

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ NSDL ДЛЯ ДЕТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ СЕЙСМИЧНОСТИ АРХИПЕЛАГА ШПИЦБЕРГЕН

В. Э. Асминг, А. В. Федоров, А. О. Аленичева, З. А. Евтюгина

Кольский филиал ФГБУН ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», г. Апатиты

Аннотация

Динамика сейсмического процесса арх. Шпицберген за январь-октябрь 2017 г. изучалась с помощью системы NSDL. Данные по пяти сейсмическим станциям были обработаны системой: обнаружено и локализовано 35 199 событий. Для наглядного картографического отображения большого количества сейсмических событий применен новый подход. Обнаружены рои землетрясений как тектонической, так и ледниковой природы. Показано, что система NSDL является эффективным средством изучения региональной сейсмичности.

Ключевые слова:

сейсмическая локация, рои землетрясений, льдотрясения, Шпицберген.

USAGE OF THE NSDL LOCATION SYSTEM FOR THE DETAILED STUDY OF THE SPITSBERGEN ARCHIPELAGO SEISMICITY

Vladimir E. Asming, Andrey V. Fedorov, Alena O. Alenicheva, Zinaida A. Jevtjugina

Kola Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Apatity

Abstract

The dynamics of seismic process of the Spitsbergen archipelago for January-October 2017 was studied using the NSDL system. The data of five seismic stations were processed by the system, 35 199 events were detected and located. A new approach has been applied to visual mapping of the large number of seismic events. The swarms of earthquakes both of tectonic and glacial nature, have been discovered. It is shown that the NSDL system is an effective tool for studying regional seismicity.

Keywords:

seismic location, earthquake swarms, icequakes, Spitsbergen.

Введение

Шпицберген — арктический архипелаг, расположенный в Северном Ледовитом океане, в 1000 км от Северного полюса. В состав Шпицбергена входит больше тысячи малых и больших островов, среди них основную часть территории занимают крупные острова — Западный Шпицберген, остров Баренца, Земля Принца Карла, остров Эдж и Северо-Восточная Земля. Общая площадь архипелага составляет 62 000 км², почти 60 % всей территории покрыто ледниками.

До 1970-х гг. наблюдения за сейсмичностью архипелага производились преимущественно удаленными станциями. Господствовало представление о том, что наибольшую сейсмическую активность здесь проявляет зона спрединга, расположенная вдоль хребтов Мона и Книповича, а внутриплитовая часть относительно пассивна, землетрясения здесь происходят редко и они не очень сильны [1]. На рис. 1 приведена карта землетрясений, зарегистрированных в районе архипелага за время до 1980 г. (по данным международного сейсмологического центра ISC), которая хорошо иллюстрирует эту точку зрения.

Землетрясение 18 января 1976 г., имевшее магнитуду 5,7 и произошедшее у восточного побережья о. Зап. Шпицберген в проливе Стур-фьорд, разрушило сложившуюся картину и значительно увеличило интерес международного сейсмологического сообщества к изучению архипелага. В 2008 г. практически в том же районе было зарегистрировано землетрясение с моментной магнитудой $M_w = 6$, которое на настоящий момент является самым сильным внутриплитовым землетрясением в данном районе Арктики.

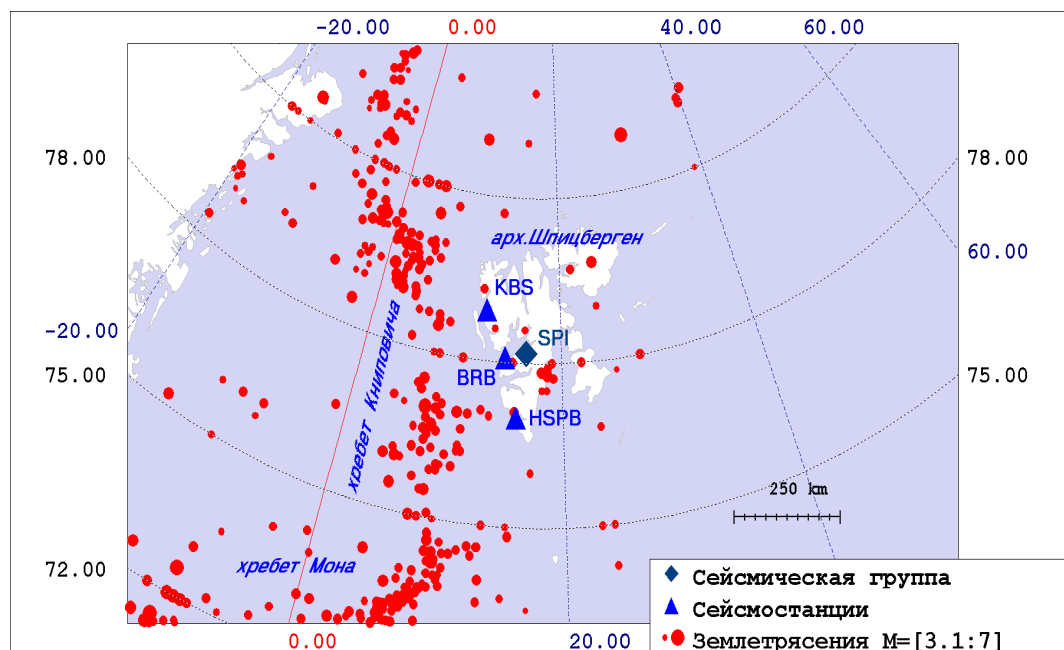


Рис. 1. Землетрясения в районе арх. Шпицберген за период 1908–1979 гг. по данным международного сейсмологического центра (ISC). Также показана сеть сейсмостанций Шпицбергена, работающих в настоящее время. Под BRB понимаются BRBA и BRBB — две близко расположенные сейсмостанции КоФ ФИЦ ЕГС РАН

Fig. 1. Earthquakes in the area of the Spitsbergen archipelago for the period of time 1908–1979 according to the data of International Seismological Centre (ISC). The network of seismic stations that are currently in operation, is also shown. The BRB abbreviation denotes two close stations BRBA and BRBB operated by the Kola Branch of Geophysical Survey of RAS

В последующие годы сейсмичность архипелага исследовалась временными сетями [2], устанавливались постоянные станции, вначале аналоговые, к началу 2000-х замененные на цифровые. В настоящее время на острове Западный Шпицберген, действуют четыре цифровых трехкомпонентных станции и одна малоапертурная сейсмическая группа (рис. 1, табл. 1).

