

АФТЕРШОКИ СКОВОРОДИНСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 14 октября 2011 г.

с $M_w=6.0$ по ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ в ЭПИЦЕНТРАЛЬНОЙ ЗОНЕ

В.В. Быкова, Р.Н. Вакарчук, И.В. Матвеев, А.Г. Михин,

Л.Д. Николаев, Р.Э. Татевосян

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

Введение. В Восточной Сибири 14 октября 2011 г. в 06^h10^m произошло землетрясение с магнитудой $M_w=6.0$ [1] примерно в 15 км к северо-западу от г. Сковородино. Это землетрясение является крупнейшим инструментально зарегистрированным сейсмическим событием в Восточной Сибири.

Согласно региональному каталогу [2], включающему 1290 землетрясений с $M \geq 3.0$ с 1962 г., в зоне Сковородинского землетрясения максимально зарегистрированная магнитуда в 50-км окрестности эпицентра составляла $M_{\max}=4.1$, а в 100-км окрестности – $M_{\max}=4.6$. Сильные землетрясения происходят на значительном удалении от эпицентра Сковородинского землетрясения, около 250 км к северо-западу, в зоне северо-восточного синтаксиса Байкальского рифта.

Еще до Сковородинского землетрясения с июля 2011 г. Институт физики Земли РАН проводил временные сейсмологические наблюдения сетью станций в Восточной Сибири. Благодаря этому удалось зарегистрировать главный толчок и афтершоки локальной сетью сейсмических станций. Главный толчок был записан 27 станциями временной сети. Ближайшая станция ТТМ была расположена на расстоянии 21 км от эпицентра ($t_S-t_P=2.7$ с).

После главного толчка некоторые станции локальной сети были перемещены для того, чтобы обеспечить лучшее азимутальное покрытие очаговой области. За три месяца наблюдений после Сковородинского землетрясения было зарегистрировано более 1300 афтершоков. В статье [3] проведен всесторонний анализ пространственно-временных особенностей афтершоковой последовательности. Подробно описана процедура построения скоростной модели для локации гипоцентров. Основной целью настоящей статьи является публикация каталога афтершоков [4], который никогда ранее не был опубликован.

Система наблюдений. ИФЗ РАН организовал временные сейсмологические наблюдения сейсмичности с целью уточнения исходных данных для оценки сейсмической опасности участка «Ленск-Сковородино» проектируемого магистрального газопровода «Якутия–Хабаровск–Владивосток» летом 2011 г. Конфигурация сети была оптимизирована под эту задачу. Выбор конкретных мест размещения представлял собой сложную задачу. Несмотря на то, что полевые работы выполнялись в благоприятное для данного района время года, доступность мест, возможности использования колесного транспорта и т.п. оказались гораздо хуже ожидаемых, что существенно затрудняло установку станций. Тем не менее, 46 станций были установлены вдоль двух альтернативных трасс газопровода на участке «Ленск-Сковородино». Они надежно контролировали достаточно большую территорию. С конца июля по октябрь 2011 г. (2.5 месяца наблюдений) были зарегистрированы и определены координаты 160 землетрясений в интервале магнитуд от 1.0 до 3.6 (рис. 1).

При проведении измерений сейсмических колебаний использовались велосиметры КМВ (производство ИФЗ) и ЗС-Geophone (производство Китая и Голландии), а также цифровые сейсмические регистраторы СЕЙСАР (разработка и изготовление ИФЗ РАН) и Байкал (изготовитель Институт лазерной физики, Новосибирск).

Общее представление о внешнем виде станций дает рис. 2. На рис. 2 а показана станция STRM, укомплектованная датчиком ЗС-Geophone и регистратором СЕЙСАР, а на рис. 2 б – станция LES, состоящая из велосиметра КМВ и регистратора СЕЙСАР. На рисунке видны также аккумуляторы, обеспечивающие автономное функционирование станций.

