УДК 550.348.435

СЕЙСМИЧЕСКОЕ СОБЫТИЕ 11 НОЯБРЯ 2018 Г. ВБЛИЗИ О. МАЙОТТА ПО ДАННЫМ КАЗАХСТАНСКИХ СТАНЦИЙ МОНИТОРИНГА

Рябенко П.В., Соколова И.Н.

Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

Исследованы характеристики длиннопериодного сейсмического события 11.11.2018 г., связанного с рождением вулкана, вблизи острова Майотта (архипелаг «Коморские острова»). По сейсмическим записям сети станций Института геофизических исследований создан сейсмический бюллетень, изучены кинематические и динамические параметры этого события, проведена его локализация и рассчитана региональная магнитуда по поверхностным волнам *MLH*. Найдены и исследованы сейсмические записи аналогичных событий 02.09.2018 г. Предложены рекомендации для аналитиков по обработке и классификации длиннопериодных монохроматических треморов.

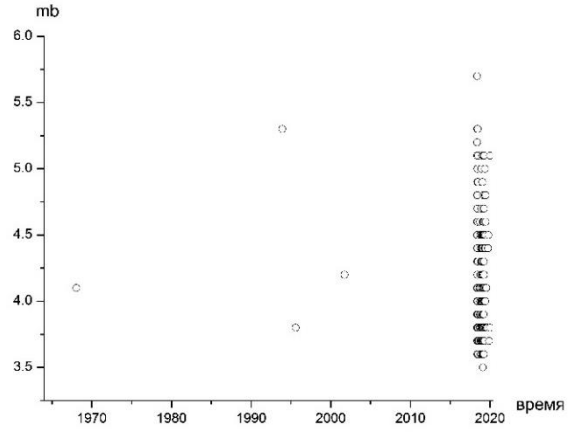
Введение

В ноябре 2018 г. сейсмические станции мира зарегистрировали странное длиннопериодное сейсмическое событие, запись которого оказалась не похожей на записи землетрясений, привычные для сейсмологов. Колебания были больших периодов ~16 с, практически монохромные, длительностью >20 минут, тогда как на записях землетрясений обычно наблюдаются колебания спектра самых различных частот. Поэтому событие 11.11.2018 г. вызвало огромный интерес у научной общественности мира. Очаг странных колебаний находился вблизи небольшого острова Майотта в Индийском океане в архипелаге Коморских островов [1]. Казахстанские станции, входящие в сеть Института геофизических исследований (ИГИ) [2], записали сейсмическое событие, данные некоторых станций участвовали в обработке, проведенной в Международном центре данных (МЦД) [3]. Поскольку у аналитиков Центра данных ИГИ ранее не было опыта работы с такого рода записями, были исследованы несколько вопросов: какова природа события, не является ли оно техногенным (зарегистрированные мощные поверхностные волны похожи на волны от взрывов или обрушения), каковы технические возможности сети мониторинга ИГИ в регистрации аналогичных событий, возможно ли определить параметры такого события и регистрировались ли подобные сейсмические события раньше?