Таблица 1
Table 1

Сейсмические станции арх. Шпицберген
Seismic stations of the Spitsbergen archipelago

Станция Station	Обозначение Code	Широта Latitude	Долгота Longitude	Оператор Operator
Баренцбург А Varetsburg A	BRBA	78,0591	14,217	КоФ ФИЦ ЕГС РАН KB GS RAS
Баренцбург В Varetsburg B	BRBB	78,0935	14,208	КоФ ФИЦ ЕГС РАН KB GS RAS
Хорнсунн Hornsund	HSPB	77,0019	15,5332	Польская академия наук Polish Academy of Sciences
Кингсбей Kingsbay	KBS	78,92560	11,94170	Консорциум IRIS, Университет Бергена IRIS, University of Bergen
Сейсмическая группа Шпицберген Seismic array Spitsbergen	SPI	78,17771	16,36998	NORSAR, Норвегия NORSAR, Norway

Объекты и методы

До недавнего времени наиболее полным источником информации о сейсмичности архипелага были бюллетени, выпускаемые норвежской сейсмологической организацией NOR SAR: полностью автоматический бюллетень GBF [3] и RRB — бюллетень событий, обработанных человеком-интерпретатором [4]. Бюллетени эти неполны. Создаются они по данным сейсмических групп ARCES и SPI, принадлежащих NOR SAR, из которых только SPI находится непосредственно на архипелаге. Автоматический бюллетень GBF содержит большое (больше числа реальных событий) количество ложных срабатываний, а бюллетень, составленный человеком-интерпретатором, — только события, магнитуды которых превышают 2. Бюллетеня же, объединяющего данные всех находящихся на Шпицбергене станций, не существовало.

В 2014 г. в Кольском филиале ФИЦ ЕГС РАН была начата разработка новой системы детектирования и локации NSDL. Мотивацией к созданию такой системы явилась необходимость обрабатывать данные по редким сетям и по одиночным сейсмостанциям. В 2016 г. эта система была в основном создана [5]. Ядром системы являются две большие программы. Первая из них, программа NSS, служит для автоматического детектирования и предварительной локации сейсмических событий по отдельным сейсмическим станциям — как трехкомпонентным, так и сейсмическим группам. NAS, вторая программа, способна получать на вход результаты работы NSS по нескольким станциям, производить их ассоциацию и более точную локацию обнаруженных сейсмических событий. В случае изучения сейсмичности по одиночной станции программа NSS может быть использована автономно [6]. Так, она была использована для мониторинга активности ближайших ледников по данным станции Хорнсунн [7].

В 2016 г. на базе NSDL была запущена автоматическая система сейсмического мониторинга арх. Шпицберген и прилегающих территорий. Она обрабатывает данные всех сейсмостанций, перечисленных в табл. 1, которые поступают через Интернет. По результатам работы система создает полностью автоматический бюллетень сейсмических событий [8].

Частота, с которой на данной территории происходят сейсмические события, велика, поэтому для того, чтобы сделать результаты обзримыми, на работу системы были наложены определенные ограничения. Это приводит к высокой достоверности работы системы (малому числу ложных срабатываний), но при этом теряется информация о слабой сейсмичности, которая может нести важную информацию об активности ледников и прочих природных процессах.

Результаты и обсуждение

Чтобы сделать эту информацию доступной, все данные по вышеупомянутым сейсмическим станциям за 2017 г. были переобработаны системой NSDL безо всяких ограничений. В результате система обнаружила и слочировала 42 907 событий. Понятно, что человеку-интерпретатору непосильно проверить все обнаруженные события. Была проведена выборочная проверка, в результате которой число ложных срабатываний системы было оценено сверху в 10 %. Таким образом, можно считать, что для статистического анализа можно использовать полученные данные и без дальнейшей коррекции.

На графике (рис. 2, *а*) показано, какое количество событий зарегистрировано одной, двумя, тремя и четырьмя сейсмостанциями. Легко видеть, что подавляющее большинство событий регистрируются одной-двумя станциями. На втором графике (рис. 2, *б*) представлена повторяемость магнитуд сейсмических событий. Судя по тому, что наклон графика повторяемости линеен с магнитуды 0,3, можно считать, что полученный список событий представителен начиная с этой магнитуды.

Для работы со столь большим количеством сейсмических событий необходимо выработать способ их отображения, который позволил бы человеку воспринять общую картину. В данном случае для каждого небольшого участка территории важными параметрами являются как выделившаяся на нем сейсмическая энергия, так и общее количество сейсмических событий. Ясно, что общепринятые карты, на которых землетрясения обозначаются кружками, размеры которых зависят от магнитуды, для отображения не годятся: вся карта будет закрашена случайно расположенными на карте ложными срабатываниями.

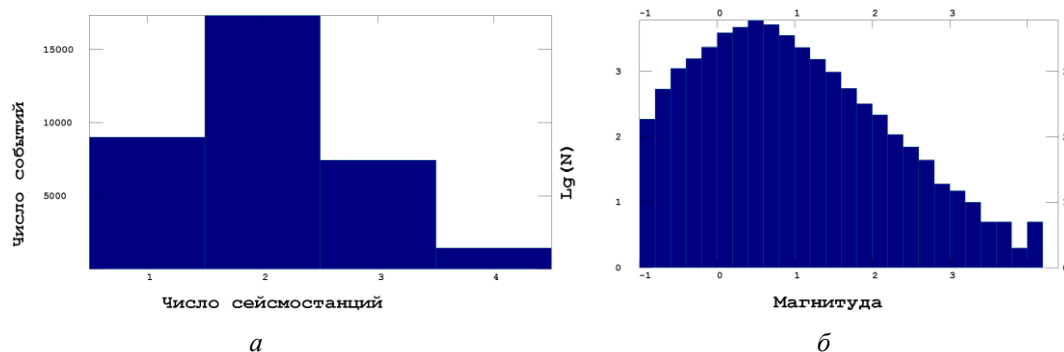


Рис. 2. Зависимость количества зарегистрированных событий от числа сейсмостанций (а) и график повторяемости обнаруженных сейсмических событий (б)

Fig. 2. Dependence of the number of detected events on the number of seismic stations (a) and frequency-magnitude plot for the found seismic events (b)

В качестве первого варианта был использован следующий подход. Территория разбивается на элементы площади, в каждом из которых считается количество произошедших событий и общая сейсмическая энергия. Эти элементы рисуются на карте, причем цвет каждого выбирается в зависимости и от числа событий, и от энергии (рис. 3).