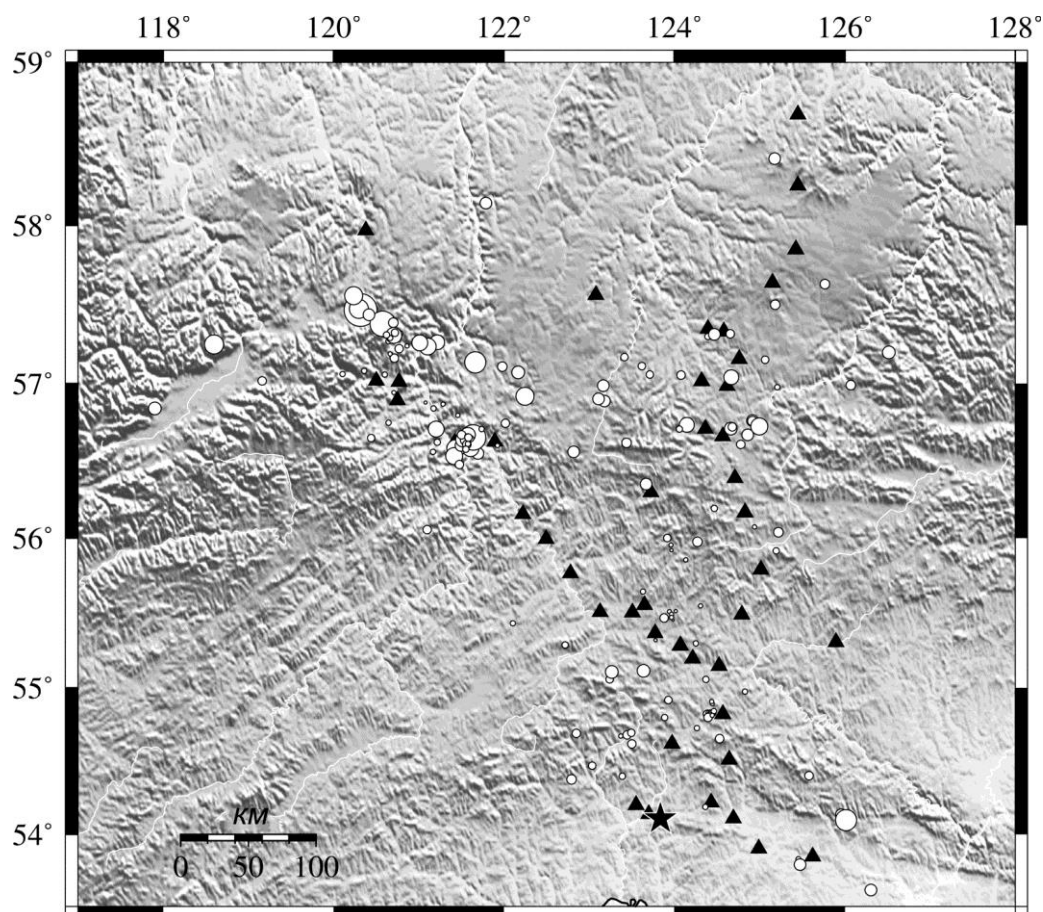


Рис. 1. Полевая сеть ИФЗ РАН (треугольники) и эпицентры землетрясений (кружки) с 26 июля 2011 г. до главного толчка (показан звездочкой)

