

ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКАЯ ПЛАТФОРМА, УРАЛ и ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ:

УДК 550.348. (470.21+481-922.1)

БАРЕНЦ-ЕВРО/АРКТИКА

С.В. Баранов, С.И. Петров

Кольский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Апатиты, bars@krsc.ru, serg@krsc.ru

Аннотация. В 2012 г. Кольский филиал проводил комплексные сейсмоинфразвуковые исследования с помощью сети станций на Кольском полуострове и архипелаге Шпицберген. В 2012 г. на Кольском полуострове зарегистрировано 16 сейсмических событий с $ML_{\text{рег}}$ от 0.3 до 3.4. В районе архипелага Шпицберген зарегистрировано 206 землетрясений с $ML_{\text{рег}}/ML_{\text{NAO}}$ 2.0–5.3. Суммарное выделение сейсмической энергии в 2012 г. было в 5.5 раза меньше, чем в 2011 г. Землетрясения с $ML_{\text{рег}} > 4$ происходили в районе спрединга океанического дна (хребты Мона, Книповича и ШЗР) и на континентальной окраине в районе залива Стурфьорд. Продолжен непрерывный мониторинг сейсмичности пролива Стур-фиорд, начатый в 2008 г. В этой зоне до сих пор происходят афтершоки, вызванные землетрясением 21.02.2008 г. с $M_w=6.1$. Данные мониторинга показывают, что афтершоковая активность этой зоны постепенно затухает. Также проводился мониторинг техногенной сейсмичности в районе поселка Баренцбург, где зарегистрировано 178 сейсмических событий с $ML_{\text{рег}}$ от –2.5 до 2.5. Наблюдения за слабой сейсмичностью и акустической эмиссией, генерируемыми криосферой архипелага, проводились с помощью сейсмоинфразвукового комплекса BRBB. В 2012 г. было обнаружено 1491 инфразвуковое событие. Более 80% инфразвуковых событий связаны с процессами, происходящими в ледниках архипелага.

Abstract. In 2012 Kola Branch conducted comprehensive seismological and infrasonic studies by means of the networks in Kola Peninsula and Spitsbergen Archipelago. In 2012 in Kola Peninsula 16 seismic events with $ML_{\text{рег}}$ from 0.3 to 3.4 were recorded. In the region of Spitsbergen Archipelago 206 earthquakes with $ML_{\text{рег}}/ML_{\text{NAO}}$ 2.0–5.3 were recorded. Total seismic energy release in 2012 was 5.5 times less than it had been in 2011. Earthquakes with $ML_{\text{рег}} > 4$ occurred in the area of spreading of the oceanic bottom at the ridges of Mon, Knipovich and Spitsbergen fault zone (SFZ) and also on the continental margin near the channel of Storefjord. The special monitoring of seismicity in Storefjord which had started in 2008 was continued in 2012. In that seismic zone aftershocks due to $M_w=6.1$ earthquake of 2008.02.21 still occur. The collected data shows that the aftershock activity decays slowly. The monitoring of induced seismicity in the settlement of Bahrenburg was also conducted. Where there were recorded 178 seismic events with the magnitudes $ML_{\text{рег}}$ from –2.5 to 2.5. Weak seismicity and infrasonic emission produced by cryosphere of the archipelago were recorded with seismic and infrasonic station BRBB. In 2012 the BRBB recorded 1419 infrasonic events; more than 80% of them were produced by the local glaciers.

В 2012 г. Кольский филиал проводил комплексные сейсмоинфразвуковые исследования с помощью сети станций на Кольском полуострове и архипелаге Шпицберген. Кроме того, в рамках заключенного долгосрочного соглашения о сотрудничестве использовались данные сейсмических сетей Норвежского сейсмологического агентства *NORSAR*.

В целом сетью постоянно действующих станций (рис. 1) были получены следующие данные. По телесеismicким событиям активность в 2012 г. оказалась более низкой, по сравнению с активностью в 2011 г. [1–3], чего нельзя сказать о региональных событиях – их было больше. По телесеismicким событиям составлено 175 бюллетеней, куда вошли 952 землетрясения. В их числе 755 землетрясений с $ML_{\text{рег}} > 5$, из них 139 с $ML_{\text{рег}} > 6$, и из общего количества событий – 181 с $ML_{\text{рег}} < 5$. По региональным событиям составлено 642 бюллетеня, куда вошли 2608 событий. Как всегда, в большинстве своем это промышленные взрывы, осуществляемые на рудниках Мурманской области.



