предыдущие годы. На рис. 7 представлено распределение числа событий с  $K_p > 7$  по годам за весь период инструментальных наблюдений в Алтае-Саянском регионе. Число событий в 2001 г. превысило обычный уровень сейсмичности почти в 10 раз, в то время как значение суммарной выделившейся энергии в 2001 г. не превышает этого же показателя в некоторые из предыдущих лет. При этом события с  $K_p > 10$  не кажутся явлением исключительным для данного района, наоборот, можно проследить период повторяемости для них порядка 10 лет (рис. 7), и крупные землетрясения 2001 г. вполне удовлетворяют этой тенденции.

На рис. 8а представлена диаграмма распределения числа событий с  $K_p > 7$  по месяцам за 2001 г., откуда видно, что наибольшее их число (более 120) зарегистрировано в апреле – начале мая, затем в июне был небольшой спад, а в июле и августе вновь наблюдался небольшой рост.

Для землетрясений этого периода построен график повторяемости (рис. 8б), который демонстрирует интересную особенность: закон повторяемости для данного набора событий выполняется идеально для землетрясений с  $K_p = 7, 8, 10$  с параметрами

$$\lg N = 6.0 - 0.55 K_p,$$

за исключением землетрясений с  $K_p=9$ . Складывается впечатление, что «не хватает» около 9 событий с  $K_p=9$ . При этом параметр  $\alpha$  равен 6.0, что близко к той же характеристике для региона Алтай и Саяны (рис. 3). В то же время значение наклона графика  $\gamma = -0.55$ , что выше такового для региона в целом.

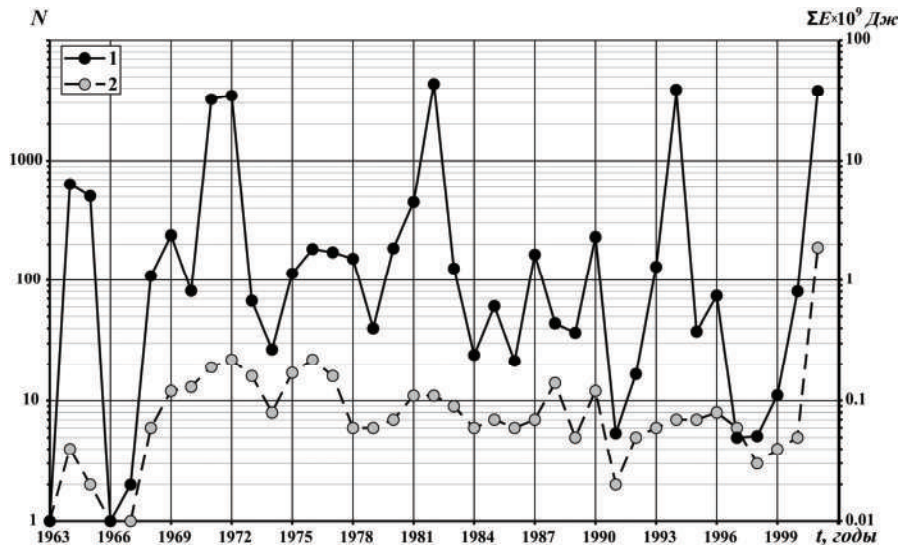


Рис. 7. Распределение суммарной энергии (1) и числа землетрясений с  $K_p > 7$  (2) в пределах координат  $\varphi = 51^{\circ}10' - 52^{\circ}00' N$ ,  $\lambda = 90^{\circ}40' - 92^{\circ}00' E$  за период инструментальных наблюдений 1963–2001 гг.