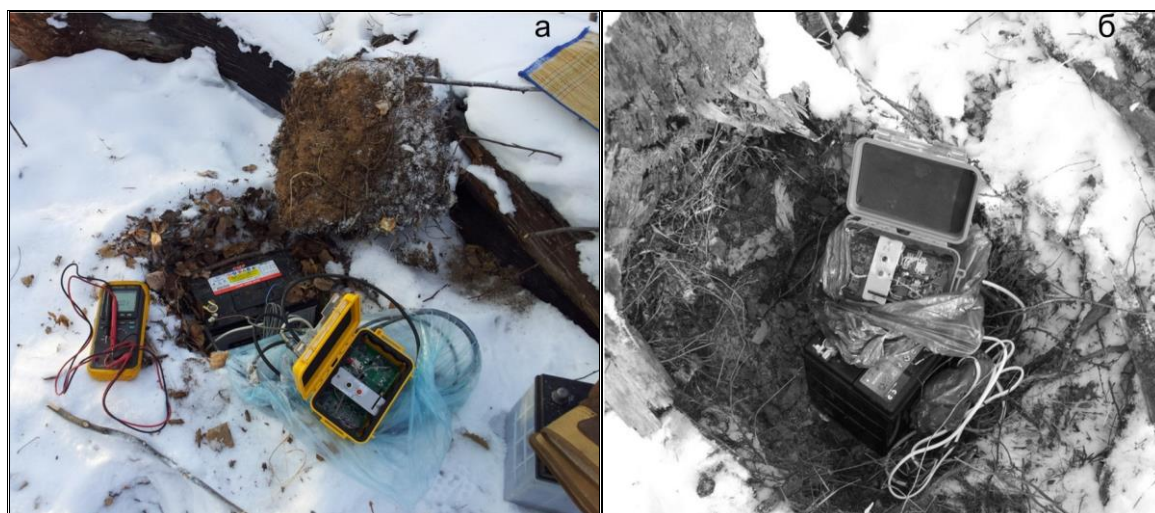


Рис. 2. Станции SRTM (а) и LES (б) в эпицентральной зоне Сковородинского землетрясения

В течение первых трех дней после главного толчка сеть была оптимизирована для регистрации афтершоков. Реорганизованная сеть начала полноценно функционировать с 18 октября. Окончательная конфигурация сети станций ИФЗ РАН в эпицентральной зоне показана на рис. 3.

В определении координат гипоцентров афтершоков, особенно сильных, участвовали записи и более далеких станций. В табл. 1 даны координаты всех станций, записи которых использовались в определении гипоцентров, а также общее количество вступлений *P*- и *S*-волн на различных станциях.

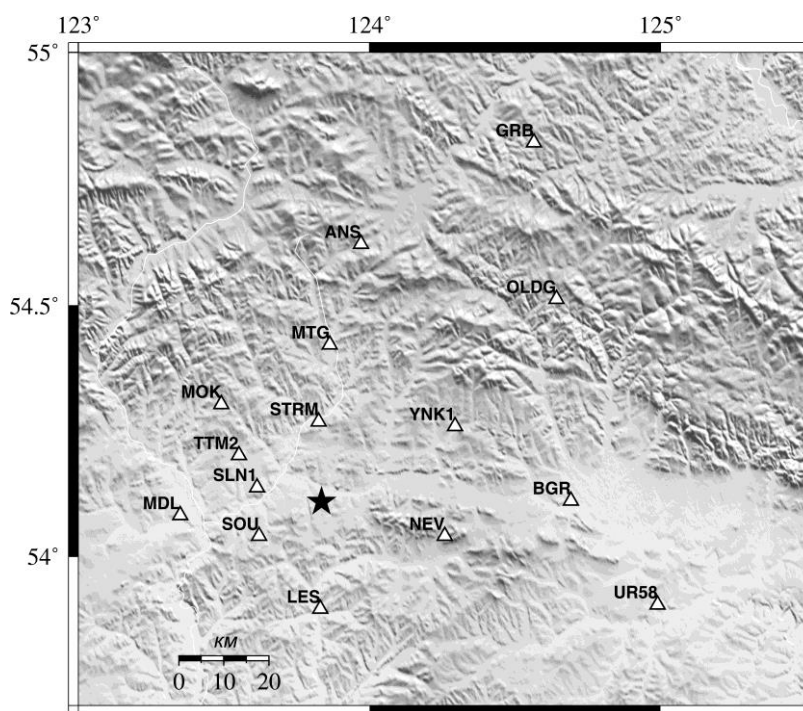


Рис. 3. Карта расположения сейсмических станций (звездочка – эпицентр главного толчка)

Таблица 1. Сейсмические станции, записи которых использовались для локации событий, и общее количество снятых фаз