Рис. 1. Сейсмические станции Кольского филиала ФИЦ ЕГС РАН в 2012 г.

Ниже приведен подробный обзор сейсмичности Баренц-Евро/Арктики, а параметры землетрясений представлены в приложенных каталогах [4, 5].

Кольский полуостров и прилегающие территории. В 2012 г. на контролируемой территории северо-восточной части Балтийского щита сейсмическими станциями Кольского филиала ФИЦ ЕГС РАН зарегистрировано и идентифицировано как естественные землетрясения 16 сейсмических событий [4]. Распределение эпицентров показано на карте (рис. 2).

По данным регистрации сейсмическая обстановка в Мурманской области в 2012 г. оценивается как спокойная. Большинство событий произошло здесь в Ловозерском массиве – пять событий с $M_{L_{пер}}$ от 1.4 до 1.8: 2 апреля в 14^h50^m с $M_{L_{пер}}=1.4$, 12 июня в 15^h57^m с $M_{L_{пер}}=1.6$, группа из трех толчков 5 августа с близкими магнитудами (в 18^h49^m с $M_{L_{пер}}=1.7$, в 18^h51^m с $M_{L_{пер}}=1.8$ и в 18^h52^m с $M_{L_{пер}}=1.5$). К юго-западу от Ловозерского массива, в акватории оз. Имандра, следует отметить очень незначительное ($M_{L_{пер}}=0.5$) событие 28 мая в 20^h55^m, интересное тем, что приблизительно в этом месте в 1996 г. произошло осязаемое землетрясение с $M_{L_{пер}}$ около 3.0. Южнее этого события на рис. 2 видна компактная группа из трех землетрясений также с близкими значениями магнитуд, отмеченные 8 января в 20^h54^m с $M_{L_{пер}}=1.3$, 22 апреля в 20^h19^m с $M_{L_{пер}}=1.5$ и 5 декабря в 15^h05^m с $M_{L_{пер}}=1.2$.

Два землетрясения – 25 мая в 18^h27^m с $M_{L_{пер}}=2.6$ и 3 декабря в 21^h13^m с $M_{L_{пер}}=2.7$ – зарегистрированы в Финляндии, у западной и восточной ее границ. В Швеции выделено лишь одно землетрясение – 18 мая в 19^h57^m с $M_{L_{пер}}=2.9$. Самые северные землетрясения локализованы в Норвежском море: 17 марта в 23^h00^m с $M_{L_{пер}}=2.9$ и 25 декабря в 03^h44^m с максимальным в каталоге [4] значением $M_{L_{пер}}=3.4$. События 29 февраля в 11^h22^m с $M_{L_{пер}}=1.9$ и 9 декабря в 07^h13^m с минимальным значением $M_{L_{пер}}=0.3$, включенные в каталог [4] как «возможно, землетрясение», на карте рис. 2 не показаны.

Сейсмичность архипелага Шпицберген. Обзор общей сейсмичности архипелага в 2012 г. Район архипелага Шпицберген состоит из двух частей: океанического дна и континентальной окраины. Каталог всех землетрясений дан в Приложении [5].

В океанической части расположены следующие сейсмогенные зоны: Шпицбергенская зона разломов (ШЗР), впадина Моллой, хребты Мона и Книповича (рис. 3). Сейсмичность этого района Арктики большинство исследователей связывают с медленным спредингом (расширением) океанического дна, происходящим вдоль указанных зон.

На континентальной окраине выделяются следующие сейсмогенные зоны: острова Северо-Восточная Земля и Западный Шпицберген, районы пролива Стур-фиорд и желоба Зюйдкапп, континентальный склон к западу и юго-западу от острова Медвежий (рис. 3).