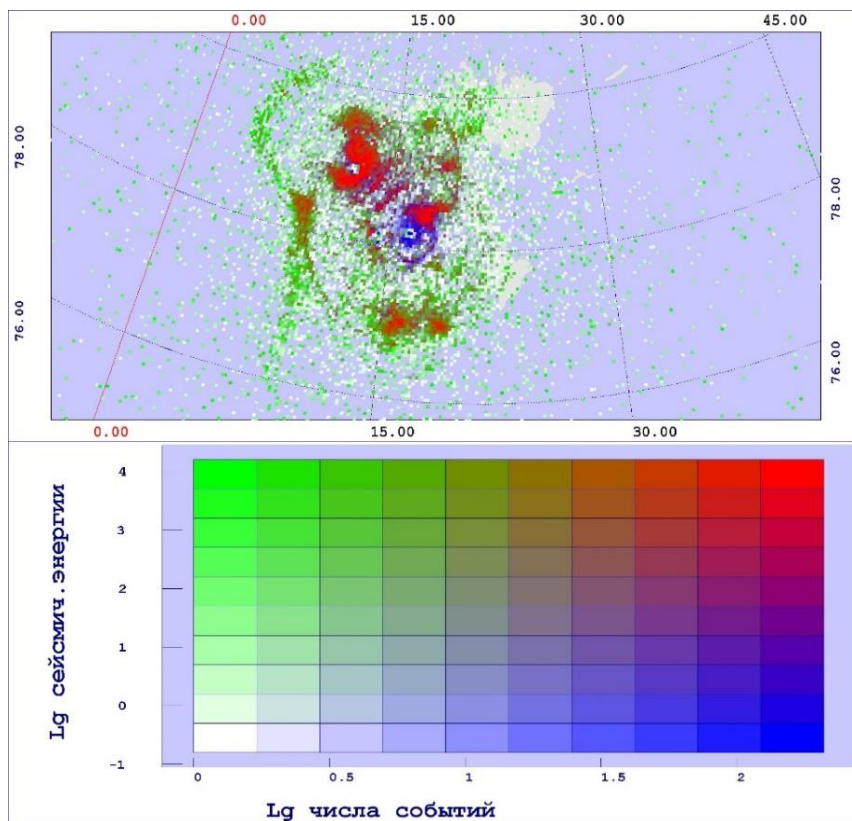


Рис. 3. Изображение сейсмического процесса в виде элементов площади, цвета которых зависят от числа сейсмических событий и выделившейся сейсмической энергии

Fig. 3. The plot of the seismic process in the form of area elements, colors of which depend on the number of seismic events and released seismic energy

Во втором, окончательном, варианте подход был немного изменен. Сейсмические события на карте обозначаются кружками, размеры которых зависят от магнитуды, но их цвет берется таким, каким был цвет соответствующего элемента площади в предыдущем варианте (рис. 4). Здесь уже просматриваются характерные черты сейсмичности архипелага. Большую активность,

как обычно, проявляет зона спрединга, хребет Книповича (зона 1). Остается активной зона пролива Стур-фьорд (зона 2), активизировалась зона вблизи пос. Хорнсунн (3). Сейсмическая энергия даже большая, чем в зоне спрединга, выделилась в зонах 4 (район пос. Кингсбей) и 5 (северо-запад от пос. Лонгийр). Эти зоны будут рассмотрены далее.

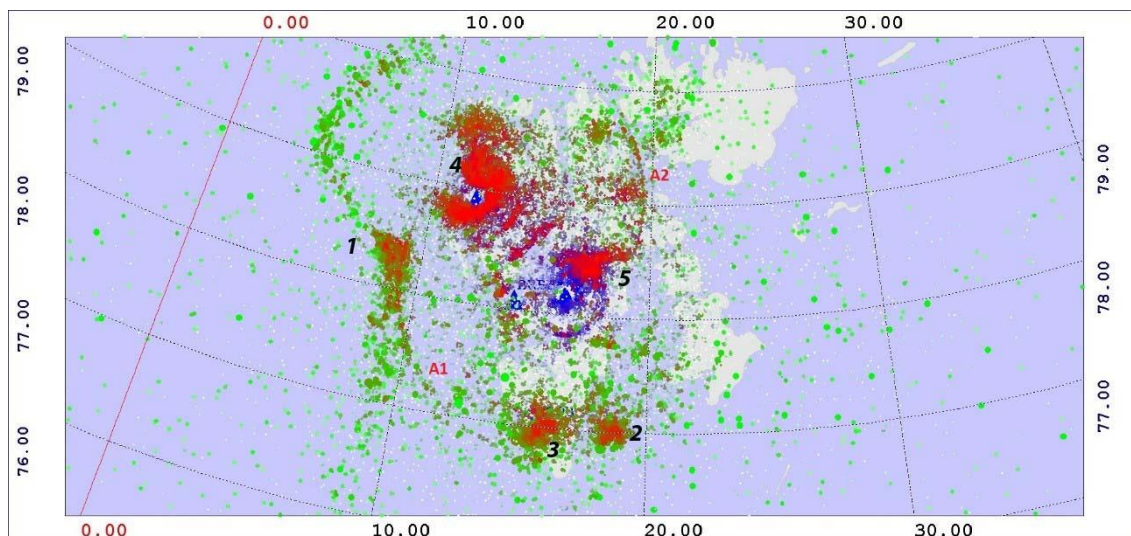


Рис. 4. Общая картина сейсмичности арх. Шпицберген за январь-октябрь 2017 г. по результатам NSDL: 1–5 — зоны повышенной сейсмической активности, A1, A2 — артефакты обработки

Fig. 4. The overall picture of seismicity of the Spitsbergen archipelago for January-October 2017 according to the results of NSDL: 1–5 — areas of increased seismic activity, A1, A2 — processing artifacts

Обратим внимание на дугообразные структуры (на рис. 4 это A1 и A2). Анализ волновых форм показал, что это артефакты работы автоматической системы, вызванные специфической ошибкой. Подавляющее большинство событий, составляющих эти структуры, реальны, причем они хорошо зарегистрированы одной станцией (для зоны A1 это станция SPI, для зоны A2 — станция KBS).