Код станции	Координаты			Количество фаз	
	φ°, N	λ°, E	$h_y, м$	<i>P</i>	<i>S</i>
ANS	54.6227	123.9705	780	47	19
BGR	54.1123	124.6918	410	128	104
BRK	56.3914	124.7104	960	29	16
CHIL	55.9923	122.4955	660	27	17
DUL	55.5541	123.6469	610	97	61
GRB	54.8229	124.5643	800	108	76
HTNP	57.3332	124.5822	920	3	
KTK	55.2878	124.0702	680	25	6
LAR	55.5083	123.1257	620	86	35
L14N	55.1474	124.5260	560	16	9
LES	53.8947	123.8308	390	840	841
LOP	55.7663	122.7814	560	42	15
MAR1	55.3088	125.8948	630	7	
MDL	54.0829	123.3494	405	250	249
MOK	54.3050	123.4905	605	387	387
MST	56.6205	121.4189	450	11	3
MTG	54.4231	123.8630	490	7	6
NEV	54.0410	124.2591	659	719	791
NMRK	56.6268	121.8932	900	3	
NUKJ	56.2941	122.0444	470	4	2
NGR	55.7907	125.0172	904	18	
OLDG	54.5135	124.6417	740	147	81
SLN1	54.1386	123.6137	460	857	844
SOU	54.0414	123.6210	540	909	938
STRM	54.2702	123.8260	460	132	135
TTM2	54.2027	123.5509	460	1035	1040
UNG	57.3504	124.3920	820	10	3
URF	53.8497	125.6232	340	115	41
UR58	53.9036	124.9891	410	427	398
YNK1	54.2609	124.2945	570	505	500
YUK	56.6166	121.6359	480	6	
ZLT	56.1683	124.8269	920	9	3

Каталог афтершоков. Процедура определения координат главного толчка и афтершоков подробно описана в работе [3]. Плотная сеть станций в эпицентральной зоне и большое количество зарегистрированных повторных толчков (более 1300 событий за три месяца наблюдений) позволили уточнить скоростную модель среды (табл. 2) и определить с высокой точностью координаты и глубину гипоцентров афтершоков.

Таблица 2. Скоростная модель среды

$h, км$	0.00	2.00	5.00	7	15	25	35	50
$v_P, км/с$	3.92	5.35	5.70	5.80	5.86	5.96	6.72	8.44
$v_S, км/с$	2.40	3.02	3.31	3.32	3.42	3.55	4.08	4.20

Уточненные время и координаты главного толчка: $t_0=06^h10^m12.71^s$; 54.105°N , 123.779°E ; глубина $h=15.4$ км. Моментная магнитуда $M_w=6.0$ принята в соответствии с [1].

Для всех афтершоков была рассчитана моментная магнитуда по методике, описанной в [5]. Для расчета спектров использовались следующие участки записи: для вертикальной компоненты выбирался участок P -волны от $t_p-0.5$ с до $t_p+2/3(t_s-t_p)$; для горизонтальных компонент – участок S -волны от $t_s-0.5$ с до $t_s+2(t_s-t_p)$. В процессе расчетов из всех записей удалялись частотные характеристики приборов. Записи были отфильтрованы в полосе $f=0.2-20$ Гц. Полученные спектры аппроксимировались в двойном логарифмическом масштабе двумя прямыми: постоянной амплитуды в низкочастотной области и спадающей в соответствии с f^{-2} для $f > f_c$. Наилучшее согласие рассчитанных спектров с моделью давало одновременно амплитуду низкочастотной области спектра и угловую частоту. Далее по амплитуде низкочастотной области спектра рассчитывался сейсмический момент и моментная магнитуда. Значения магнитуды, указанные в каталоге, являются средним значением для всех участков записей для всех станций, записи которых использовались при расчетах.

На рис. 4 показаны карта эпицентров афтершоков с $M \geq 1$ и разрезы по глубине. Как отмечено выше, полный каталог афтершоков Сковородинского землетрясения с 14 октября 2011 г. по 10 января 2012 г. ($N=1063$) приведен в Приложении [4].

