

Район архипелага Шпицберген

В.Э. Асминг, С.В. Баранов, С.И. Петров

Кольский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Апатиты

Введение

Кольский филиал (КоФ) ФИЦ ЕГС РАН осуществлял мониторинг сейсмичности района архипелага Шпицберген с помощью региональной сети сейсмических станций (рис. III.14, табл. III.3): BRBA и BRBB (сеть KOGSR, КоФ ФИЦ ЕГС РАН, см. также табл. I.12 [1]); KBS (сеть IU, IRIS); SPITS (сеть NO, NORSAR); HSPB (сеть PL, Институт геофизики Польской академии наук); VJO1 (сеть NS, Университет Бергена).

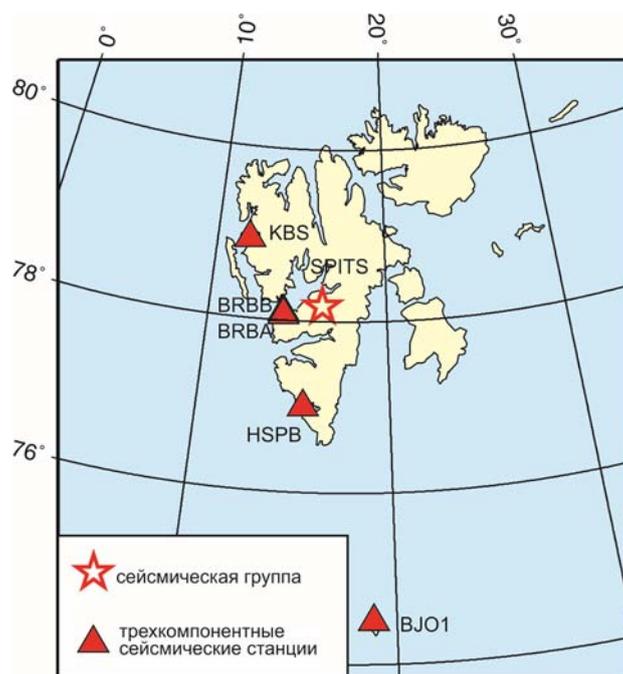


Рис. III.14. Сейсмические станции в районе архипелага Шпицберген

Таблица III.3. Сведения о сейсмических станциях в районе архипелага Шпицберген

№	Сейсмическая станция			Дата открытия	Координаты и высота над уровнем моря			Подпочва	Тип оборудования
	Название станции и код сети	Код			φ, °N	λ, °E	h, м		
		международный	региональный						
1	Баренцбург А (Barentsburg A) KOGSR	BRBA	BRBA	01.01.2001	78.059	14.217	58	Скальные метасадочные породы	CMG-3ESPC
2	Баренцбург Б (Barentsburg B) KOGSR	BRBB	BRBB	01.01.2001	78.094	14.208	80	Скальные метасадочные породы	CMG-3ESPC
3	Hornsund PL	HSPB	HSPB	2010	77.002	15.533	11	Скальные метасадочные породы	
4	Spitsbergen Array NO	SPITS	SPITS	1992	78.178	-16.370	323	Скальные метасадочные породы	
5	Kingsbay IU	KBS	KBS	1967	78.926	11.942	90	Скальные метасадочные породы	
6	Vjornoya NS	VJO1	VJO1	1998	74.502	18.999	18	Скальные метасадочные породы	

Данные со всех станций Шпицбергена поступают в РИОЦ Кольского филиала ФИЦ ЕГС РАН в г. Апатиты в режиме, близком к реальному времени, где с помощью специально разработанного программного обеспечения [2] выполняется обнаружение, локация и определение энергетических параметров сейсмических событий.

В 2016 г. в районе архипелага Шпицберген и прилегающей акватории (область с координатами $\varphi=72-85^{\circ}\text{N}$ и $\lambda=8^{\circ}\text{W}-40^{\circ}\text{E}$) было зарегистрировано 871 землетрясение с магнитудами M (ML) от 1.5 до 5.1 (рис. III.15).