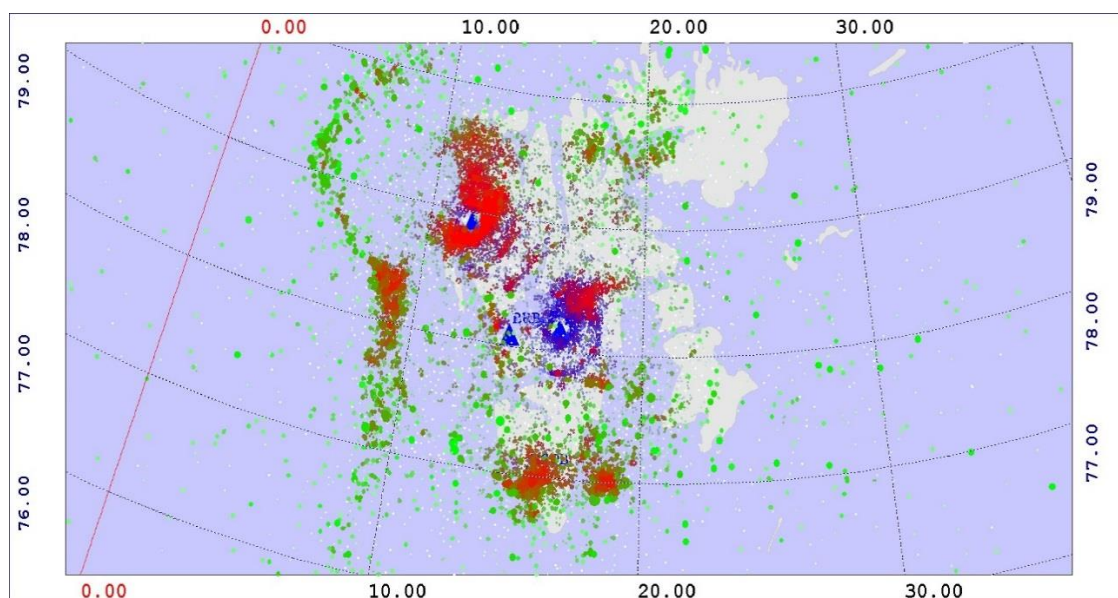


Рис. 5. Карта, аналогичная приведенной на рис. 4, но в ней исключены события, в бюллетенях которых ровно три фазы (такие события лоцируются с большими погрешностями)

Fig. 5. A map similar to that shown in Fig. 4, events are excluded, bulletins of which contain exactly three phases (such events are located with big uncertainties)

В процессе ассоциации программа добавляет к ним одну случайно подошедшую по времени ложную фазу, в результате событие лоцируется неверно, при этом расстояние от точки локации до станции, реально зарегистрировавшей событие, остается неизменным. Чтобы убедиться в правильности этого предположения, достаточно исключить из списка события, в бюллетенях которых ровно три фазы. Результат представлен на рис. 5, артефакты исчезли.

Зоны с наибольшим количеством выделенной сейсмической энергии показаны на рис. 4. Рассмотрим статистические параметры событий, произошедших в этих зонах (табл. 2).

Таблица 2

Table 2

Параметры сейсмических зон архипелага
The parameters of the seismic zones of the archipelago

№ п/п	Зона Zone	Число событий Number of events	Магнитуда Magnitude	
			средняя mean	максимальная maximal
1	Зона спрединга, центр Spreading zone, centre	1401	0,8	3,7
2	Стурфиорд Storfjorden	841	0,8	4,1
3	Хорнсунн Hornsund	1701	0,7	4,2
4А	Кингсбей, север Kingsbay, north	4701	0,3	1,5
4Б	Кингсбей, юг Kingsbay, south	2700	0,3	2,6
5	К северу от пос. Лонгийр To the north from Longyearbyen	2794	0	1,6
6	Ледник Осгор Åsgardfonna glacier	882	0,7	2,5

Легко видеть, что сейсмический режим зон 1, 2 и 3 очень близок, сейсмический режим зон 4 и 5 также очень близок, но существенно отличается от зон 1, 2, 3. Можно заключить, что если в зонах 1, 2, 3 большинство сейсмических событий имеют тектоническую природу, то сейсмические события в зонах 4, 5 и 6 в большинстве своем вызваны активностью ледников. Действительно, они существенно слабее как по средней магнитуде, так и по максимальной, а их количество значительно больше.

Любопытно также проследить изменение сейсмической активности во времени. На рис. 6 и 7 показаны карты, на каждой из которых представлены сейсмические события, происходившие в течение каждых двух месяцев с января по декабрь 2017 г.

Заметно, что в некоторых зонах (отмечены овалами на рис. 6, 7) сейсмический процесс существенно менялся со временем. Характеристики процесса (сейсмическая энергия, число событий, магнитуды) различаются от зоны к зоне. Рассмотрим их подробнее.

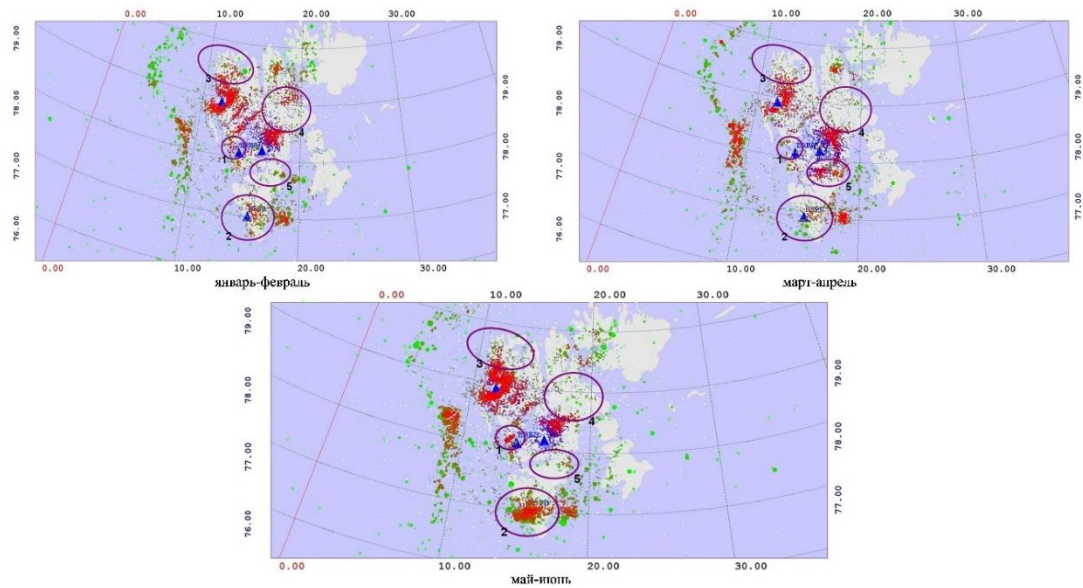


Рис. 6. Динамика сейсмического процесса арх. Шпицберген за январь-июнь 2017 г.
Овалами отмечены зоны, в которых сейсмический режим существенно менялся

Fig. 6. Dynamics of the seismic process of the Spitsbergen archipelago for January-June 2017.
Ovals indicate the areas where the seismic regime has been changing significantly