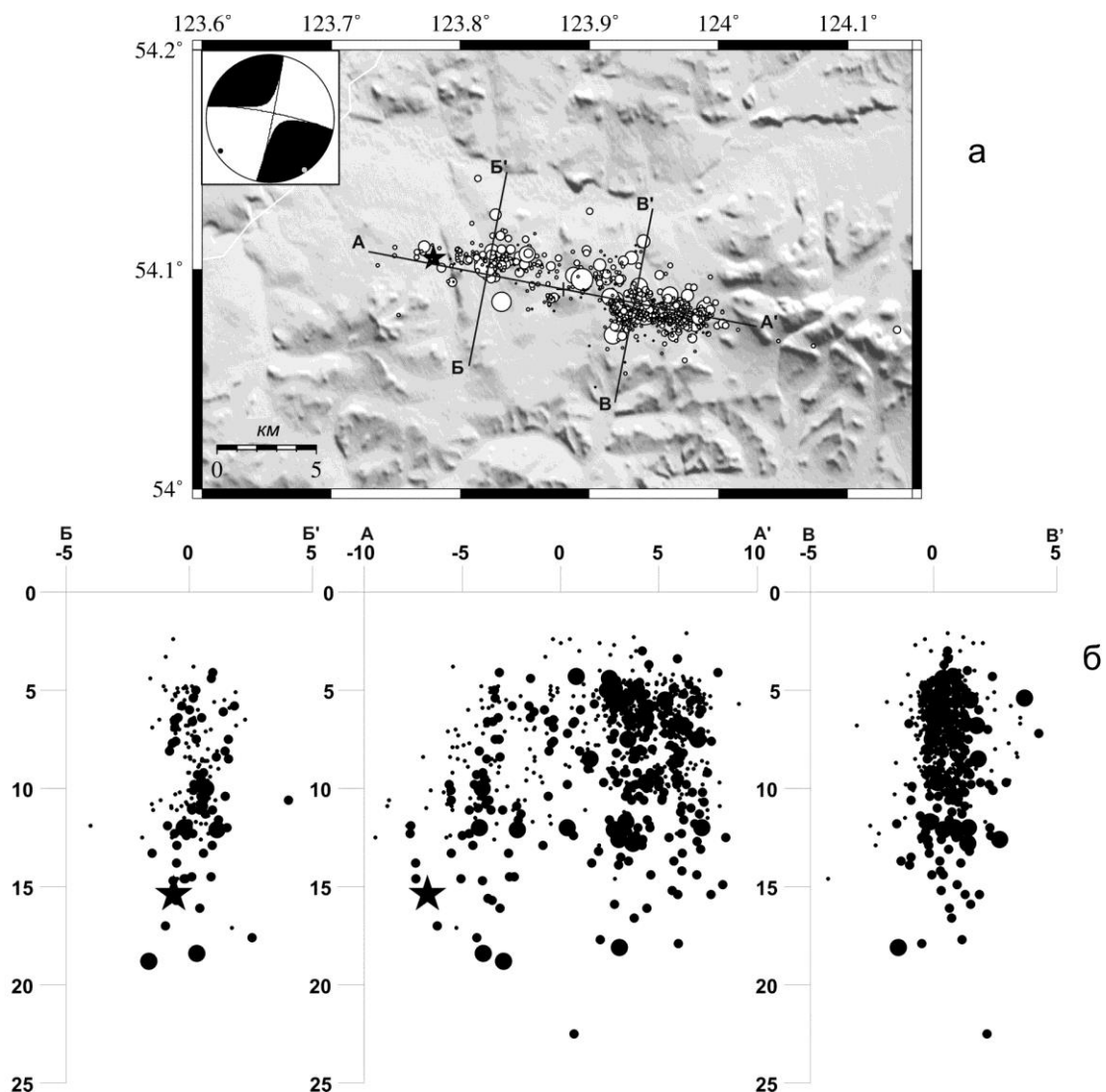


Рис. 4. Карта эпицентров афтершоков Сковородинского землетрясения 14 октября 2011 г. с $M_w=6.0$ (а) и вертикальные проекции на плоскости Б–Б', А–А' и В–В'(б)

Масштаб на карте, а также вертикальный и горизонтальный масштабы на разрезах одинаковы. Звездочка – положение главного толчка; кружки – эпицентры афтершоков (представительные события). Крестиком на карте разделены скопления афтершоков в восточной и западной части очаговой зоны из [3].

На рис. 5 показаны графики выделившейся сейсмической энергии и числа зарегистрированных событий за время наблюдений.

