МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Республиканское государственное предприятие на праве хозяйственного ведения
ИНСТИТУТ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
(РГП ИГИ)

УДК 550.348.435

РЯБЕНКО ПАВЕЛ ВИКТОРОВИЧ

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

Работа, представляемая на конференцию-конкурс НИОКР молодых ученых и специалистов Национального ядерного центра Республики Казахстан

(прикладные исследования)

Научный руководитель Михайлова Н.Н., и. о. зам. генерального директора по научной работе – директор филиала ЦСОССИ, д.ф.-м.н.

г. Курчатов, 2020 г.

АВТОР

Рябенко Павел Викторович,

научный сотрудник группы технической поддержки
филиала «Центр сбора и обработки специальной сейсмической информации ИГИ МЭ РК»,
1988 года рождения,
образование высшее (Университет «Туран». 2015г),
специальность – информационные системы,
квалификация по диплому – магистр технических наук,
работает в Филиале «ЦСОССИ ИГИ МЭ РК» с 2010 г.,
общий стаж работы 9,5 лет.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный сотрудник .В Рябенко
подпись, дата 13.04.2020г.

Рябенко П.В.

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

Работа, представленная на конференцию - конкурс НИОКР молодых ученых и специалистов Национального ядерного центра Республики Казахстан.

Республиканского государственного предприятия «Институт геофизических исследований» (РГП ИГИ).

050020, г. Алматы, Чайкиной 4, тел. (727)263-13-30, (727)263-48-82,

Факс (727)263-48-82, E-mail: ruabenko@kndc.kz

РЕФЕРАТ

Работа 11 страниц, 14 рисунков, 5 таблиц, 6 источников.

Объект исследования: сейсмические записи низкочастотных треморов, связанных с образованием вулкана, на сейсмических станциях ИГИ МЭ РК.

Цель работы: Изучить и описать новый класс сейсмических явлений для быстрой и надежной обработки и интерпретации в будущем.

Задачи исследований:

Кинематические и динамические параметры низкочастотных треморов, связанных с образованием вулкана.

Методика исследований:

- обнаружение сигналов от вулканических землетрясений;
- локализация источника события;
- FK анализ по сейсмическим группам
- определение амплитуд колебаний на станциях мониторинга, расчет магнитуды.

Результаты работы:

Создан сейсмический бюллетень низкочастотных треморов из района острова Майотте. Проанализирована сейсмическая активность, связанная с вулканической деятельностью.

Актуальность: Работа связана с необходимостью мониторинга и интерпретации записей сейсмических событий различной природы.

Научная новизна: впервые исследованы сейсмические записи от вулканических землетрясений и движения магмы под поверхностью земли.

Практическая ценность: Найдены и описаны критерии сейсмического распознавания длиннопериодных треморов, связанных с вулканической деятельностью.

Личный вклад автора:

- обработка сейсмограмм станций ИГИ;
- анализ и интерпретация данных

Публикации:

1. Рябенко П. В., Капчагайское землетрясение 1 мая 2011 года по данным региональной сети сейсмических станций. / Рябенко П. В., Сейнасинов Н.А., Михайлова Н. Н.// Тезисы докладов Международной конференции молодых ученых и специалистов «Актуальные вопросы мирного использования атомной энергии» Алматы ИЯФ, 6 – 8 июня 2012 г. – С. 184 – 185.

2. Рябенко П. В., Капчагайское землетрясение 1 мая 2011 года по данным региональной сети сейсмических станций. / Рябенко П. В., Сейнасинов Н.А., Михайлова Н. Н.// Актуальные вопросы мирного использования атомной энергии. Доклады международной конференции молодых ученых и специалистов. 6-8 июня 2012 г. Алматы. 2012.- С. 149-159

3. Рябенко П. В., Трехмерная модель очага Капчагайскоего землетрясения 1 мая 2011 года. / Рябенко П. В., Сейнасинов Н.А., Михайлова Н. Н.// Ядерный потенциал Казахстана: Сборник докладов/ассоциация «Ядерное общество Казахстана» - Алматы. 2012.- С.79-86.