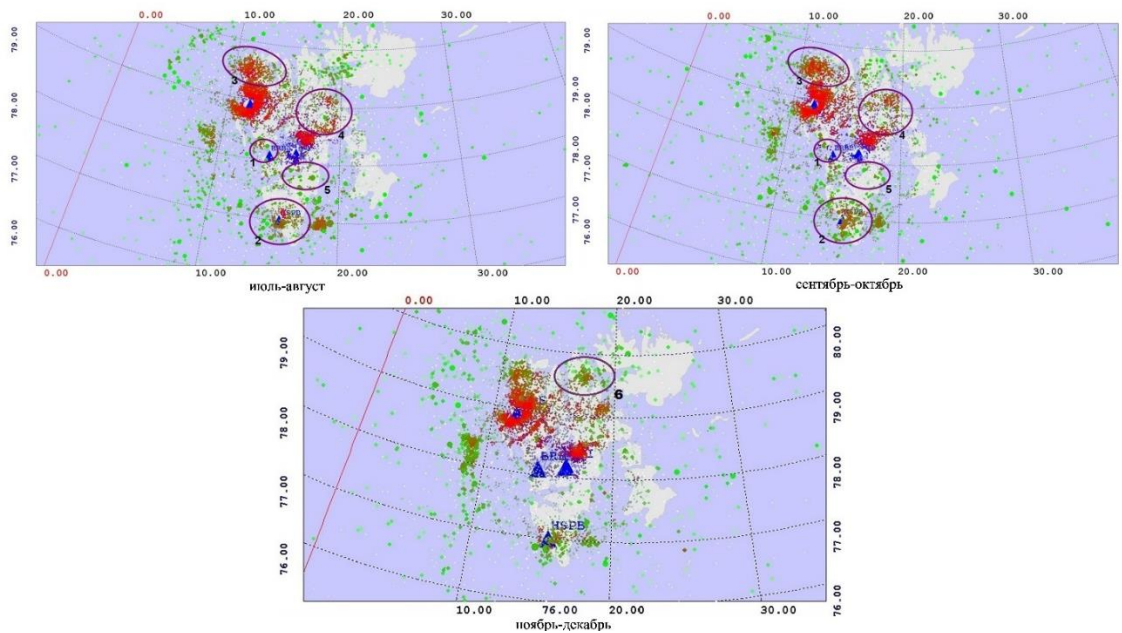


Рис. 7. Динамика сейсмического процесса арх. Шпицберген за июль-декабрь 2017 г.
Овалами отмечены зоны, в которых сейсмический режим существенно менялся

Fig. 7. Dynamics of the seismic process of the Spitsbergen archipelago for July-December 2017.
Ovals indicate the areas where the seismic regime has been changing significantly

Зона 1. Устье залива Ис-фьорд

По графику динамики сейсмического процесса (рис. 8) видно, что в конце мая 2017 г. уровень сейсмической активности здесь скачкообразно увеличился, энерговыделение и частота появления сейсмических событий возросли примерно в 5 раз, появились сильные события с магнитудами выше 2. Сильного первого толчка не зафиксировано, т. е. наблюдается рой землетрясений.

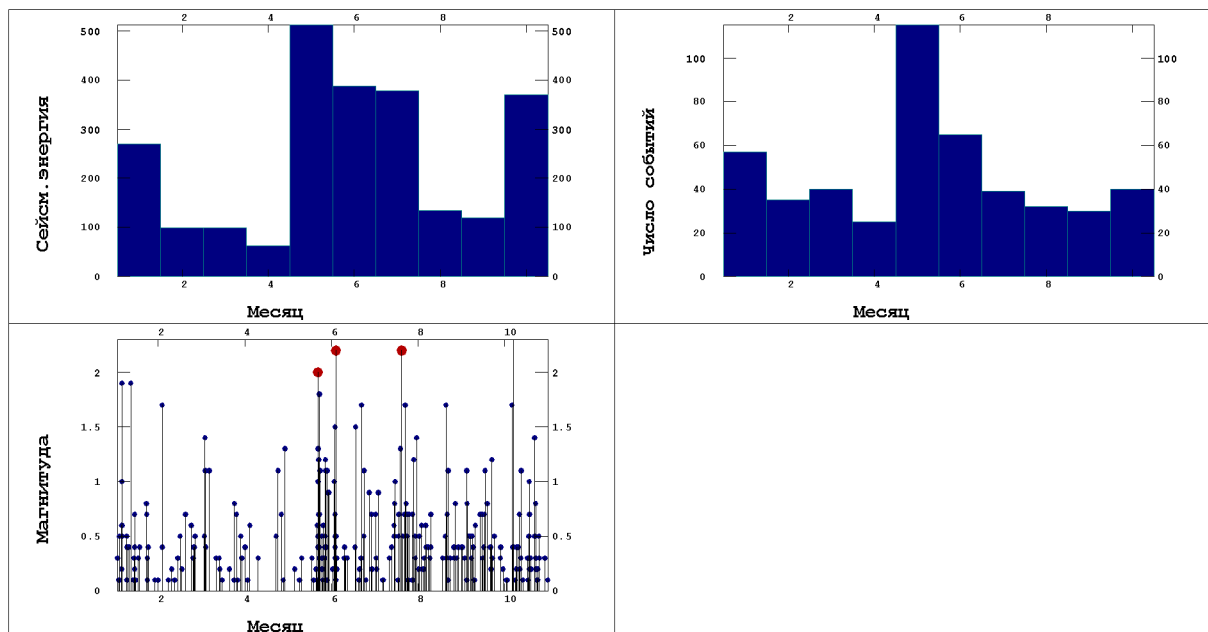


Рис. 8. Динамика сейсмического процесса в зоне 1 (устье залива Ис-фьорд)

Fig. 8. Dynamics of seismic process in zone 1 (mouth of the Isfjorden Bay)

События локализованы в компактной области в устье Ис-фьорда, волновые формы очень похожи (рис. 9). Распределение по часам суток и дням недели однородно, что позволяет исключить человеческую деятельность. Природа событий данного роя неясна.

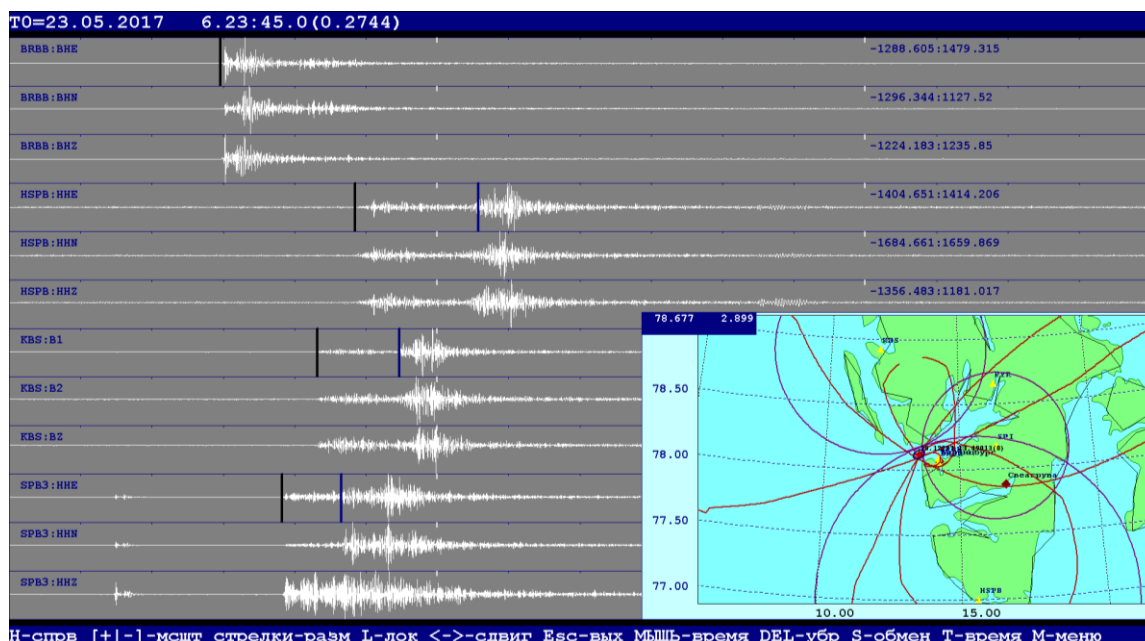


Рис. 9. Записи события в устье Ис-фьорда станциями Шпицбергенской сети и его локация