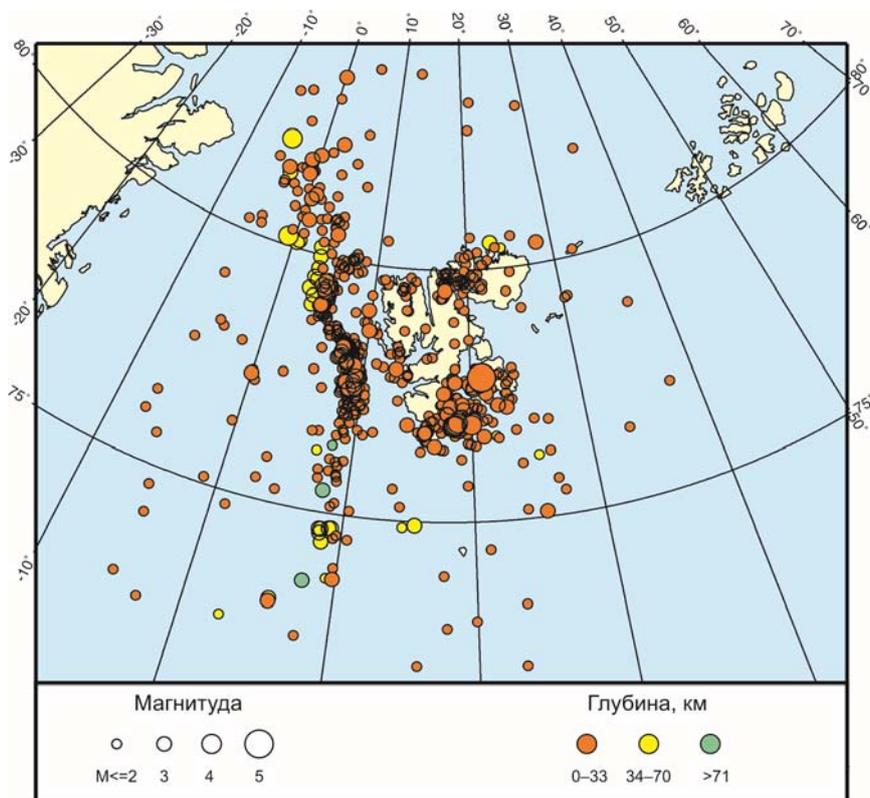


Рис. III.15. Карта эпицентров землетрясений с $ML \geq 1.5$ в районе архипелага Шпицберген и прилегающей акватории в 2016 г.

В электронный вариант каталога землетрясений района архипелага Шпицберген (область с координатами $\varphi=76-81^{\circ}\text{N}$ и $\lambda=10-29^{\circ}\text{E}$) включено 447 событий с $M=1.5-5.1$ [3], печатный вариант содержит параметры 87 землетрясений с $M \geq 2.5$ [4].

Распределение землетрясений 2016 г. по сейсмогенным зонам

Распределение землетрясений по сейсмогенным зонам с учетом магнитуд приведено в табл. III.4. В 2016 г. землетрясения с $ML > 3$ происходили на хребтах Мона, Книповича, Гаккеля, а также Шпицбергенской зоне разломов (ШЗР), расположенной в северной части хребта Книповича (рис. III.15, табл. III.4). Сейсмичность этих территорий связывают с ультрамедленным спредингом океанического дна вдоль хребтов [5–8]. Вместе с тем, согласно данным о тензорах сейсмического момента сильных землетрясений, значительный вклад в сейсмичность этих хребтов также вносит смещение Евразийской плиты относительно Северо-Американской [9].

Окраина Баренцевоморского шельфа является практически асейсмичной за исключением зоны в проливе Стур-фиорд, где в 21.02.2008 г. произошло сильнейшее за всю историю инструментальных наблюдений на шельфе Баренцева моря землетрясение с $M_w=6.1$, вызвавшее сильнейший афтершоковый процесс [10, 11]. К настоящему времени сейсмическая активность района пролива Стур-фиорд все еще не вернулась к уровню до 2008 года. В 2016 г. эта зона являлась наиболее активной – зарегистрировано

два землетрясения с $ML \approx 5$ (табл. III.4). Эти события примечательны тем, что они имели близкие магнитуды, причем второе событие произошло через 27 с после первого в том же самом месте. Географическая и временная близость этих землетрясений привела к наложению записей этих событий на сейсмограммах и явилась причиной того, что второе событие отсутствует в каталогах мировых агентств, за исключением каталога Кольского филиала ФИЦ ЕГС РАН [3, 4]. Ниже рассматриваются особенности волновых форм этих землетрясений, методика определения координат гипоцентров, а также деформация в очаге первого толчка.