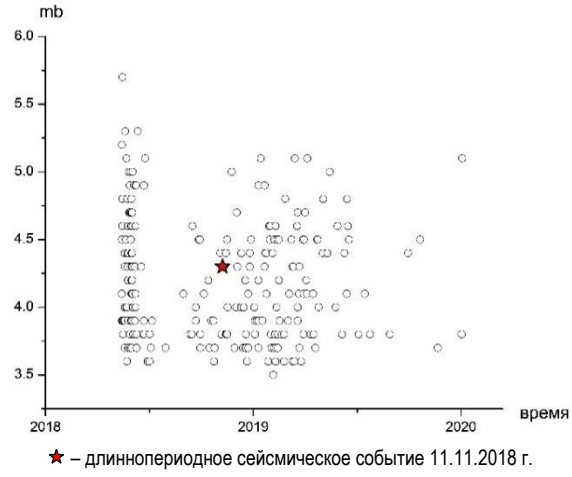
Сейсмичность о-ва Майотта

Вулканический архипелаг «Коморские острова» состоит из 33 островов. Четыре самые крупные из них – Гранд-Комор, Мохели, Анжуан и Майотта. Вулканизм Коморских островов охватывает исторические периоды миоцена и голоцена. Остров Майотта имел раннюю фазу магматической активности 11 млн. лет назад. Последнее задокументированное вулканическое событие было несколько тысяч лет назад к востоку от о-ва Майотта [1]. На территории архипелага в историческое время было несколько ощутимых землетрясений, о-в Майотта характеризовался средней сейсмической активностью. Несколько разрушительных землетрясений были на Майотта в 1606, 1679 и 1788 гг., а ощутимые землетрясения – в 1808, 1829, 1865 гг. [1].

Для исследований выбран район, ограниченный координатами: φ=13,5° ÷ 12,1°ю. ш., λ=44,6°÷46° в. д. На рисунке 1 приведены даты и магнитуды землетрясений из района о-ва Майотта по данным Международного сейсмологического центра, начиная с 1964 г. до 2019 г. [4].

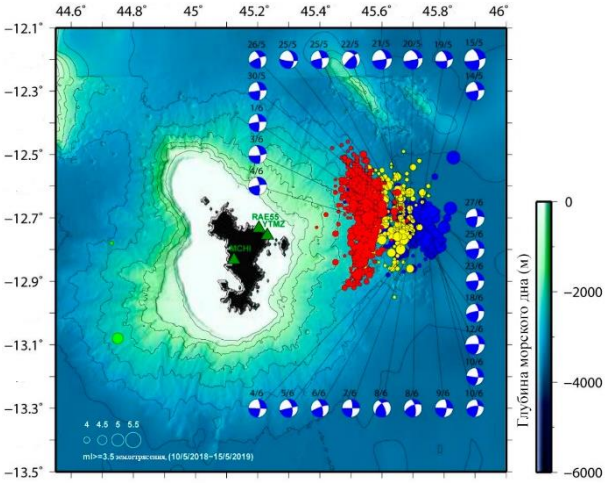


а) за 1964–2019 гг.



б) за 2018–2019 гг.

Рисунок 1. Распределение магнитуд mb землетрясений района о. Майотта во времени



Кластеры землетрясений: ● – с 10.05.2018 г. до начала июля 2018 г.; ● – с 26.06.2018 г.; ● – с середины июля 2018 г. ● – землетрясения, зарегистрированные в период наблюдений, но вне кластерной сейсмичности. Фокальные механизмы CMT – для событий с *ml*> 4,7 в период с 14.05. по 27.06.2018 г. [1]

Рисунок 2. Карта локализованных землетрясений района о. Майотта с ml ≥ 3,5 в период с 10.05.2018 г. по 15.05.2019 г.

До 2018 г. (рисунок 1-а) в районе острова произошло 4 землетрясения, самые сильные из них – 01.12.1993 г. (*mb*=5,2), 09.09.2011 г. (*Mw*=5,0). Начиная с мая 2018 г. количество землетрясений резко возросло (рисунок 1-б), вулкано-сейсмическая последовательность началась 10.05.2018 г. и в течение года произошло 32 землетрясения с магнитудой >5, среди которых самое сильное – 15.05.2018 г. с *Mw*=5,9 [1].

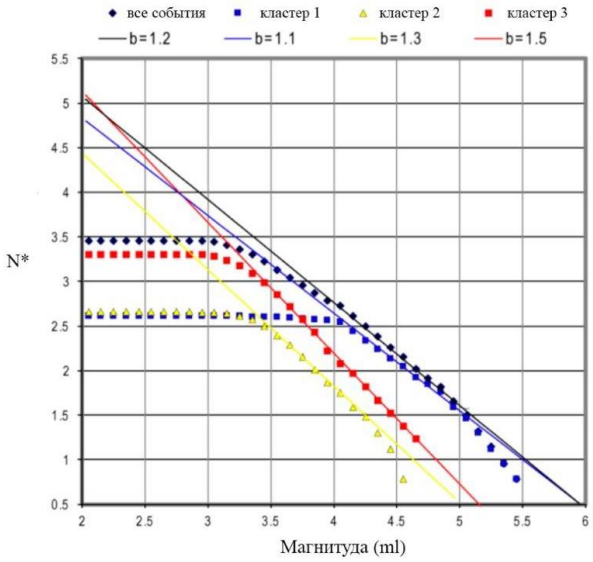


Рисунок 3. Параметр b для 3-х кластеров землетрясений и всей последовательности [1]