Fig. 9. Records of the event at the mouth of the Isfjorden by the stations of the Spitsbergen network and its location

Зона 2. Район пос. Хорнсунн

Сейсмическая активность в этой зоне резко возросла к концу мая, почти одновременно с активностью в зоне 1. В конце мая начались сильные сейсмические события с магнитудами выше 2, достигающими до 4 (рис. 10), однако черты классической афтершоковой последовательности

отсутствовали: выраженного первого сильного толчка и следующих за ним афтершоков не наблюдалось (рис. 11). Таким образом, наблюдается рой землетрясений, по всей видимости, тектонической природы. Данный рой не затих и к концу 2017 г.

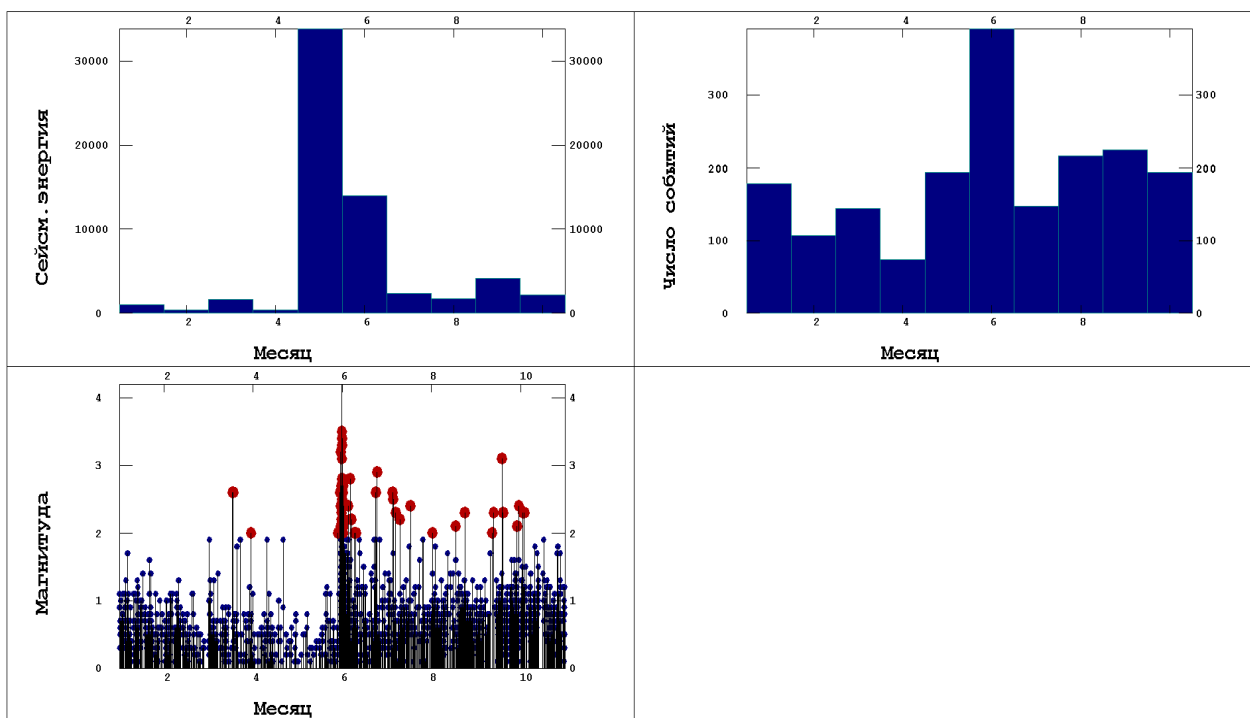


Рис. 10. Динамика сейсмического процесса в зоне 2 (район пос. Хорнсунн)
 Fig. 10. Dynamics of the seismic process in zone 2 (area of the Hornsund settlement)

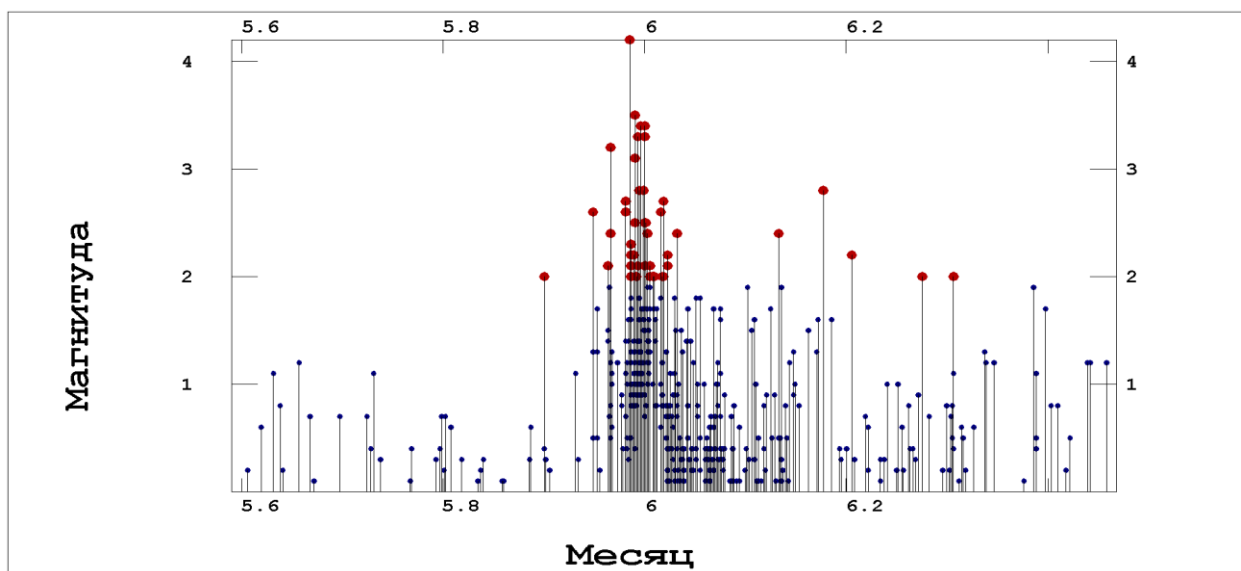


Рис. 11. Начало роя землетрясений в районе пос. Хорнсунн
 Fig. 11. The beginning of a swarm of earthquakes in the area of the Hornsund settlement

Зона 3. К северу от пос. Кингсбей

Зона 3 активизировалась к августу 2017 г (рис. 12). Наблюдается типичная картина ледниковой активности — плавная активизация в августе-сентябре, большую часть потока составляют события небольших магнитуд — 1,0–1,2.