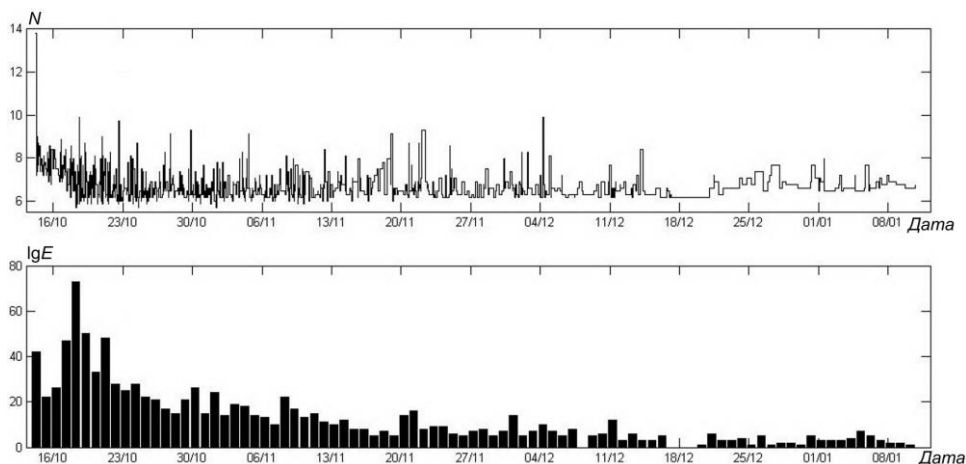


Рис. 5. Выделившаяся сейсмическая энергия и количество зарегистрированных событий с 14 октября 2011 г. по 10 января 2012 г.

Из этого графика видно, что реорганизация сети, выполненная для регистрации афтершоков, позволила значительно улучшить полноту каталога афтершоков. Так всплеск афтершоковой активности 18 октября, когда было зарегистрировано более 70 толчков, совпадает с началом полноценного функционирования реорганизованной сети. То, что активность была высока и до этого времени, показывает рис. 6. На нем приведена запись 10-минутного интервала времени 14 октября от 06^h30^m до 06^h40^m на ближайшей к эпицентру станции ТТМ (начало интервала через 20 минут после главного толчка). На записи выделяется не менее 29 землетрясений, но на относительно далеких станциях сейсмические колебания от этих событий накладываются друг на друга и их обработка невозможна. Поэтому ни один из афтершоков, идентифицируемых на рис. 6, в каталог не попал, поскольку по данным только следовательности необходимо помнить, что настоящий каталог неоднороден во времени: с 14 до 18 октября вероятность пропуска слабых афтершоков высока.

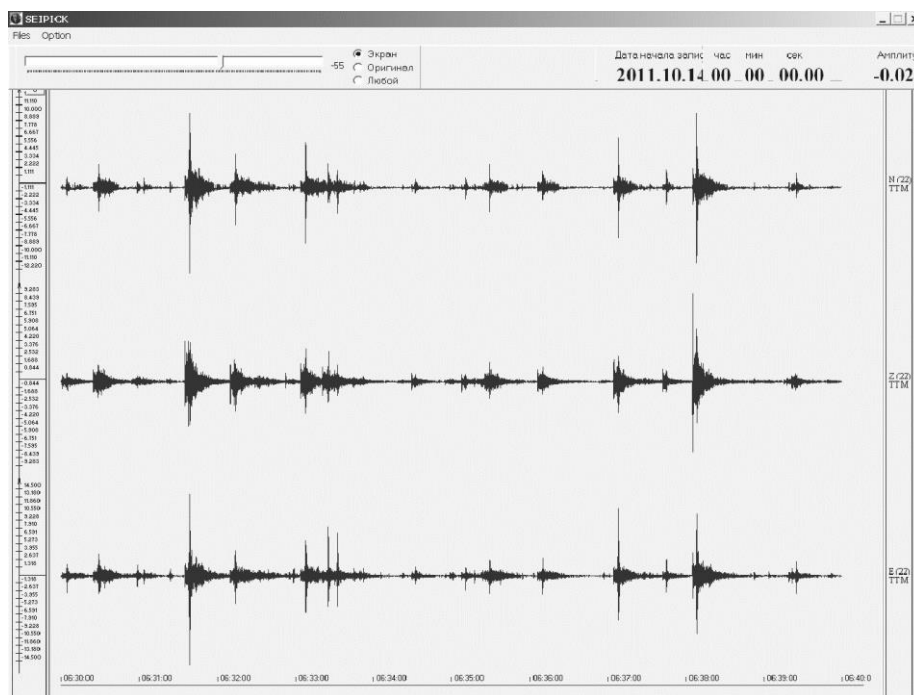


Рис. 6. 10-минутный интервал времени (от 06^h30^m до 06^h40^m 14.10.2011 г.) на ближайшей к эпицентру станции ТТМ (начало интервала через 20 минут после главного толчка)