4. Рябенко П. В., Применение информационных технологий для контроля качества сейсмических данных. / Рябенко П.В. // Материалы Международной научно-практической конференции «Современные информационно-коммуникационные технологии в образовании: состояния и перспективы развития». 20 декабря 2013г. Алматы. 2013.- С. 256 – 265

5. Рябенко П. В., Очаг и афтершоковая активность землетрясения 28.01.2013 г. на северном Тянь-Шане. / Рябенко П.В., Узбеков Р.Б.// Вестник НЯЦ РК выпуск 1, март 2014 С. 112-117.

6. Рябенко П. В., О сильном землетрясении 28.01.2013 г. На северном Тянь-Шане (по станциям ядерного мониторинга)/ Рябенко П.В., Узбеков Р.Б.// Ядерный потенциал Казахстана: Сборник докладов/ассоциация «Ядерное общество Казахстана» - Алматы. 2014.- С.3-10.

7. Рябенко П. В., Изучение относительных сейсмических характеристик грунтов на промышленной площадке АО «УМЗ»/ Рябенко П.В., Михайлова Н.Н.// Вестник НЯЦ РК выпуск 4, декабрь 2014 С. 112-119.

8. Рябенко П. В., Эффективность сейсмических станций в мониторинге землетрясений Территории Центральной Азии. / Рябенко П.В., Михайлова Н.Н.// Вестник НЯЦ РК выпуск 4, декабрь 2016 С. 70-76.

9. Рябенко П. В., Эффективность сейсмических станций в мониторинге землетрясений Территории Центральной Азии. / Рябенко П.В., Михайлова Н.Н.// Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XI Международной сейсмологической школы / ФИЦ ЕГС РАН, 2016 С. 275-279.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ, УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ И ТЕРМИНОВ

НЯЦ РК – Национальный ядерный центр Республики Казахстан
РГП ИГИ – Республиканское Государственное Предприятие
Институт Геофизических исследований
МЦД – Международный центр данных СТВТО
ЦСОССИ – Центр сбора и обработки специальной сейсмической информации
IRIS IDA —глобальная сеть широкополосных сейсмометров, эксплуатируемых Институтом геофизики и физики планет при Институте океанографии, Университет Калифорнии, Сан-Диего.
IRIS GSN – глобальная сейсмологическая сеть, представляет собой совместное партнерство между IRIS и Геологической службой США (USGS), координируемое с международным сообществом.
CMT – тензор центроида сейсмического момента.
GNSS – это система, позволяющая определять пространственное положение объектов местности путем обработки принимающим устройством спутникового сигнала.
Магнитуда (M, ml, mb, Mw, MLH, Ms) – количественная характеристика величины очага землетрясения, определяемая по записям землетрясений (сейсмограммам) на сейсмических станциях. Различный тип магнитуды определяется различным методом ее определения.
Волна Релея LR – тип поверхностной волны.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ……..…7
1. Сейсмичность о-ва Майотте ……....7
2. Регистрация сейсмического события 11 ноября 2018 г……9
3. Сейсмические события 2 сентября 2018 г.……..……. …13
4. Обсуждение природы события……..…14
ЗАКЛЮЧЕНИЕ……..…16
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ……...16

Введение

В ноябре 2018 г. все сейсмические станции мира зарегистрировали странное длиннопериодное сейсмическое событие. Сейсмограммы этого события не похожи на записи землетрясений, к которым привыкли сейсмологи. Колебания были больших периодов ~16 с, они были практически монохромными, длительность их более 20 минут. Для записей землетрясений обычно наблюдаются колебания целого спектра самых различных частот. Неудивительно, что событие 11 ноября 2018 г. вызвало огромный интерес у научной общественности всего мира. Очаг странных колебаний находился вблизи небольшого острова Майотте в Индийском океане в архипелаге Коморских островов [1]. Казахстанские станции, входящие в сеть Института геофизических исследований [2], отлично записали сейсмическое событие, некоторые из них участвовали в обработке Международного Центра данных [3].