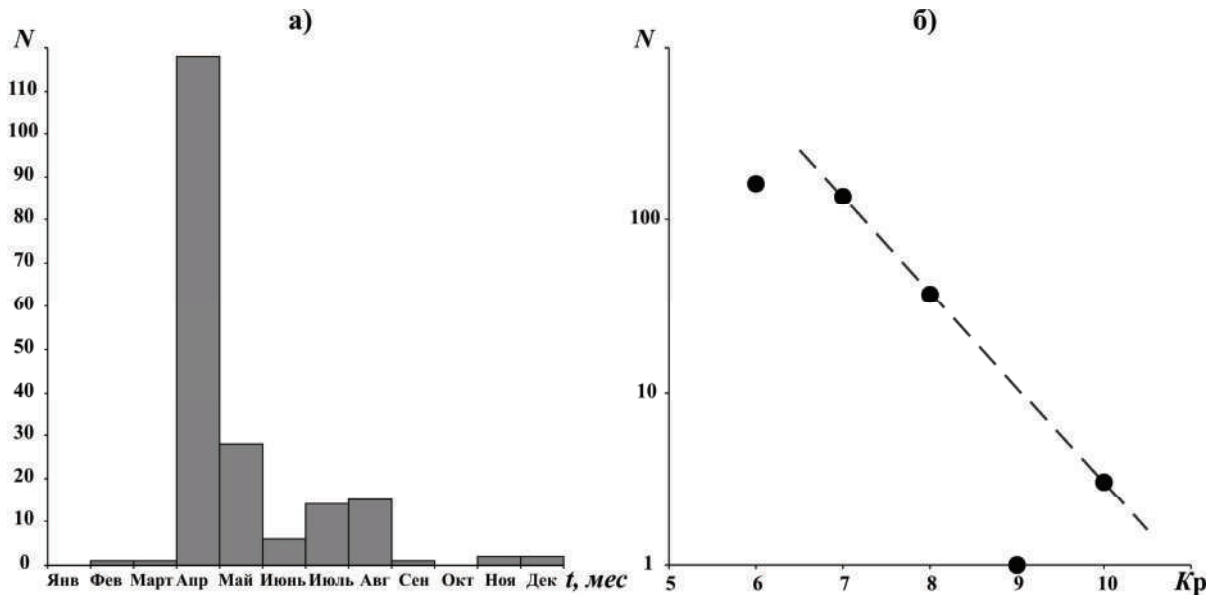


Рис. 8. Распределение числа землетрясений во времени (а) и график их повторяемости (б), зарегистрированных в 2001 г. на площадке с координатами  $\varphi = 51^{\circ}10' - 52^{\circ}00' N$ ,  $\lambda = 90^{\circ}40' - 92^{\circ}00' E$ .

Координаты эпицентров землетрясений роя были рассчитаны с использованием программы HYPOINVERSE-2000, что позволило также получить данные о глубинах некоторых событий (см. Приложение к наст. сб.). В алгоритме этой программы используется система взвешивания по двум параметрам: невязке времен пробега волн и расстоянию от эпицентра до станции. При расчетах сначала вычисляется грубое приближение решения с использованием всех данных и фиксированной глубиной. После того как эпицентральное решение получено, начинается определение глубины. При взвешивании по невязке из расчетов удаляются наблюдения, для которых разность наблюдаемого и теоретического (вычисленного с помощью модели) времен пробега превышает некоторую величину, обычно 0.16 с. Остальным данным при-



сваиваются веса в зависимости от невязки. При взвешивании по расстоянию на определенной итерации удаляются из вычислений наблюдения на станциях, находящихся дальше определенного расстояния от эпицентра. В качестве отсекающего расстояния обычно использовалось 150 км. 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 модели на больших расстояниях от эпицентральной зоны.

Из-за недостаточности данных (как правило, использование только удаленных станций (далее 150 км от очага)) глубины были рассчитаны лишь для трети событий роя. Для остальных землетрясений использовалась фиксированная глубина 15 км.

Исходя из диаграммы распределения землетрясений по глубинам (рис. 9), можно отметить, что большинство землетрясений роя произошли на глубинах до 20 км, максимум приходится на 8–16 км (более 75% от общего числа анализируемых событий). И лишь отдельные события отмечаются на больших глубинах (вплоть до 40 км и глубже).