Таблица III.4. Распределение землетрясений с $ML \geq 2$, зарегистрированных в районе Шпицбергена и соседних сейсмогенных зонах в 2016 г.

Зона	Количество землетрясений, ML				Энергия E , Дж
	2.0–2.9	3.0–3.9	4.0–4.9	5.0–5.9	
Баренцево море	27	3	0	0	$1.94 \cdot 10^{10}$
Гренландское море	39	5	0	0	$3.62 \cdot 10^{10}$
К северу от Шпицбергена	1	0	0	0	$7.92 \cdot 10^8$
Норвежское море	4	0	0	0	$1.03 \cdot 10^9$
Северный Ледовитый океан	8	0	0	0	$2.04 \cdot 10^9$
Архипелаг Шпицберген	25	0	0	0	$4.36 \cdot 10^9$
Остров Ян-Майен	1	0	0	0	$6.03 \cdot 10^7$
Пролив Стур-фиорд	107	28	1	2	$2.59 \cdot 10^{13}$
Хребет Гаккеля	3	0	1	0	$1.60 \cdot 10^{11}$
Хребет Книповича, северная часть	37	15	1	0	$4.92 \cdot 10^{11}$
Хребет Книповича, южная часть	10	3	0	0	$2.32 \cdot 10^{10}$
Хребет Книповича, средняя часть	35	3	0	0	$4.05 \cdot 10^{10}$
Хребет Мона	5	1	0	0	$1.23 \cdot 10^{10}$

Определение параметров двух сильнейших землетрясений 29 марта 2016 г. в проливе Стур-фиорд и особенности сейсмограмм

Определение гипоцентра первого землетрясения 29.03.2016 г. выполнялось по первым вступлениям P -волн с использованием данных десяти станций, включая станции на Шпицбергене (рис. III.14), а также станцию ARCES (NORSAR), расположенную в Северной Норвегии, и станции PRYB, TER, APA (КоФ ФИЦ ЕГС РАН), расположенные в Мурманской области. Время в очаге – $10^{\text{h}}32^{\text{m}}09^{\text{s}}$, координаты гипоцентра – 77.859°N и 21.026°E , глубина очага – 27 км. Расстояние до эпицентра NEIC [12] составляет 16 км.

Тщательная обработка и интерпретация сейсмических фаз, выделенных с помощью полосовой фильтрации (2–10 Гц) и поляризационного анализа, позволили обнаружить через 27 с после основного толчка на записи каждой станции сейсмическую фазу, которая была отнесена к P -волне второго толчка. Вступление S -волны от второго события выделялось также в диапазоне частот 2–10 Гц на записях станций, удаленных не более, чем на 250 км от эпицентра (рис. III.16, III.17).

Определение магнитуды второго толчка затруднено, поскольку фазы сейсмических волн перекрываются кодами волн первого землетрясения (рис. III.17). Однако локальная магнитуда была определена по S -волнам ближних станций. На станции HSPB (165 км от эпицентра) амплитуда S -волны второго события меньше, чем первого, что может свидетельствовать о разной ориентации источника. По соотношению максимальных амплитуд S -волн и совпадению их периодов сделано предположение, что магнитуды первого и второго землетрясений близки, а плоскости разрыва в очагах имеют разную ориентацию.