В [1] исследована локальная сейсмичность вблизи о-ва Майотта по данным локальной сети станций, существующей на архипелаге. Кроме того, привлекались данные сейсмических станций IRIS IDA и IRIS GSN [1]. За период с 10.05.2018 г. до 15.05.2019 г. локальной сетью было зарегистрировано 1872 землетрясения с $ml \geq 3{,}5$, из них 32 с $ml \geq 5$ и 161 с $ml \geq 4{,}5$ (рисунок 2). Большинство землетрясений ощущалось жителями архипелага [1]. Рой землетрясений может быть разбит на 3 кластера (рисунок 2): первый из них активен в основном с 10.05.2018 г. до начала июля 2018 г., второй – с 26.06.2018 г. и третий – с середины июля 2018 г.

На рисунке 3 приведены графики повторяемости для каждого из 3-х кластеров землетрясений, а также сводный график - для всех последовательностей [1]. Для всей последовательности землетрясений параметр (угол наклона графика повторяемости магнитуд) b=1,2; для 1 кластера – b=1,1; для 2 кластера – b=1,3; для 3 кластера – b=1,5. Полученные значения сильно отличаются от параметров сейсмического режима континентальных тектонических областей.

Регистрация сейсмического события 11 ноября 2018 г.

11.11.2018 г. широкополосные станции во всем мире зафиксировали очень низкочастотный (T~16 с) продолжительный тремор. Волновая картина этого события очень необычна: низкочастотная сейсмическая фаза продолжалась, как будто затухающие колебания в резонаторе. По записям близких станций, исходя из поляризации и скорости, в [1] определена природа этой волны как волна Релея *LR*. На рисунке 4 приведены сейсмические записи события станциями глобальной сети наблюдений IRIS IDA и IRIS GSN, расположенными на расстоянии от 906 км (станция АВРО, Мадагаскар) до 17 000 км (станция РОНА, Гавайи).

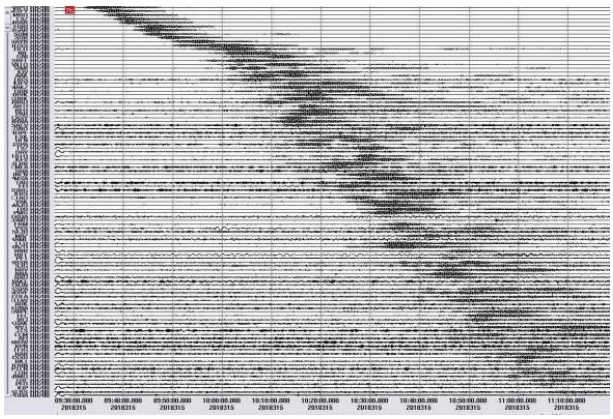


Рисунок 4. Сейсмические записи события 11.11.2018 г. 09-27, вблизи Мадагаскара станциями сети IRIS IDA и IRIS GSN. Расстояние 906–17 375 км. Фильтр 0,01–0,1 Гц

На рисунке 5 приведены сейсмические записи станций сети мониторинга ИГИ, расположенных на расстоянии 6697–7741 км (таблица 1). По казахстанским станциям на основе f-k анализа определен азимут на эпицентр, который совпадает с предполагаемым эпицентром события возле острова Майотта.