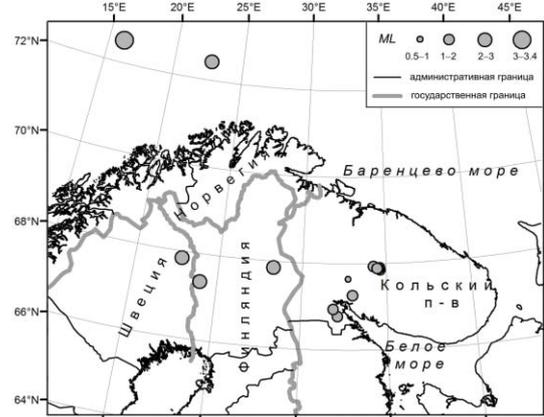


Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений на Кольском п-ове и прилегающих территориях за 2012 г.

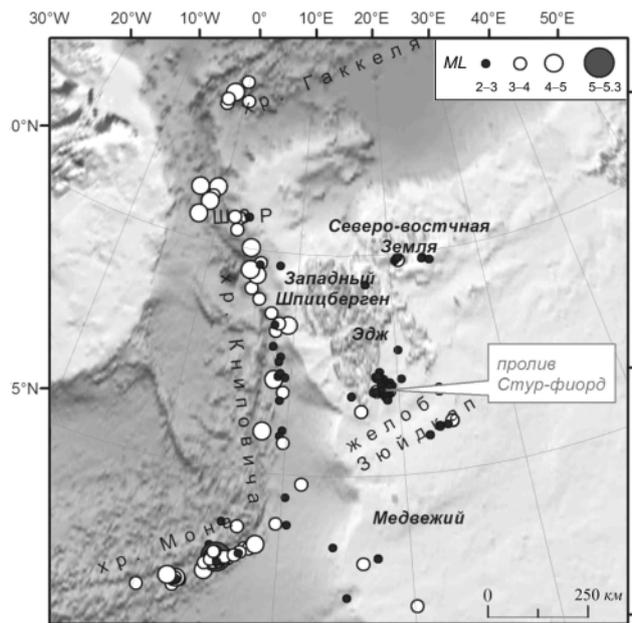


Рис. 3. Землетрясения, произошедшие в районе Шпицбергена в 2012 г. по данным КоФ ФИЦЕГС РАН и NOSRAR, и основные сейсмогенные зоны

В табл. 1 приведены годовые вариации количества землетрясений и сейсмической энергии, выделившейся в сейсмогенных зонах района Шпицбергена за 2009–2012 гг. Соответствующие графики показаны на рис. 4. Эти данные свидетельствуют, что шельфовая часть характеризуется большим количеством сейсмических событий и меньшим (иногда, на несколько порядков) энерговыделением, чем океаническая часть. Кроме того, с 2010 г. наблюдается уменьшение суммарного выделения сейсмической энергии в океанической части.

Таблица 1. Вариации количества землетрясений с $ML_{рег} > 2$ и сейсмической энергии, выделившейся в сейсмогенных зонах в районе Шпицбергена за 2010–2012 гг. по данным КоФ ФИЦЕГС РАН и NORSAR

№	Сейсмогенная зона	2010 г.		2011 г.		2012 г.	
		N_{Σ}	$\Sigma E, Дж$	N_{Σ}	$\Sigma E, Дж$	N_{Σ}	$\Sigma E, Дж$
Океаническая часть							
1	Хребет Мона	43	5.30E+12	28	2.71E+14	57	3.46E+13
2	Хребет Книповича	35	5.00E+12	54	4.60E+12	22	1.07E+13
3	Моллой + Шпицбергенская зона разломов	30	8.92E+12	11	3.95E+13	18	1.13E+13
	Всего	108	1.92E+13	93	3.16E+14	97	5.66E+13
Шельфовая часть							
4	Западный Шпицберген + Северо-восточная земля	13	3.13E+10	6	3.27E+09	12	1.79E+10
5	Стур-фиорд + Зюйдкапп	250	2.76E+12	138	7.54E+12	85	1.34E+11
6	Континентальный склон	4	2.75E+12	2	5.03E+08	4	2.06E+10
	Всего	267	5.55E+12	146	7.54E+12	101	1.73E+11