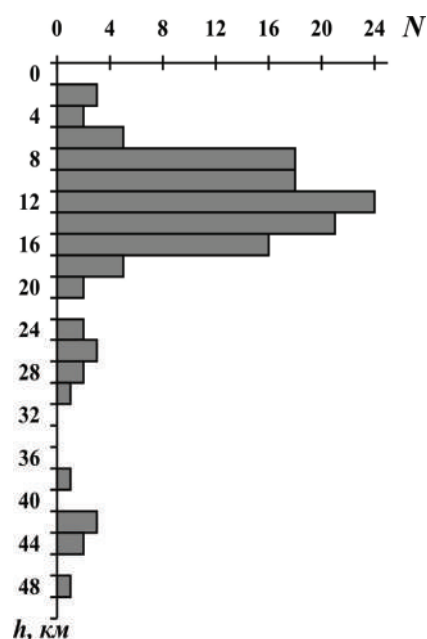


Рис. 9. Распределение землетрясений роя по глубине

анализа сейсмического режима роя (рис. 10б, в) выполнены по двум перпендикулярным направлениям вдоль и поперек облака событий. Такое представление исследуемого процесса показывает, что активизирован участок размером примерно 35 км в направлении на северо-запад (рис. 10б) и столько же на юго-запад (рис. 10в).

В рассматриваемой зоне первые три месяца 2001 г. (январь–март на рис. 8) землетрясения с  $K_p=6-8$  происходили по одному событию в месяц. За первые десять дней апреля произошло четыре слабых землетрясения. Сейсмическая активизация началась с 12 апреля, в день происходили десятки землетрясений с  $K_p=6-8$ . Самое заметное ( $K_p=10.2$ ) землетрясение этой серии возникло 12 апреля в 18<sup>h</sup>40<sup>m</sup> и было далеко не первым. Рой землетрясений плавно сместился с течением времени к северо-западу, затем вдруг расширился в своем простирании. С 19 по 22 апреля линейный размер зоны области роя был максимальным и равным 30 км. В это время произошло большое число слабых  $K_p=5-7$  землетрясений. К 23 апреля первая фаза развития роя землетрясений завершилась.

Вторая фаза развития роя происходила с 29 апреля по 13 мая и выделялась из общего хода процесса по трем параметрам – времени, пространственной приуроченности и энергетическим характеристикам. Пространственно (рис. 10) землетрясения сместились на 10–15 км к северо-востоку от эпицентров первой фазы и образовали в плане подковообразную структуру. Энергетически события этой фазы отличались от событий предыдущей тем, что происходили

Положение событий роя представлено на рис. 10а. Землетрясения происходили главным образом в Западном Саяне и образовали некоторую протяженную структуру, вытянутую в направлении с северо-запада на юго-восток, вкост простирания Саяно-Тувинского разлома, являющегося границей Западного Саяна с Тувинской котловиной. Рой землетрясений имеет три фазы развития во времени. В каждой фазе развития можно выделить наиболее крупное землетрясение. В целом активизации присуща некоторая пространственно-временная структура, для изучения которой была произведена замена одной из пространственных координат на ось времени. Для прямоугольника, охватывающего на площади все эпицентры сейсмической активизации, выбрана линия, параллельная одной из сторон, на которую проецируются землетрясения из заданной области с разворачиванием процесса во времени. Выбрав две перпендикулярные линии и выполнив проецирование на них одних и тех же данных, получим возможность анализировать один и тот же сейсмический процесс во времени и пространстве [18]. Линии сноса для пространственно-временного

преимущественно землетрясения с  $K_p=7-8$ . Наиболее сильное ( $K_p=8.5$ ) землетрясение этой серии зарегистрировано 30 апреля в 22<sup>h</sup>50<sup>m</sup>. Оно также происходит далеко не первым во второй фазе развития роя.