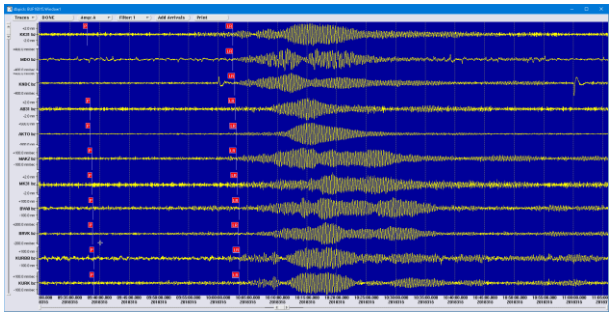
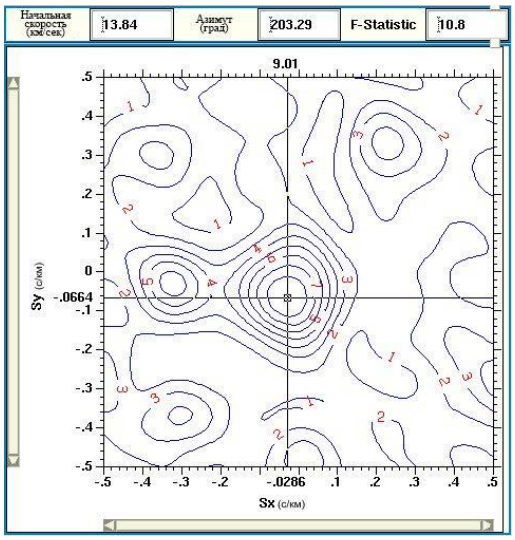
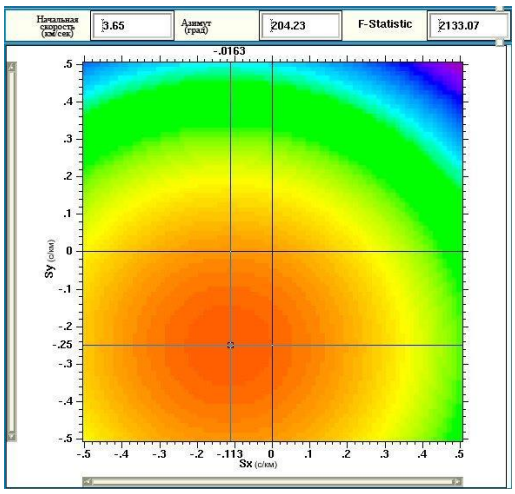


Рисунок 5. Сейсмические записи события 11.11.2018 г. 09-27 вблизи о. Майотта станциями сети ИГИ. Расстояние 6697–7741 км. Фильтр 0,01–0,1 Гц



а) волна P



б) волна LR

Рисунок 6. Результаты FK-анализа по данным сейсмической группы Акбулак (ABKAR)

Получены F-K диаграммы по данным станции Акбулак (рисунок 6), которые позволили определить по волне *P* азимут на событие, равный 203,3 град., кажущуюся скорость 13,84 км/с, для волны *LR* азимут равен 204,2 градуса, кажущаяся скорость 3,65 км/с.

Для вертикальной компоненты записей станций ИГИ построены спектры Фурье (рисунок 7). Максимум спектра по всем станциям примерно одинаков и соответствует периоду *Tmax*=15,4 с.

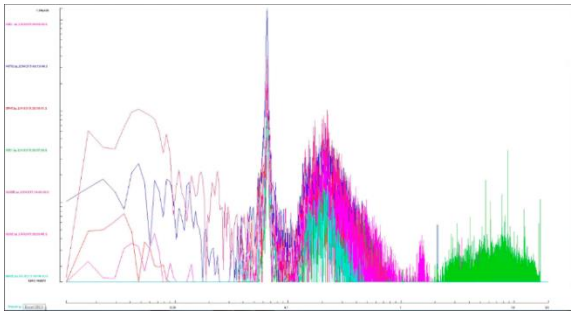


Рисунок 7. Спектры Фурье волны LR, зарегистрированной сейсмическими станциями сети ИГИ. Z-компонента

Несмотря на то, что станции ИГИ расположены от о-ва Майотта на большом удалении и в узком створе азимутов (таблица 1, рисунок 8), была проведена локализация события 11.11.2018 г. В таблице 1 представлен сейсмический бюллетень. По 3-м станциям была рассчитана магнитуда *MLH*, среднее значение *MLH*=4,5.