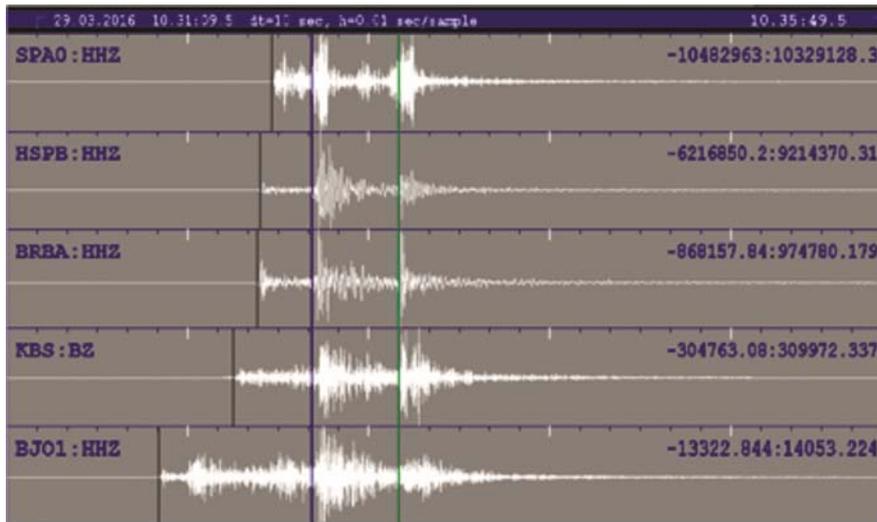


Рис. III.16. Сейсмограммы с записью землетрясений 29.03.2016 г., выравненные по времени вступления S-волн на станции.
Черные и синие вертикальные прямые – вступления P- и S-волн первого события, зеленая вертикальная прямая – S-фаза второго события

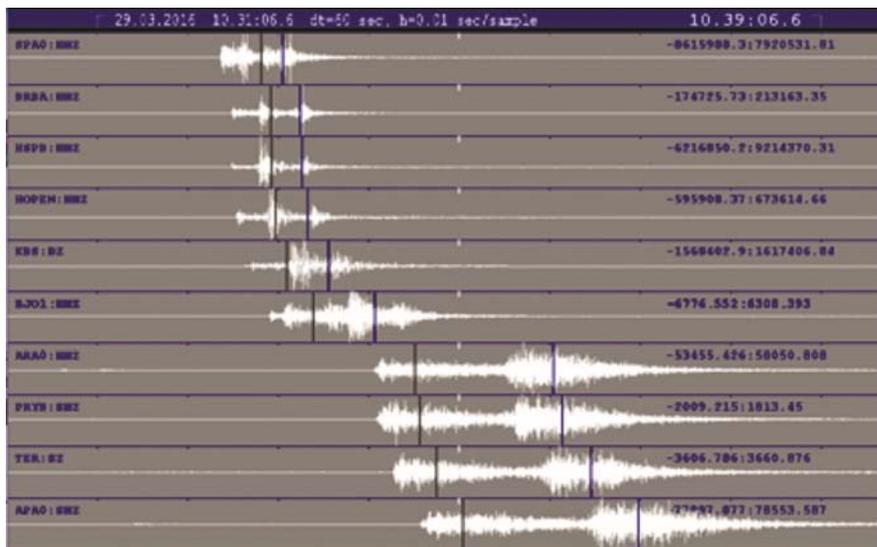


Рис. III.17. Сейсмограммы станций сети Шпицбергена с записью второго события 29.03.2016 г. в 10^h32^m36^s, сортированные по времени прихода сейсмических волн.
Черные прямые – рассчитанные вступления P-волн; синие прямые – рассчитанные вступления S-волн

Деформации в очаге первого землетрясения 29.03.2016 г. в 10^h32^m09^s

Тип деформации в очаге землетрясения (сдвиг, растяжение или сжатие) можно определить с помощью коэффициента Лоде-Надаи:

$$LN=3V_2/(V_1-V_3) \quad (0 \leq LN \leq 1), \tag{1}$$

где $V_1 \geq V_2 \geq V_3$ – собственные числа тензора. При $LN=0$ имеет место простой сдвиг, двухдипольный источник, при $LN=1$ (-1) – одноосное растяжение (сжатие), недвухдипольный источник. Тип деформации и тип фокального механизма – это разные понятия. Тип фокального механизма характеризуется направлением подвижки (угол rake) вдоль плоскости разрыва при двухдипольном источнике. Тип деформации (сдвиг, растяжение, сжатие) характеризует деформацию малого объема среды в очаге, при этом одноосное растяжение (сжатие) не может быть описано парой сил в виде двойного диполя.