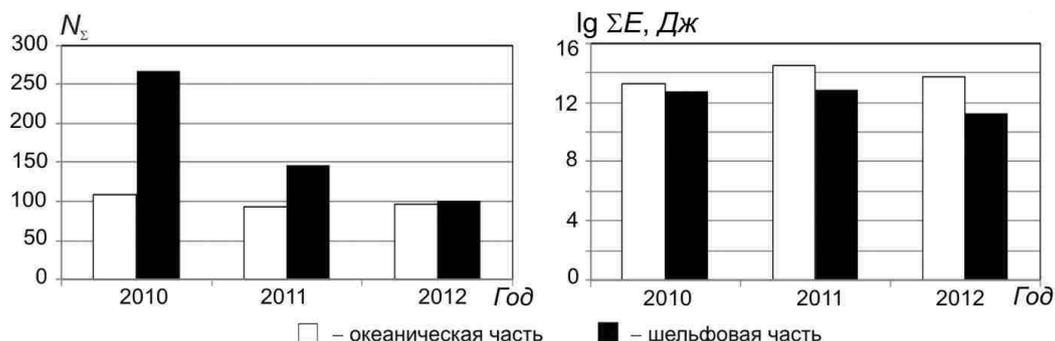


Рис. 4. Вариации количества землетрясений и выделившейся суммарной сейсмической энергии в океанической и шельфовой частях района архипелага Шпицберген за 2009–2012 гг. по данным КоФ ГС РАН и NORSAR

В 2012 г. в районе Шпицбергена было зарегистрировано 206 землетрясений с $ML_{рег} > 2.0$, в том числе одно событие с $ML_{рег} > 5$, тогда как в 2011 г. было зарегистрировано 243 землетрясения с $ML_{рег} > 2.0$, в том числе два события с $ML_{рег} > 5$ (табл. 2). Суммарное выделение сейсмической энергии в 2012 г. было в 5.5 раза меньше, чем в 2011 г. [1, 3], из чего следует, что сейсмическую активность района Шпицбергена и прилегающих акваторий в 2012 г. в целом можно охарактеризовать, как более слабую, чем в период 2009–2011 гг.

Таблица 2. Соотношение количества землетрясений, зарегистрированных в районе Шпицбергена, разных магнитуд и выделенной суммарной сейсмической энергии за 2009–2012 гг. по данным КоФ ФИЦЕГС РАН и NORSAR

Год	$ML_{рег}$				N_{Σ}	$\Sigma E, Дж$
	2–3	3–4	4–5	>5		
2009	256	86	12	2	356	$5.15 \cdot 10^{14}$
2010	266	84	26	0	376	$2.48 \cdot 10^{13}$

Год	$ML_{рег}$				N_{Σ}	$\Sigma E, Дж$
	2–3	3–4	4–5	>5		
2011	168	62	11	2	243	$3.23 \cdot 10^{14}$
2012	130	59	17	1	207	$5.81 \cdot 10^{13}$

Землетрясения с $ML_{\text{рег}} > 4$ происходили в районе спрединга океанического дна (хребты Мона, Книповича и ШЗР) и на континентальной окраине (в районе залива Стур-фьорд). Землетрясение с $ML_{\text{рег}} > 5$ локализовано на хребте Мона 24 мая в 22^h47^m (рис. 3. [6]).

Продолжен непрерывный мониторинг необычно длительной для Евро-Арктики серии афтершоков, последовавших после сильного ($M_w = 6.1$) землетрясения 21.02.2008 г. [6] в акватории Стур-фиорда. Результаты обработки данных мониторинга и проведенное исследование афтершокового процесса в Стур-фиорде на основе статистических моделей сейсмичности [7, 8] показали, что афтершоковый процесс в районе пролива Стур-фиорд имеет сложную природу и является суперпозицией двух подпроцессов: релаксационного (афтершоки с $ML_{\text{рег}} > 2$) и триггерного (афтершоки с $ML_{\text{рег}} > -0.2$). Предложена математическая модель для описания этого процесса и прогнозирования геодинамического режима на перспективу. Установлено, что происходит постепенное закономерное затихание афтершокового процесса (табл. 1).