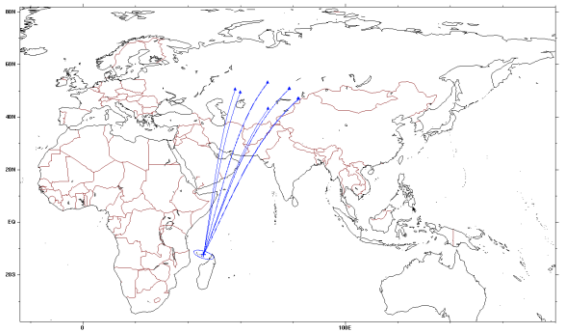


Рисунок 8. Расположение эпицентра сейсмического события 11.11.2018 г. сейсмических станций ИГИ, участвовавших в обработке, и эллипса ошибок

Из глобальных сейсмологических Центров записи события 11.11.2018 г. были обработаны только в МЦД [3, 4]. В таблице 2 приведены параметры сейсмического события 11.11.2018 г. по данным различных сейсмологических Центров.

По данным МЦД *Ms*=4,3, *mb*=3,8, большая полуось эллипса ошибок составила *Smaj*=1152 км [3, 4]. Следует отметить, что решения по данным станций ИГИ *Smaj* гораздо ниже, и составила *Smaj*=430 км. Кроме данных МЦД и ИГИ в таблице 2 представлены результаты локализации события по сети локальных станций [1]. По данным близких станций было видно, что произошло не одно событие, а, как минимум, 3. На рисунке 9 приведена сейсмограмма станции MCHI (канал B – 3), на которой видно 3 события: в 9:27:27 2 землетрясения с *ml* = 3,1; в 9:27:56 и *ml* = 3; в 9:29:30 с координатами 12,61°S, 45,49°E и 12,58°S, 45,47°E, с фиксированной глубиной 10 км [1] (таблица 2).

Таблица 1. Бюллетень сейсмического события 11.11.2018 г. вблизи о-ва Майотта

Код станции	Время вступления	Фаза	Азимут	A_{max}, нм	V_{app}, км/с	Период, T_{max}	Δ, км	*MLH*
AB31	09:38:21:7	P	203,29		13,84		7017	
KK31	10:02:27.6	LR		866,9		15,1	6697	
MDO	10:02:30.4	LR		1154,7		17,9	6984	
KNDC	10:02:48.7	LR		1037,1		16,1	6985	
AB31	10:02:50.9	LR	204,23	707	3,65	14,7	7017	
MAKZ	10:03:02.3	LR		473,8		15,7	7542	
AKTO	10:03:04.8	LR		1365,1		15,6	7108	4,9
MK31	10:03:14.1	LR	247,38	660,7	3,08	15,5	7556	
BRVK	10:03:25.1	LR		616,9		16,3	7672	
BVA0	10:03:29.9	LR		425,2		16,9	7672	
KURK	10:03:30.5	LR		416,4		15,8	7741	4,2
KURBB	10:03:38.8	LR	201,92	428,1	3,54	17,5	7729	4,3

Таблица 2. Параметры сейсмического события 11.11.2018 г. вблизи о-ва Майотте по данным различных сейсмологических центров

Сеть	Время в очаге	Координаты		Кол-во станций в определении	S_{maj}, км	*MLH*/*MS*	*mb*	*ML*
		широта	долгота					
ИГИ	09:27:49.5	−12,3209	45,9467	12	430	4,5		
MCM	09:28:03.8	−10,8217	47,1707	30	1152	4,3	3,8	2,8
Локальная	9:27:27	−12,777	45,590					
Локальная	9:27:56	−12,61	45,49					3,1
Локальная	9:29:30	−12,58	45,47					3

Таблица 3. Параметры сейсмического события 09.02.2018 г. вблизи о-ва Майотта по данным МЦД