Применение коэффициента LN без учета ошибок компонент тензора сейсмического момента часто приводит к ложному определению типа источника [13].

Рассчитав методом Монте-Карло коэффициент LN (1) с учетом стандартных ошибок компонент тензора (табл. III.5), получим распределение, близкое гауссовому со средним -0.5 и стандартным 0.05 отклонением. То есть значения LN значимо отклоняются от 0, половина сейсмического момента вызвана деформацией сжатия, а другая половина – сдвигом вдоль плоскости разрыва.

Таблица III.5. Значения компонент тензора сейсмического момента землетрясения 29.03.2016 г. в $10^{\text{h}}32^{\text{m}}09^{\text{s}}$, $M_w=5.2$ по данным каталога GCMТ [14]

	M_{RR}	M_{TT}	M_{PP}	M_{RT}	M_{RP}	M_{TP}
Значение компоненты	-0.232	0.828	-0.59	0.106	0.042	0.023
Стандартная ошибка	0.019	0.02	0.013	0.03	0.027	0.012

Очаги с недвухдипольным источником возникают в областях с вулканизмом. Другой причиной недвухдипольного источника является сложное строение очаговой зоны – имеются две или более плоскости разрыва [15]. Примером такого очага является Рачинское землетрясение 1991 г. с $MS=6.9$ [16].

При определении по знакам первых вступлений P -волн механизма очага, значимо отклоняющегося от двойного диполя, при определении нодальных плоскостей должна возникать неопределенность, вызванная перемешиванием положительных и отрицательных знаков на стереографической проекции. Вместе с тем, при определении механизма очага первого землетрясения 29.03.2016 г. в $10^{\text{h}}32^{\text{m}}09^{\text{s}}$ нодальные плоскости определяются без затруднений (рис. III.18).

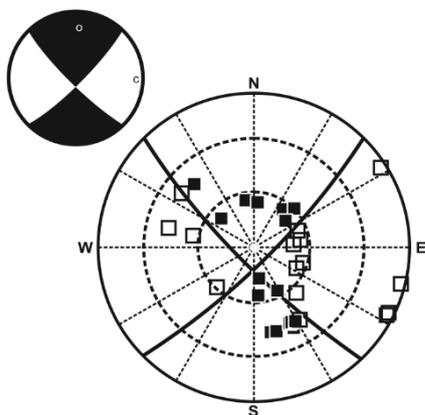


Рис. III.18. Определение механизма очага землетрясения 29.03.2016 г. в $10^{\text{h}}32^{\text{m}}09^{\text{s}}$ по знакам первых вступлений по программе А.В. Ландера [17]

При расчете компонент тензора сейсмического момента в каталоге GCMТ с помощью моделирования полного волнового пакета [18] наложение волн от разных событий, имеющих различную ориентацию плоскостей разрыва, искажает значение компонент тензора и увеличивает стандартные ошибки. Таким образом, отклонение очага первого землетрясения вызвано не строением очаговой зоны, а наложением волн от второго события на волны первого события.

Отметим, что рассчитать тензор сейсмического момента или хотя бы механизма очага для второго землетрясения невозможно из-за наложения волновой картины первого и второго землетрясений.

Заключение

Впервые в ежегоднике «Землетрясения России» представлены результаты сейсмических наблюдений станциями Кольского филиала ФИЦ ЕГС РАН на архипелаге Шпицберген.

Определены параметры двух сильнейших землетрясений 29 марта 2016 г. в проливе Стур-фиорд. Установлено, что через 27 с после землетрясения с $ML=5.1$ в $10^{\text{h}}32^{\text{m}}09^{\text{s}}$ в том же самом месте произошло второе землетрясение с близкой магнитудой, сведения

о котором отсутствуют в каталогах мировых агентств, за исключением каталога КоФ ФИЦ ЕГС РАН [3, 4]. С помощью решения прямой задачи были определены моменты прихода сейсмических волн от второго землетрясения на станции сети. Показано, что отклонение очага первого землетрясения от двойного диполя вызвано перекрытием волн первого и второго землетрясений.