У аналитиков Центра данных ранее не было опыта работы с такого рода данными. Поэтому нас интересовали несколько вопросов:

Какая природа исследуемого события? Не является ли оно техногенным, так как мощные поверхностные волны похожи как у взрывов или обрушения?

Какие технические возможности Казахстанской сети мониторинга, возможно ли определить параметры такого события?

Регистрировались ли аналогичные сейсмические события раньше, или оно уникально в своем роде?

Сейсмичность о-ва Майотте

Вулканический архипелаг Коморские острова состоит из 33 островов. Четыре самые крупные - Гранд-Комор, Мохели, Анжуан и Майотте. Вулканизм Коморских островов охватывал миоцен и голоцен, о-в Майотте имел раннюю фазу магматической активности 11 млн лет назад. Тем не менее последнее задокументированное вулканическое событие было несколько тысяч лет назад к востоку от Майотте [1]. На территории архипелага в историческое время было несколько ощутимых землетрясений, о-в Майотте характеризовался средней сейсмической активностью. Несколько разрушительных землетрясений были на Майотте в прошлом: в 1606, 1679 и 1788, и ощутимые землетрясения 1808, 1829, 1865 [1].

Для исследований мы выбрали район, ограниченный координатами: $\varphi=13.5° \div 12.1°$ю.ш., $\lambda=44.6°\div46°$ в.д. На рисунке 1 представлены магнитуды и даты землетрясений из района о-ва Майотте по данным Международного сейсмологического Центра, начиная с 1964 г. до 2019 г. [4]. Из рисунка 1а видно, что до 2018 г. в районе острова произошло 4 землетрясения, самое сильно из них 1 декабря 1993 г. (mb=5.2), а затем 9 сентября 2011 (Mw=5.0). однако начиная с мая 2018 г. количество землетрясений резко возросло, вулкано-сейсмическая последовательность началась 10 мая 2018 г., в течение года произошло 32 землетрясения с магнитудой более 5, самое сильное из землетрясений 15 мая 2018 г. с Mw=5.9 [1] (рисунок 1).

В работе [1] исследована локальная сейсмичность вблизи о-ва Майотте. На архипелаге существует локальная сеть сейсмических станций, кроме того, для обработки привлекались сейсмические станции IRIS IDA, IRIS GSN. За период с 10 Мая 2018 г. до 15 мая 2019 г. локальной сетью было зарегистрировано 1872 землетрясения с $ml \geq 3.5$, из них 32 с $ml \geq 5$ и 161 с $ml \geq 4.5$, большинство из которых ощущались жителями архипелага (рисунок 2) [1].

Рой землетрясений можно разбить на 3 кластера: первый кластер (синий на карте) активен в основном с 10 мая 2018 года до начала июля 2018 года, второй (желтый) с 26 июня 2018 года и третий (красный) с середины июля 2018 года (рисунок 2).

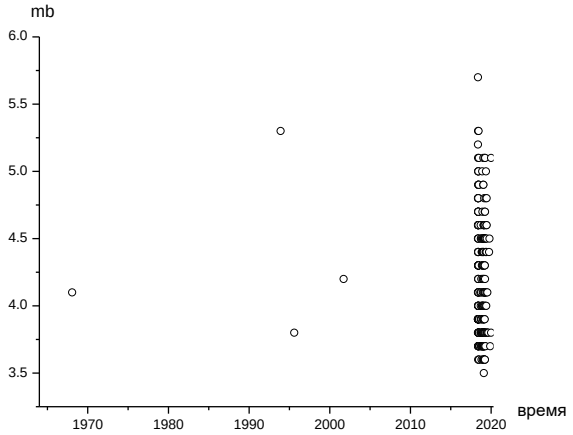

Рисунок 1а. Распределение магнитуд mb землетрясений района о.Майотте во времени за 1964-2019 гг.