Сейсмичность в районе российской угледобычи на острове Западный Шпицберген в 2011–2012 гг. Район пос. Баренцбург расположен за пределами наиболее активных сейсмогенных зон архипелага. Ближайшие из них находятся на расстоянии 100 км к юго-востоку (Земля Геера и район пролива Стур-фиорд) и в 150 км к западу (спрединговая зона хребта Книповича). В радиусе 40 км от шахтного поля ГТ «Арктикуголь», у пос. Баренцбург, сейсмоинфразвуковым комплексом BRBB зарегистрировано 178 сейсмических событий с магнитудами $ML_{\text{рег}}$ от -2.5 до $+2.5$, большая часть из которых не зафиксирована другими станциями шпицбергенского сегмента Баренцевоморской сети (рис. 5).

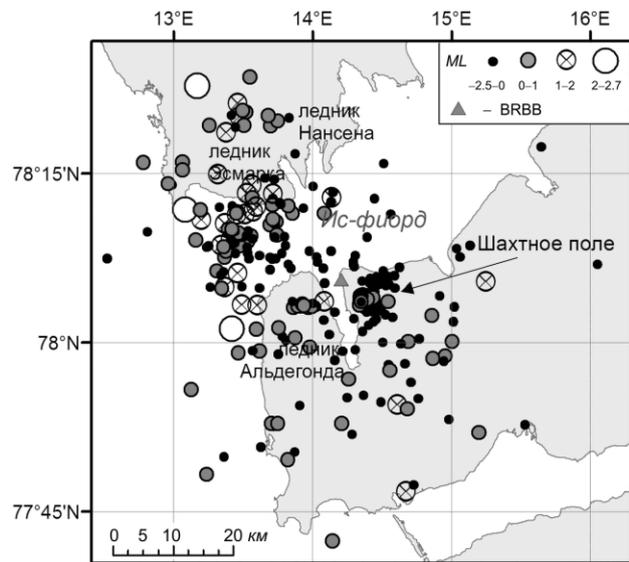


Рис. 5. Сейсмические события в районе пос. Баренцбург за 2011–2012 гг.

Зарегистрированные события можно разделить на две группы: 1) произошедшие вне шахтного поля; 2) произошедшие к востоку от поселка, на территории шахтного поля рудника «Баренцбург». Вне шахт в 2011–2012 гг. было зарегистрировано 256 сейсмических событий с $ML_{\text{рег}}$ от -2.5 до $+2.7$ (рис. 5). На территории шахтного поля в 2011–2012 гг. было зарегистрировано 251 сейсмическое событие с $ML_{\text{рег}}$ от -1.8 до $+0.35$. События, произошедшие на ледниках Эсмарка, Нансена и Альдегонда, как показано ниже, являются льдотрясениями.

Результаты исследования криосферы с помощью сейсмоинфразвуковой группы на архипелаге за 2011 – 2012 гг. В 2011–2012 гг. было зарегистрировано 1491 инфразвуковое событие, не считая акустической эмиссии от полетов самолетов и вертолетов, которые идентифицировались по наличию эффекта Доплера (табл. 3). К сожалению, по данным одной инфразвуковой группы невозможно определить координаты источника акустической эмиссии, поскольку имеются лишь волны сжатия. Поэтому каталог инфразвукового мониторинга содержит только азимуты, времена прихода волн на станцию и кажущиеся скорости.

Таблица 3. Количество инфразвуковых событий за исключением акустической эмиссии от полетов самолетов и вертолетов, обнаруженных станцией BRBB за 2011–2012 гг. в частотных диапазонах $\Delta f_1 = 1-5$ и $\Delta f_2 = 5-15$ Гц

Год	Частотный диапазон, Гц		N_{Σ}
	1–5	5–15	
2011	172	705	877
2012	154	460	614
Сумма	326	1165	1491

События, азимуты которых направлены в южную полушарность от станции BRBB (от 90° до 270°), вызваны деятельностью шахт в поселке Баренцбург и связаны, с большой вероятностью, со второй группой событий, произошедших в районе шахтного поля и являющихся по своей природе техногенными.

Азимуты 81% инфразвуковых событий (первая группа событий) лежат в диапазоне от 315° до 45° (рис. 6, 7), т.е. направлены на ледники Эсмарка и Нансена, находящиеся на расстоянии 20 и 30 км от станции BRBB. Поскольку эти направления свободны от антропогенной активности, то логично предположить, что часть зарегистрированных сейсмических событий и большая часть инфразвуковых событий связаны с процессами, происходящими в соответствующих ледниках.