Сеть	Время в очаге	Координаты		Кол-во станций в определении	S_{maj}, км	*MLH*/*MS*	*mb*	*ML*
		широта	долгота					
MCM	08:46:33.4	−12,7761	45,3708	21	46	4,0	4,1	4,4

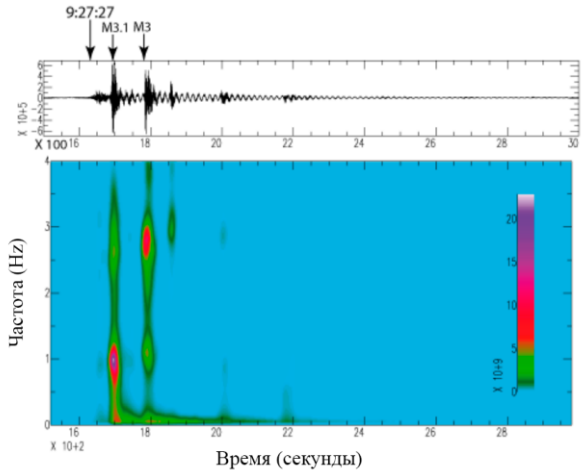


Рисунок 9. Сейсмограмма и спектрограмма сейсмических событий 11.11.2018 г. по данным станции MCHI [1]

СЕЙСМИЧЕСКИЕ СОБЫТИЯ 2 СЕНТЯБРЯ 2018 Г.

После исследования особенностей волновой картины тремора 11.11.2018 г., проведен поиск похожих сейсмических событий. В [1] по данным локальной сети мониторинга было обнаружено еще 2 длиннопериодных тремора меньшей интенсивности из того же района. Оба события произошли 02.09.2018 г. и представляют несколько небольших высокочастотных событий, сопровождавшихся монохромными низкочастотными волнами с пиковой частотой F=0,062 Гц. Первая серия событий была в 08:38–08:55, вторая – в 11:12–11:32. Запись первого события была обработана в МЦД [3, 4] (таблица 3).

Станции ИГИ записали оба сейсмических события, были изучены кинематические и динамические параметры сейсмограмм (таблицы 4, 5), однако локализовать эти события не удалось.

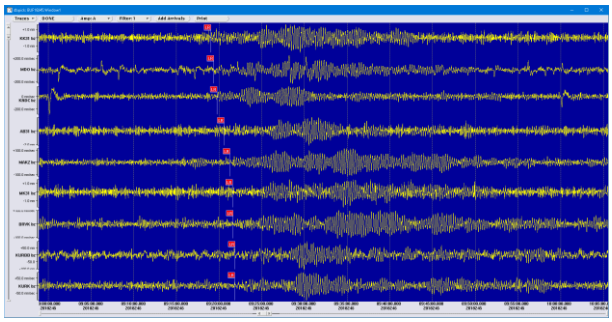
Таблица 4. Бюллетень сейсмического события 02.09.2018 г. t0=08-38.

Код станции	Фаза	Азимут, град.	V_{app}, км/с	A_{max}, нм	Период, T_{max}	Δ, км
KK31	LR			450,2	17,3	6697
MDO	LR			742,4	19,88	6984
KNDC	LR			395	16,1	6985
AB31	LR	194,8	3,65	419,6	14,95	7017
MAKZ	LR			277,4	15,25	7542
MK31	LR	246,74	3,04	393	16,65	7556
BRVK	LR			268,7	17,1	7672
KURK	LR			215,1	16,7	7741
KURBB	LR	199,16	3,56	214,6	14,5	7729

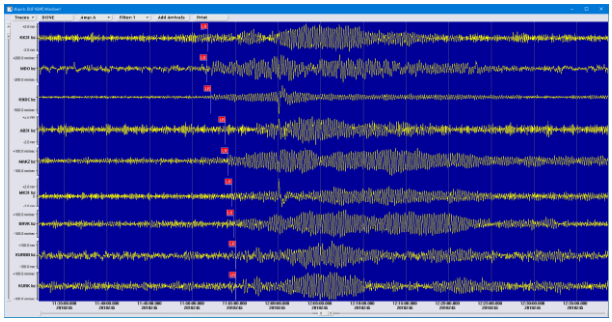
Таблица 5. Бюллетень сейсмического события 02.09.2018 г. t0=11:12.