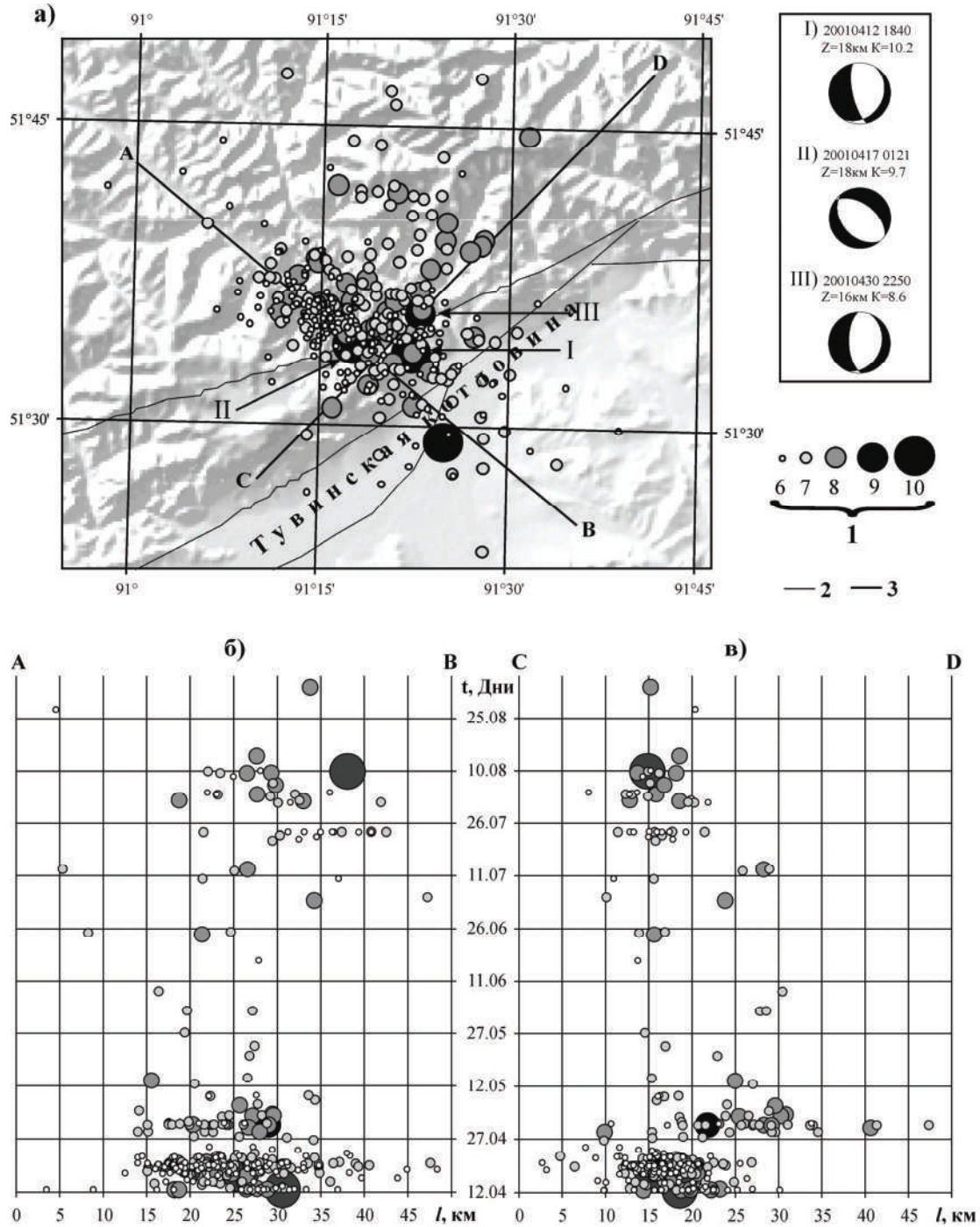


Рис. 10. Карта эпицентров землетрясений роя, стереограммы механизмов очагов крупных событий (а) и графики сейсмического режима по линиям АВ (б) и CD (в)

1 – энергетический класс  $K_p$ ; 2 – разлом; 3 – ось зоны.

Третья фаза в активизации роя протекала с 21 июля по 10 августа, когда в пространстве толчки роя совпали с местом первой фазы активизации, преимущественно в приграничной зоне с Тувинской котловиной. Третья фаза началась с облака слабых землетрясений с  $K_p=6-7$ . В дальнейшем происходили землетрясения преимущественно на уровне  $K_p=7-8$ . Сильнейшее из них с  $K_p=10.0$  отмечено 9 августа в 21<sup>h</sup>05<sup>m</sup> одним из последних.

Для трех более крупных событий роя (12, 17 и 30 апреля) удалось найти решения механизмов очагов (рис. 10, а, табл. 6).