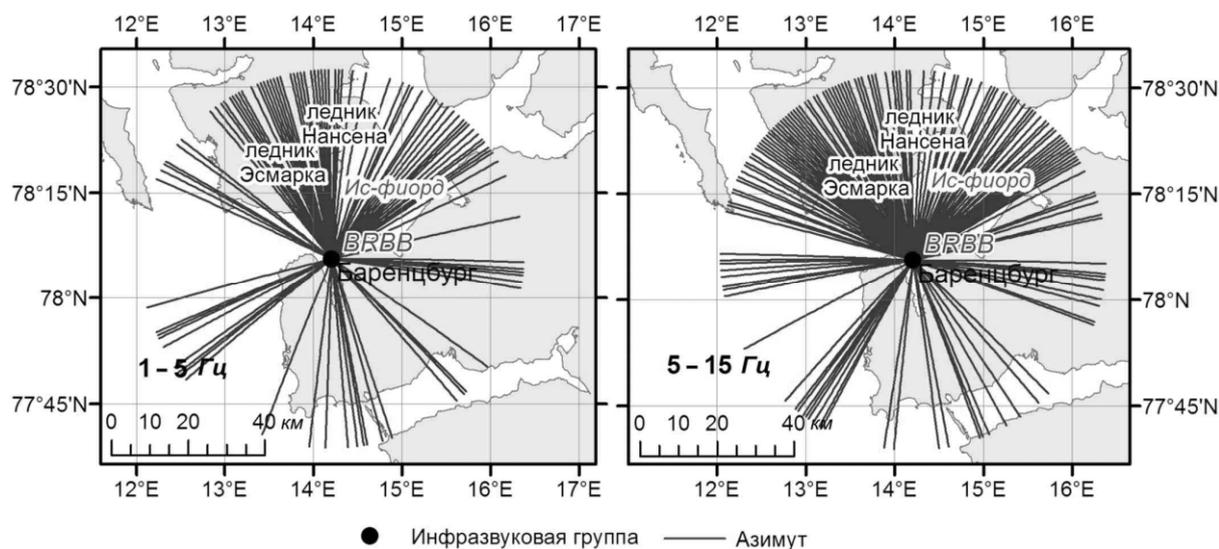


Рис. 6. Азимуты инфразвуковых событий, зарегистрированных акустической группой BRBB в 2011–2012 гг. в диапазонах частот $\Delta f_1=1-5$ и $\Delta f_2=5-15$ Гц

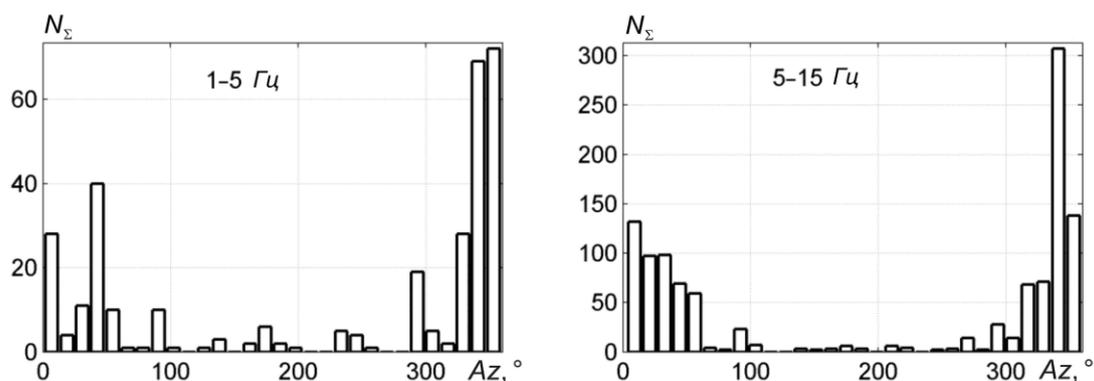


Рис. 7. Распределение азимутов инфразвуковых событий, зарегистрированных акустической группой BRBB в 2011–2012 гг. в диапазонах частот 1–5 и 5–15 Гц

Известно, что растрескивание (crevassing), аномально-быстрые подвижки (surging) пульсирующих ледников, краевое обрушение выводных ледников, налегающих на поверхность моря (calvingoftideglaciers), генерируют как сейсмические сигналы [9–11], регистрируемые в виде «микроразземлетрясений», так и акустическую эмиссию.