Пространственное распределение эпицентров афтершоков на рис. 4 показывает, что эпицентры расположены компактно в пространстве; они концентрируются вдоль субширотного направления с азимутом простирания 284° . Это направление практически совпадает с азимутом простирания одной из нодальных плоскостей в механизме очагов [1]. Протяженность облака в этом направлении составляет около 20 км, что соответствует среднемировым зависимостям для землетрясения магнитуды $M_w=6.0$ [6].

В поперечном направлении размер облака равен 8 км, а подавляющее большинство эпицентров сосредоточено в полосе, не превышающей по ширине 6 км. На карте эпицентров выделяются два основных кластера: западный (где расположен главный толчок) и восточный (в нем расположено большинство афтершоков). По глубине гипоцентры расположены также очень компактно от 2 до 20 км. На разрезе вдоль плоскости простирания видно, что гипоцентры в западной части очаговой области расположены на больших глубинах с $h>10$ км, чем в восточной с $h=5-8$ км. Глубина основного толчка составляет $h_{глт.}=15.4$ км.

Пространственное распределение афтершоков согласуется не только с одной из нодальных плоскостей в механизме очагов, но и с пространственным распределением макросейсмического эффекта в эпицентральной зоне. В статье [7] показано, что наблюдаемый макросейсмический эффект имеет ярко выраженную субширотную ориентацию.

Заключение. Действовавшая на момент главного толчка Сковородинского землетрясения в Восточной Сибири временная сеть ИФЗ РАН и ее оптимизация для регистрации афтершоков позволила получить уникальный по полноте сейсмологический материал. Для сравнения укажем, что в базе данных Международного сейсмологического центра [8] за тот же период времени есть сведения всего о 3 землетрясениях из эпицентральной области Сковородинского землетрясения (собственные определения ISC). Еще о 17 землетрясениях сведения в базе данных ISC приведены по данным агентства SKHL (Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, 2 Tihookeanskaya, Yuzhno-Sakhalinsk, 693010, Russia).

Л и т е р а т у р а

1. Global CMT Catalog Search. – URL: <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>.
2. Геофизическая служба Российской академии наук. – URL: <http://eqru.gsrus.ru>.
3. Быкова В.В., Татевосян Р.Э., Николаев Л.Д., Михин А.Г., Мокрушина Н.Г. Сковородинское землетрясение 2011 г. // Физика Земли. – 2015. – № 1. – С. 112–127.
4. Быкова В.В., Вакарчук Р.Н., Матвеев И.В., Михин А.Г., Николаев Л.Д., Татевосян Р.Э. (ИФЗ РАН) (отв. сост.). Каталог афтершоков Сковородинского землетрясения 14 октября 2011 г. с $M_w=6.0$ по записям сети наблюдений ИФЗ РАН в его эпицентральной зоне (14 октября 2011 г. – 10 января 2012 г.) // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – Приложение на CD-ROM.
5. Мельникова В. И., Гилёва Н.А., Арефьев С.С., Быкова В.В., Масальский О.К. Култукское землетрясение 2008 г. с $M_w=6.3$ на юге Байкала: пространственно-временной анализ сейсмической активизации. – Физика Земли. – 2012. – № 7–8. – С. 47–62.
6. Wells D.L. and Coppersmith K.J. New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1994. – 84. – N 4. – P. 974–1002.
7. Овсяченко А.Н., Мараханов А.В., Вакарчук Р.Н., Ларьков А.С., Новиков С.С., Рогожин Е.А. Геологические и макросейсмические проявления землетрясения 16 октября 2011 г. в Сковородинском районе Амурской области // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2012. – 39. – № 4. – С. 5–18.
8. International Seismological Centre, On-line Bulletin, not reviewed, Thatcham, United Kingdom, 2013. – URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>.