**Таблица 6.** Параметры механизмов очагов 12 апреля в 18<sup>h</sup>40<sup>m</sup>, 17 апреля в 01<sup>h</sup>21<sup>m</sup>, 30 апреля в 22<sup>h</sup>50<sup>m</sup>

№	Дата, д м	$t_0$ , ч мин с	$h$ , км	$M_{ca}$	$K_p$	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости					
						$T$		$N$		$P$		$NP1$			$NP2$		
						$PL$	$AZM$	$PL$	$AZM$	$PL$	$AZM$	$STK$	$DP$	$SLIP$	$STK$	$DP$	$SLIP$
1	12.04	18 40 45.7	18	3.4	10.2	24	270			60	53	30	25	-50	167	71	-107
2	17.04	01 21 34.4	18	3.2	9.7	5	43			82	173	140	40	-80	307	51	-98
3	30.04	22 50 53.2	16	2.7	8.6	16	275			70	63	20	30	-70	177	62	-101

Эти решения подобны. Землетрясения возникли под действием растягивающих напряжений. Они имеют одинаковый тип движения в очаге. Это подвиги по пологим плоскостям  $NP1$  ( $DP=25, 40$  и  $30^\circ$ ) с компонентами левосторонних сдвигов. По крутопадающим плоскостям  $NP2$  ( $DP=50-71^\circ$ ) – сбросы с компонентами левостороннего сдвига. Для двух землетрясений (12 апреля в 18<sup>h</sup>40<sup>m</sup> и 30 апреля в 22<sup>h</sup>50<sup>m</sup>) положение нодальных плоскостей и осей главных напряжений практически совпадают: близгоризонтальная ось растяжения субширотная (рис. 10а). Простираение нодальных плоскостей события 17 апреля в 01<sup>h</sup>21<sup>m</sup> с  $K_p=9.7$  согласуется с направлением облака роя землетрясений.

Описываемый рой землетрясений в Аксугском блоке явление необычное. Ранее в этой зоне изредка (раз в десять лет) происходили лишь отдельные события десятого энергетического класса, но никогда не было столь массового числа слабых землетрясений, как это наблюдалось в 2001 г., а землетрясения более сильные отмечены в зоне глубинных и региональных разломов. События 2001 г. свидетельствуют о существовании значительных напряжений внутри основных блоков в структуре Западного Саяна.

Подводя итог обзора сейсмичности за год, можно в сжатой форме охарактеризовать ее следующим образом. В 2001 г. сейсмичность Алтае-Саянской горной области довольно спокойная относительно других лет. Одно-единственное землетрясение тринадцатого энергетического класса произошло в Монгольском Алтае на южном окончании Котловины Больших Озер. Землетрясений двенадцатого энергетического класса – четыре. Два из них произошли на границе России с Монголией в пределах Алтая и два других – на севере и юге Восточно-Тувинского нагорья. Значительно ниже, чем в 2000 г. [1], сейсмичность Зайсанской впадины и ее горного обрамления. Невысока сейсмичность Восточного Саяна. По числу землетрясений малых энергий, как обычно, выделяются Белино-Бусингольская зона и западные горные обрамления Тувинской котловины и Котловины Убсу-Нур (Алашское плато, хребты Шапшальский и Цаган-Шибету). Несколько повышена в 2001 г. сейсмичность вдоль горных перемычек, разделяющих Тувинскую котловину на впадины. Уникальным явлением является сейсмический рой в Аксугском блоке Западного Саяна. Сейсмически активизированы разломные структуры внутри блока, что свидетельствует о существовании значительных деформаций на уровне блочной структуры более высокого порядка, чем основные региональные блоки в структуре Западного Саяна.

## Л и т е р а т у р а

1. Еманов А.Ф., Филина А.Г., Еманов А.А., Фатеев А.В., Лескова Е.В. Алтай и Саяны // Землетрясения Северной Евразии в 2000 году. – Обнинск: ГС РАН, 2006. – С. 133–143.
2. Фатеев А.В., Филина А.Г., Кабанник А.В. Представительность и точность определения параметров эпицентров в АСОМСЭ СО РАН // Проблемы сейсмологии III-го тысячелетия: Материалы междунар. геофиз. конф., г. Новосибирск, 15–19 сентября 2003 г. – Новосибирск: Наука (СО РАН), 2003. – С. 145–15.
3. Филина А.Г., Подкорытова В.Г. (отв. сост.), Манушина О.А., Подлипская Л.А., Данциг Л.Г., Слепенкова Э.А. Региональный каталог землетрясений Алтая и Саян в 2001 г. с  $K_p \geq 4$ . – Новосибирск: Фонды АСОМСЭ, 2002. – 31 с.