В пользу гипотезы о ледниковой природе акустической эмиссии свидетельствует тот факт, что большинство событий, азимуты которых направлены на ледники Нансена и Эсмарка, наблюдается в августе. При этом ранее было установлено [12], что месячные вариации количества событий (рис. 8 а) не зависят от скорости ветра (рис. 8 б), которая является основной помехой, препятствующей надежной регистрации инфразвуковых сигналов. Сопоставляя вариации количества инфразвуковых событий и температуры воздуха в приземном слое (рис. 8 в),

можно заметить, что увеличение акустической активности соответствует периоду положительных температур. В июне температура воздуха становится положительной, начинается таяние ледников, и через месяц увеличивается количество инфразвуковых событий с соответствующих направлений. Таким образом фиксируются акустические проявления часто наблюдаемого явления «весеннего ускорения» (springspeedup) ледников, инициированного изменением гидрологического режима из-за увеличения потока талых вод (см., например, [13]). В силу климатических особенностей архипелага Шпицберген термин «весеннее ускорение» более уместно заменить «летним ускорением».

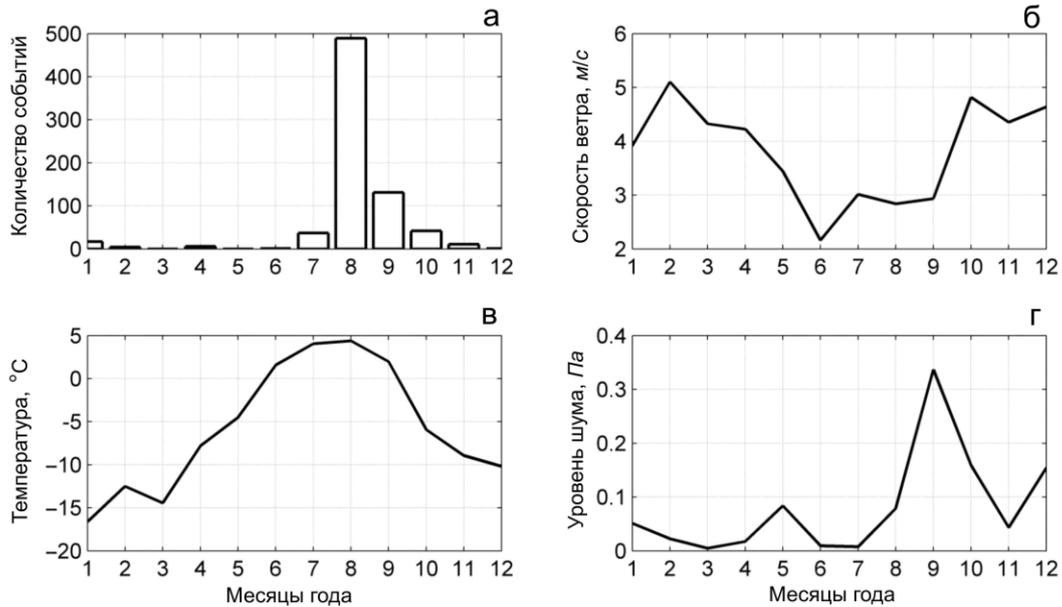


Рис. 8. Месячные вариации акустических и метеорологических параметров (данные норвежской станции GRUVEFJELLET) за 2011 г. в районе сейсмоинфразвуковой станции BRBB

а – количество зарегистрированных инфразвуковых событий, азимуты которых направлены в район ледников Нансена и Эсмарка (рис. 6 а); б – скорость ветра (m/s); в – температура воздуха по Цельсию на высоте 1 м; г – уровень инфразвукового шума в Pa [12].

Дальнейшая интенсификация процесса таяния в августе месяце привела к большему усилению акустической активности (рис. 8 а, в). В сентябре вместе с понижением среднемесячной температуры воздуха начало уменьшаться и количество инфразвуковых событий.