Код станции	Фаза	Азимут, град.	V_{app}, км/с	A_{max}, нм	Период, T_{max}	Δ, км
KK31	LR			663,4	17,8	6697
MDO	LR			652,1	17,6	6984
KNDC	LR			1291,9	18,1	6985
AB31	LR	201,52	3,58	612,4	17,4	7017
MAKZ	LR			375,6	17,9	7542
MK31	LR	246,13	3,24	330,9	13,4	7556
BRVK	LR			392,5	17,7	7672
KURK	LR			253,9	14,5	7741
KURBB	LR	203,4	3,46	324,4	17,7	7729

Форма записей события 02.09.2018 г. (рисунок 10-а, б) близка к записям события 11.11.2018 г., что свидетельствует о схожем механизме событий и близком расположении очагов.



а) фильтр 0,01–0,1 Гц



б) фильтр 0,01–0,1 Гц

Рисунок 10 Сейсмические записи станциями сети ИГИ события 02.09.2018 г. 08-38, вблизи о-ва Майотта

Обсуждение природы события

Событие 11.11.2018 г. вблизи о-ва Майотта имеет некоторое сходство с двумя событиями, описанными для Полинезии [6]. Авторы объяснили эти события как резонанс заполненного жидкостью резервуара, вызванного движением магмы под высоким гидростатическим давлением. Если это событие относится к очень длиннопериодной сейсмичности (по диапазону частот), формы его волны являются типичными для некоторых событий с большими периодами, связанных с затухающими колебаниями в резонаторе. Как и в случае событий, зарегистрированных в 2011 и 2013 гг. в Полинезии [6], событие 11.11.2018 г. и другие более мелкие события, генерируемые на шельфе о-ва Майотта, можно рассматривать как сейсмические события, связанные с колебаниями после точечного возбуждения [1]. В [1] при помощи исследования GNSS-станций анализа инферометрии InSAR показано, что с середины июля 2018 г. о-в Майотта дрейфовал с небольшим увеличением скорости, пока в конце 2018 г. не достиг пиковых скоростей ~224 мм/год на восток и ~186 мм/год вниз. С тех пор деформация плавно уменьшалась, достигнув в июле 2019 г. половины максимальной скорости. Смоделированная камера спада магмы расположена в 45±5 км к востоку от Майотта на глубине 28±3 км. Скорость извлечения магмы составляет ~94 $м^3с^{-1}$ на максимуме в конце 2018 г. и ~44 $м^3с^{-1}$ в июле 2019 г. Общий объем, извлеченный из глубокого источника в июле 2019 г., составляет 2,3 $км^3$.

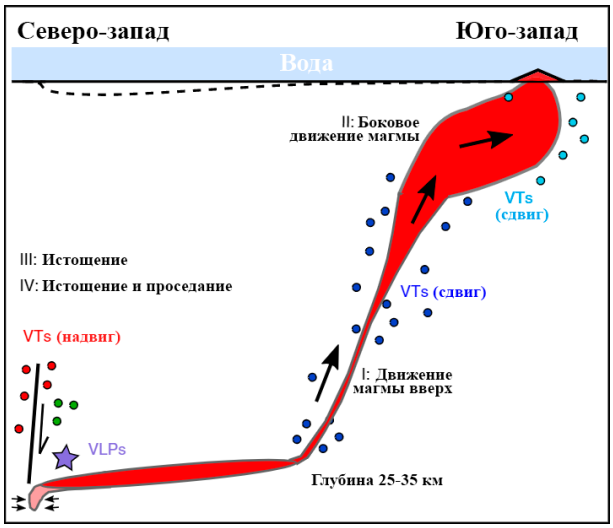


Рисунок 11. Эскиз глубокого магматического резервуара и восходящего пути магмы для формирования нового подводного вулкана [6]

Заключение

По сейсмическим записям станций сети ИГИ изучен новый тип сейсмических событий – длиннопериодный монохроматический тремор, связанный с рождением вулкана. Создан сейсмический бюллетень, изучены кинематические и динамические параметры события 11.11.2018 г. Параметры сейсмического события получены с неплохой точностью. Найдены и исследованы сейсмические записи аналогичных событий 02.09.2018 г. Полученные результаты могут быть использованы для задач сейсмического распознавания природы источника и в практике работ аналитиков Центра данных.