4. **Bulletin of the International Seismological Centre for 2001.** – Berkshire: ISC, 2002–2003.
5. **Филина А.Г.** Землетрясения Алтая и Саян // Землетрясения в СССР в 1991 г. – М.: ОИФЗ РАН, 1997. – С. 38–39.
6. **Филина А.Г. (отв. сост.), Пугачева В.Н., Манушина О.А., Слепенкова Э.А., Ибрагимова Г.Г.** Алтай и Саяны // Землетрясения в СССР в 1991 г. – М.: ОИФЗ РАН, 1997. – С. 138–142.
7. **Новиков И.С.** Морфотектоника Алтая. – Новосибирск: СО РАН, «ГЕО», 2004. – 313 с.
8. **Новиков И.С., Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Агатова А.Р., Высоцкий Е.М., Деев Е.В.** Прогнозирование характера движений по новейшим разломам Алтая и соотношение прогнозов с перемещениями в ходе сейсмической активизации 2003 г., реконструируемым по фокальным механизмам землетрясений // Рельефообразующие процессы: теория, практика, методы исследования: Материалы XXVIII Пленума Геоморфологической комиссии РАН, г. Новосибирск, ИГ СО РАН, 20–24 сентября 2004 г. – Новосибирск: ИГ СО РАН, 2004. – С. 206–210.
9. **Лескова Е.В. (отв. сост.)** Алтай и Саяны. (См. раздел VII (Каталоги механизмов очагов землетрясений) в наст. сб. на CD).
10. **Молнар П., Курушин Р.А., Кочетков В.М., Демьянович М.Г., Борисов В.А., Ващилов Ю.Я.** Деформация и разрывообразование при сильных землетрясениях в Монголо-Сибирском регионе // Глубинное строение и геодинамика Монголо-Сибирского региона. – Новосибирск: Наука, 1995. – С. 5–55.
11. **Дельво Д., Теннисен К., Ван-дер-Мейер Р., Берзин Н.А.** Динамика формирования и палеостресс при образовании Чуйско-Курайской депрессии Горного Алтая: тектонический и климатический контроль // Геология и геофизика. 1995. – **36.** – № 10. – С. 109–122.
12. **Зеленков П.Я.** Сейсмогенные деформации земной поверхности Западного Саяна // Сейсмогеология восточной части Алтае-Саянской горной области. – Новосибирск: Наука (СО РАН), 1978. – С. 28–42.
13. **Масарский С.И., Рейснер Г.И.** Новейшие тектонические движения и сейсмичность Западного Саяна и Западной Тувы. – М.: Наука, 1971. – 154 с.
14. **Чернов Г.А.** К изучению сейсмогеологии и неотектоники Алтае-Саянской горной области // Сейсмогеология восточной части Алтае-Саянской горной области. – Новосибирск: Наука (СО РАН), 1978. – С. 6–27.
15. **Чернов Г.А., Зеленков П.Я.** Сейсмогеология области западно-тувинских поднятий // Сейсмогеология восточной части Алтае-Саянской горной области. – Новосибирск: Наука (СО РАН), 1978. – С. 58–68.
16. **Зятькова Л.К.** Новейшая тектоника Западного Саяна. – Новосибирск: Наука (СО РАН), 1973. – 174 с.
17. **Кочетков В.М., Боровик Н.С., Мишарина Л.А., Солоненко А.В., Аниканова Г.В., Солоненко Н.В., Мельникова В.И., Гилёва Н.А.** Ангароканский рой землетрясений в Байкальской рифтовой зоне. – Новосибирск: Наука (СО РАН), 1987. – 81 с.
18. **Ризниченко Ю.В.** Изучение хода сейсмического режима во времени // Методы детального изучения сейсмичности (Тр. ИФЗ АН СССР, № 9 (176)). – М.: ИФЗ АН СССР, 1960. – С. 232–246.