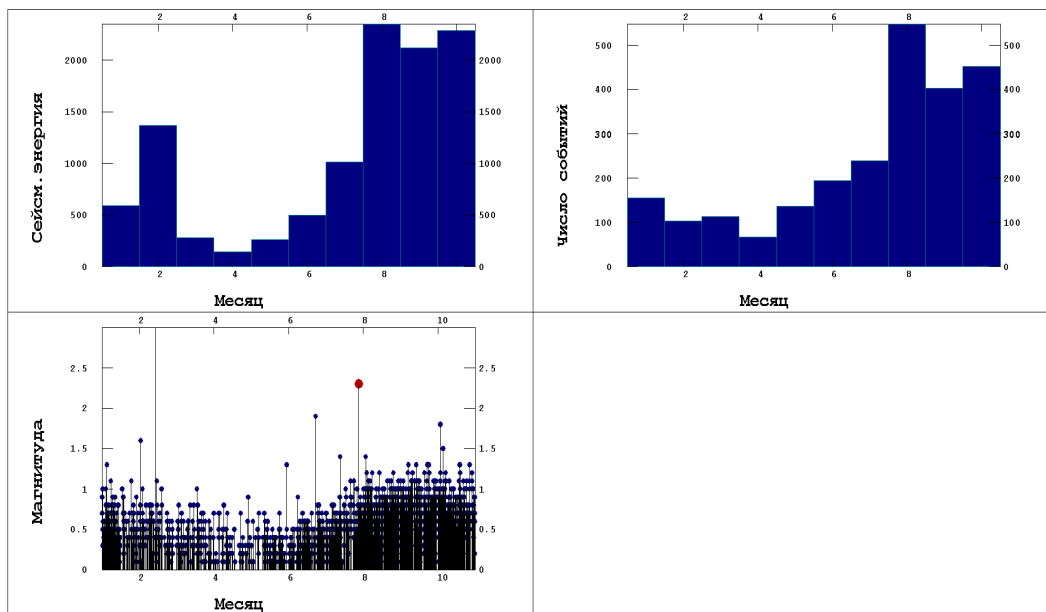


Рис. 12. Динамика сейсмического процесса в зоне 3 (к северу от пос. Кингсбей)

Fig. 12. Dynamics of the seismic process in zone 3 (to the north of the Kingsbey settlement)

Зона 4. К северо-востоку от пос. Лонгийр

По динамике сейсмического процесса данная зона полностью аналогична зоне 3 (рис. 13). Наблюдается типичная картина ледниковой сейсмичности.

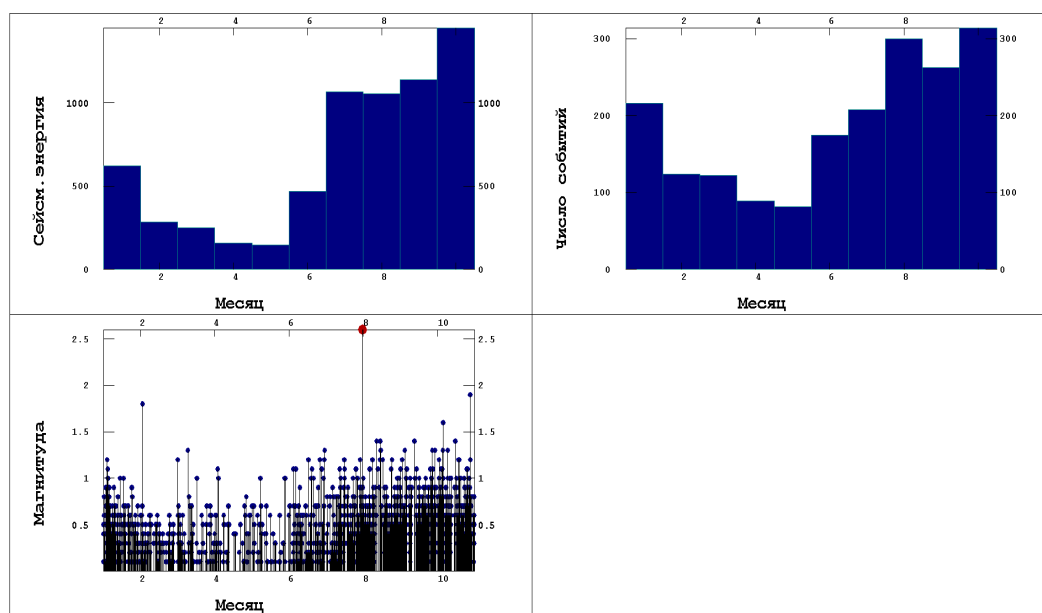


Рис. 13. Динамика сейсмического процесса в зоне 4 (к северо-востоку от пос. Лонгийр)

Fig. 13. Dynamics of the seismic process in zone 4 (to the north-east of the town of Longyearbyen)

Зона 5. Район Свеагрува

В марте 2017 г. в этой зоне произошел кратковременный скачок сейсмической активности (рис. 14). Скачок выразился в многократном увеличении числа слабых событий с магнитудами меньше 1. Распределение числа событий по часам суток и дням недели близко к равномерному, что позволяет исключить их техногенную природу. Возможно, наблюдалась кратковременная активизация ледника.