Литература

1. Lemoine, A. The 2018–2019 seismo-volcanic crisis east of Mayotte, Comoros islands: seismicity and ground deformation markers of an exceptional submarine eruption / A. Lemoine [et al] // Geophysical Journal International. – 2020. – 55 p. –preprint.
2. Mikhailova, N.N. Monitoring system of the Institute of Geophysical Research of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan / N.N. Mikhailova, I.N. Sokolova // Summary of the Bulletin of the International Seismological Centre 2016 January–June. − V 53. − Issue 1, 2019. − P. 27–38.
3. Международный Центр данных ДВЗЯИ [Электронный ресурс]: – Режим доступа: http://www.ctbto.org/, авторизованным пользователям.
4. Международный сейсмологический Центр [Электронный ресурс]: – Режим доступа: http:// www.isc.ac.uk, свободный.
5. Talandier, J. Unusual seismic activity in 2011 and 2013 at the submarine volcano Rocard, society hot spot (French Polynesia) / J. Talandier, O. Hyvernaud, R.C Maury // Geophys. Res. Lett., 2016. – 43. – P. 4247 – 4254. – DOI: 10.1002/2016GL068342.
6. Cesca, S. Drainage of a deep magma reservoir near Mayotte inferred from seismicity and deformation nature research / S. Cesca [et al] // Nature Geoscience. – January 2020. – 13(1). – P. 87–93. – DOI: 10.1038/s41561-019-0505-5.

ҚАЗАҚСТАНДЫҚ МОНИТОРИНГ СТАНЦИЯЛАРЫНЫҢ ДЕРЕКТЕРІ БОЙЫНША МАЙОТТЕ АРАЛЫ ЖАНЫНДА 2018 Ж. 11 ҚАРАШАДАҒЫ СЕЙСМИКАЛЫҚ ОҚИҒА

П.В. Рябенко, И.Н. Соколова

Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

Майотте аралының жанында («Комор аралдары» архипелагы) жанартаудың тууымен байланысты 2018 ж. 11.11-індегі ұзақ мерзімді сейсмикалық оқиғаның сипаттамасы зерттелді. Геофизикалық зерттеулер институты станциялары желісінің сейсмикалық жазбалары бойынша сейсмикалық бюллетень жасалды, осы оқиғаның кинематикалық және динамикалық параметрлері зерделенді, оны жергіліктеуі жүргізілді және MLH жер беті толқындары бойынша өңірлік магнитуда есептелген. 2018 ж. 09.02-сіндегі тәрізді оқиғалардың сейсмикалық жазбалары табылды және зерттелді. Ұзын периодты монохроматикалық треморларды өңдеу және жіктеу бойынша талдаушыларға ұсыныстар ұсынылды.

SEISMIC EVENT OF NOVEMBER 11, 2018 NEAR MAYOTTE ISLAND BASED ON DATA FROM KAZAKHSTANI MONITORING STATIONS

P.V. Ryabenko, I.N. Sokolova

Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan

Long-period seismic event of 11.11.2018 was studied; this event is connected with the birth of a volcano near Mayotte island (Comoro islands archipelago). Using seismic records from the networks of stations of Institute of Geophysical Research, a seismic bulletin was created; kinematic and dynamic parameters of this event were studied; its localization was identified and regional magnitude on surface MLH waves was calculated. Seismic records of analog events on 02.09.2018 were found and researched. Recommendations for analysts on processing and classification of long-period monochrome tremors were proposed.