Литература

1. *Пойгина С.Г., Болдырева Н.В., Баранов С.В., Конечная Я.В., Антоновская Г.Н.* Результаты сейсмического мониторинга различных регионов России. Арктика // Землетрясения России в 2016 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 29–31.
2. *Асминг В.Э., Федоров А.В.* Возможности применения автоматического детектора-локатора сейсмических событий по одиночной станции для детальных сейсмологических наблюдений // Сейсмические приборы. – 2014. – Т. 50, № 3. – С. 19–23.
3. *Part_IV-2016_16_Svalbard_2016.xls* // Землетрясения России в 2016 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – Приложение на CD-ROM.
4. *Баранов С.В., Асминг В.Э., Ковалева И.С.* Каталоги землетрясений по различным регионам России. Район архипелага Шпицберген // Землетрясения России в 2016 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 178–179.
5. *Иванов С.С., Карасик А.М., Соколов В.Н.* Сейсмологические доказательства влияния Срединно-океанического хребта на северо-западную окраину Европейского континента // Труды X Генеральной ассамблеи ВСК в 2-х т. – Т. 2. – М.: АН СССР, 1968. – С. 205–213.
6. *Аветисов Г.П.* Некоторые параметры землетрясений Срединно-Арктического сейсмического пояса // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. – 2006. – № 6. – С. 176–187.
7. *Bird P., Kagan Y.Y., Jackson D.D.* Plate tectonics and earthquake potential of spreading ridges and oceanic transform faults // Plate Boundary Zones, Geodynamics Series / Ed. S. Stein, J.T. Freymueller. – Washington DC: Am. Geophys. U., 2002. – Vol. 30. – P. 203–218.
8. *Schlundwein V., Muller C., Jokat W.* Microseismicity of the ultraslow-spreading Gakkel ridge, Arctic Ocean: a pilot study // Geophys. J. Int. – 2007. – Vol. 169. – P. 100–112.
9. *Vinogradov A.N., Baranov S.V.* Recent geodynamic regime of the Eurasia – North American interplate boundary: Evidences from seismology of Arctic // MSTU. – 2012. – Vol. 15, N 2. – P. 435–438.
10. *Баранов С.В., Виноградов А.Н.* Возможные причины аномальной сейсмической активности в проливе Стур-фиорд (архипелаг Шпицберген) в 2008–2009 гг. // Вестник СПбГУ. Сер. 7. – 2010. – Вып. 4. – С. 23–31.
11. *Баранов С.В.* Афтершоковый процесс землетрясения 21.02.2008 г. в проливе Стур-фиорд (архипелаг Шпицберген) // Вулканология и сейсмология. – 2013. – № 3. – С. 1–15.
12. *M 5.1 - 121 km ESE of Longyearbyen, Svalbard and Jan Mayen* // USGS [Web Site]. – URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20005d4u#executive>.
13. *Yunga S., Lutikov A., Molchanov O.* Non double couple seismic sources, faults interaction and hypothesis of self-organized criticality // Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2005. – Vol. 5. – P. 11–15.
14. *Global CMT Catalog (GCMT)* [Web Site]. – URL: <http://www.globalcmt.org/>.
15. *Frohlich C.* Earthquakes with non-double-couple mechanisms // Science. – 1994. – Vol. 264. – P. 804–809.
16. *Тихоцкий С.А., Фокин И.В., Шур Д.Ю., Арефьев С.С.* Строение очаговой зоны Рачинского землетрясения 1991 г. по данным локальной сейсмической томографии с адаптивной параметризацией среды // Геофизические исследования. – 2011. – Т. 12, № 1. – С. 5–2.
17. *Ландер А.В.* Комплекс программ определения механизмов очагов землетрясений и их графического представления // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки и Командорских островов (01.01.2003–31.12.2003). Отчет КОМСП ГС РАН. – Петропавловск-Камчатский: Фонды КФ ГС РАН, 2004.
18. *Dziewonski A.M., Chou T.-A., Woodhouse J.H.* Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity // J. Geophys. Res. – 1981. – Vol. 86. – P. 2825–2852.