Вариации инфразвукового шума также обнаруживают связь с процессами, происходящими в криосфере под действием температур. При оценивании среднемесячного уровня шума из акустической записи предварительно удалялись события и «пиковые выбросы», затем рассчитывалась среднемесячная амплитуда. Подобно количеству событий, месячные вариации шума (рис. 8 в) также не обнаруживают зависимости от скорости ветра (рис. 8 б) и достигают максимума в теплый период года. Максимальный уровень шума приходится на сентябрь. Возможно, именно из-за высокого уровня шума количество зарегистрированных инфразвуковых событий в сентябре меньше, чем в августе.

Обнаруженные сезонные вариации акустической эмиссии согласуются с ранее обнаруженными вариациями количества слабых сейсмических событий на архипелаге Шпицберген по данным региональной сети за 1998–2008 гг. [14], из чего следует, что слабая сейсмичность и акустическая эмиссия на Шпицбергене в значительной мере генерируются процессами, происходящими в криосфере архипелага, которые контролируются сезонными вариациями температуры воздуха. Отметим, что в 2012 г. пока не удалось обнаружить парные сейсмические и акустические события. По-видимому, сейсмический эффект, генерируемый процессами в ледниках Нансена и Эсмарка, недостаточен для уверенной регистрации сейсмической станцией на расстояниях более 20 км. Выявление и систематизация парных сейсмических и акустических событий является задачей исследований ближайшего будущего.

Л и т е р а т у р а

1. **Баранов С.В., Петров С.И.** Баренц-Евро/Арктика // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – С. 209–216.
2. **Баранов С.В., Петров С.И., Нахшина Л.П. (отв. сост.)**. Каталог землетрясений Баренц-Евро/Арктики (Балтийский щит) в 2011 г. // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – Приложение на CD_ROM.
3. **Баранов С.В., Петров С.И., Нахшина Л.П. (отв. сост.)**. Каталог землетрясений Баренц-Евро/Арктики (архипелаг Шпицберген) в 2011 г. // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – Приложение на CD_ROM.
4. **Баранов С.В., Петров С.И., Нахшина Л.П. (отв. сост.)**. Каталог землетрясений Баренц-Евро/Арктики (Балтийский щит) в 2012 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 21 (2012 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – Приложение на CD_ROM.
5. **Баранов С.В., Петров С.И., Нахшина Л.П. (отв. сост.)**. Каталог землетрясений Баренц-Евро/Арктики (архипелаг Шпицберген) в 2012 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 21 (2012 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – Приложение на CD_ROM.
6. **Баранов С.В., Петров С.И.** Баренц-Евро/Арктический регион // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. – Обнинск: ГС РАН, 2014 – С. 224–230.
7. **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.
8. **Баранов С.В.** Афтершоковый процесс землетрясения 21.02.2008 г. в проливе Стур-фиорд (архипелаг Шпицберген) // Вулканология и сейсмология. – 2013. – № 3. – С. 1–15. (Импакт-фактор 0.2).
9. **Amundson J.M., Burton J.C., Correa-Legisos S.** Impact of hydrodynamics on seismic signals generated by iceberg collisions // Ann. Glaciology. – 2012. – **53(60)**. – P. 106–112. – doi: 10.3189/2012/AoG60A012.
10. **Kohler A., Chapuis A., Nuth C., Kohler J., Weidle C.** Autonomous detection of calving-related seismicity at Kronebreen, Svalbard // The Cryosphere. – 2012. – **6**. – P. 393–406.
11. **Lefauconnier B., Hagen J.O.** Surging and calving glaciers in eastern Svalbard // NorskPolar-institutMeddelelser. – Oslo: NPI, 1991. – 116 p.
12. **Асминг В.Э., Баранов С.В., Виноградов Ю.А., Воронин А.И.** Сейсмоинфразвуковой мониторинг на Шпицбергене // Сейсмические приборы. – 2012. – **48**. – № 3. – С. 20–33.
13. **Willis I.C.** Interannual variations in glacier motion // A review: Progress in Physical Geography. – 1995. – **19**. – P. 61–106. – doi: 10.1177/030913339501900104.
14. **Асминг В.Э., Баранов С.В., Виноградов А.Н., Виноградов Ю.А.** Сезонный характер сейсмичности в районе архипелага Шпицберген // Вестник МГТУ. – 2009. – **12**. – № 4. – С. 571–575.