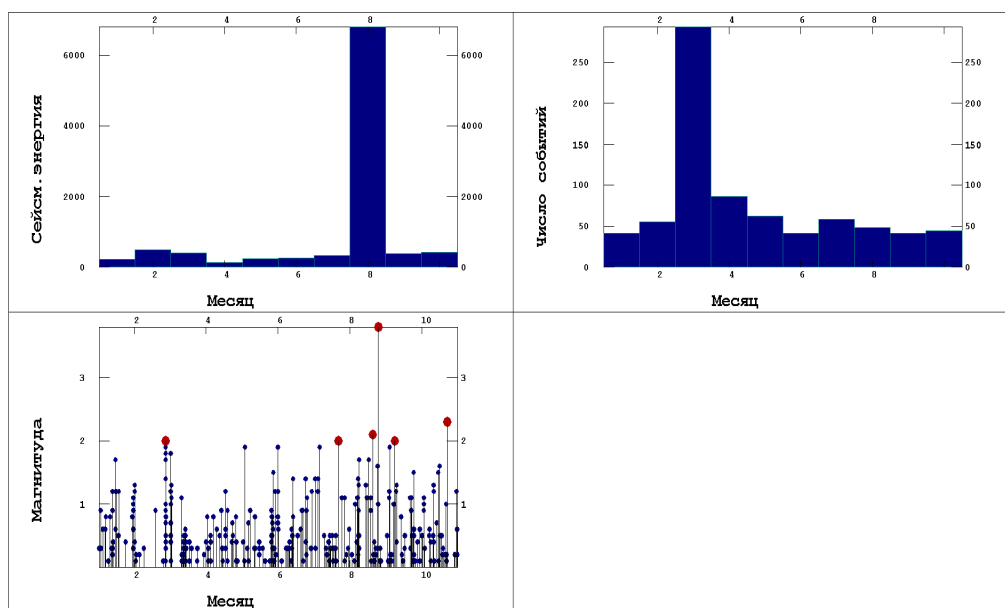


Рис. 14. Динамика сейсмического процесса в зоне 5 (район пос. Свеагрув)

Fig. 14. Dynamics of the seismic process in zone 5 (area of the Sveagruga settlement)

Зона 6. Ледник Осгор

К концу 2017 г. (ноябрь-декабрь) активизировалась зона на территории ледника Осгор. Число низкомagnitudeных событий в декабре 2017 г. скачкообразно увеличилось (рис. 15).

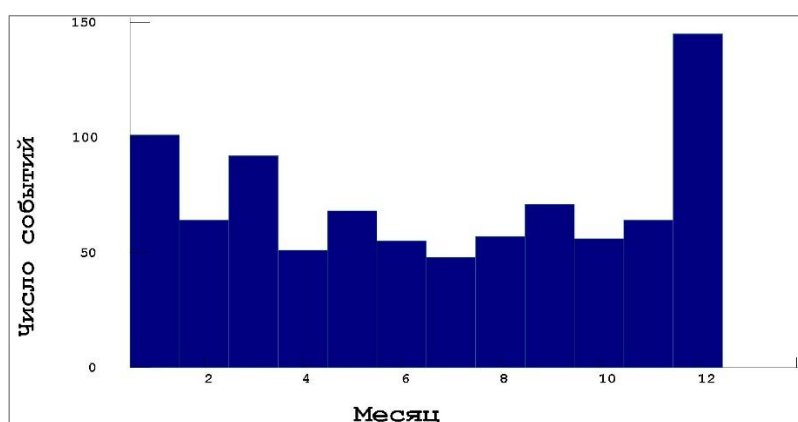


Рис. 15. Динамика сейсмического процесса в зоне 6 (район ледника Осгор)

Fig. 15. Dynamics of the seismic process in zone 6 (area of Åsgardfonna glacier)

Заключение

По результатам обработки данных 2017 г. можно сделать следующие выводы:

1. Сейсмический режим архипелага является комбинацией потоков событий различной природы — тектонических, ледниковых и, возможно, какой-то другой природы (достоверных объяснений активизации зоны в устье залива Ис-фьорд и района Свеагрув пока не найдено).
2. Сейсмический режим архипелага нестационарен, помимо фоновой сейсмичности выделяются рои землетрясений и афтершоковые последовательности.

Таким образом, использование системы NSDL позволяет по-новому взглянуть на сейсмическую активность архипелага, заметить явления, которые не наблюдались ранее, а также проследить изменение сейсмической активности во времени.

В дальнейшем необходимо обработать с применением данного подхода все имеющиеся данные для анализа динамики сейсмичности Шпицбергена за более длительный период времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Austegard A.* Earthquakes in the Svalbard area. Norsk Polarinst. Årbok, 1974. P. 83–99.
2. *Mitchell B. J., Chan W. W.* Characteristics of earthquakes in the Heerland Seismic Zone of Eastern Spitsbergen // Polarforschung. 1978. Vol. 48. P. 31–40.
3. NORSAR GBF Bulletins — 2012. URL: <http://www.norsardata.no/NDC/bulletins/gbf>.
4. NORSAR Reviewed Regional Seismic Bulletin. URL: <http://www.norsardata.no/NDC/bulletins/regional>.
5. Система автоматического мониторинга сейсмичности северо-запада России и западного сектора Арктики / В. Э. Асминг [и др.] // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: материалы XI Междунар. сейсмол. шк. / отв. ред. А. А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2016. С. 34–36.
6. 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.
7. Сейсмологические наблюдения за активностью ледников архипелага Шпицберген / А. В. Федоров [и др.] // Вестник МГТУ. 2016. Т. 19, № 1. С. 151–159.
8. Кольский филиал Единой геофизической службы РАН: офиц. сайт. URL: <http://www.krsc.ru>.

Сведения об авторах

Асминг Владимир Эрнестович — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Кольского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»

E-mail: asmingve@mail.ru

Фёдоров Андрей Викторович — кандидат физико-математических наук, зам. директора по науке Кольского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»

E-mail: andrey_v_fedorov@inbox.ru

Аленичева Алена Олеговна — младший научный сотрудник Кольского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»

E-mail: polushkina-alena@yandex.ru

Евтюгина Зинаида Анатольевна — кандидат биологических наук, научный сотрудник Кольского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»

E-mail: zina_evt@mail.ru

Author Affiliation

Vladimir E. Asming — PhD (Physics & Mathematics), Leading Researcher, Kola Branch of the Geophysical Survey of RAS

E-mail: asmingve@mail.ru

Andrey V. Fedorov — PhD (Physics & Mathematics), Deputy Director for Science, Kola Branch of the Geophysical Survey of RAS

E-mail: andrey_v_fedorov@inbox.ru

Alena O. Alenicheva — Junior Researcher, Kola Branch of the Geophysical Survey of RAS

E-mail: polushkina-alena@yandex.ru

Zinaida A. Jevtjugina — PhD (Biology), Researcher, Kola Branch of the Geophysical Survey of RAS

E-mail: zina_evt@mail.ru

Библиографическое описание статьи

Применение системы автоматической локации NSDL для детального изучения сейсмичности архипелага Шпицберген / В. Э. Асминг [и др.] // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2018. — № 3 (10). — С. 120–131.

Reference

Asming Vladimir E., Fedorov Andrey V., Alenicheva Alena O., Jevtjugina Zinaida A. Usage of the NSDL Location System for the Detailed Study of the Spitsbergen Archipelago Seismicity. *Herald of the Kola Science of the RAS*, 2018, vol. 3 (10), pp. 120–131 (In Russ.).