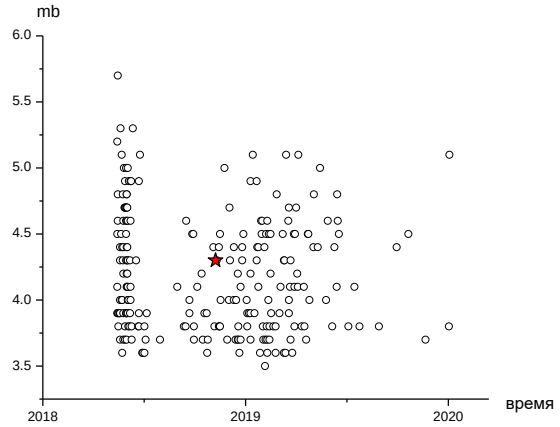

Рисунок 1б. Распределение магнитуд mb землетрясений района о.Майотте во времени за 2018-2019 гг., звездочка – длиннопериодное сейсмическое событие 11.11.2018 г.

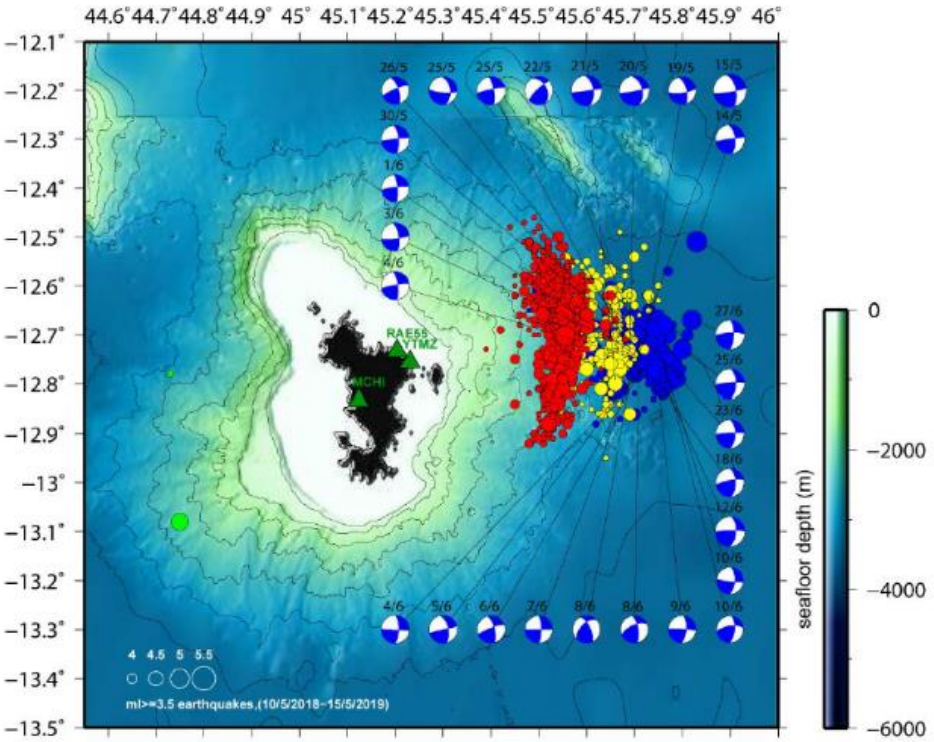

Рисунок 2. Карта локализованных землетрясений с ml ≥ 3.5 с 10 мая 2018 года по 15 мая 2019 года. Первый кластер (синий) активен в основном с 10 мая 2018 года до начала июля 2018 года, второй (желтый) с 26 июня 2018 года и третий (красный) с середины июля 2018 года. Зеленые точки представляют землетрясения, зарегистрированные в течение периода наблюдений, но вне кластерной сейсмичности. Фокальные механизмы CMT соответствуют событиям с ml> 4.7, с 14 мая по 27 июня 2018 года [1]

На рисунке 3 приведены графики повторяемости для 3 кластеров землетрясений и всей последовательности [1]. Для всей последовательности параметр b=1.2, последовательность 2: b=1.1, кластер 2: b=1.3, кластер 3: b=1.5. такие значения сильно отличаются от параметров сейсмического режима континентальных тектонических областей.

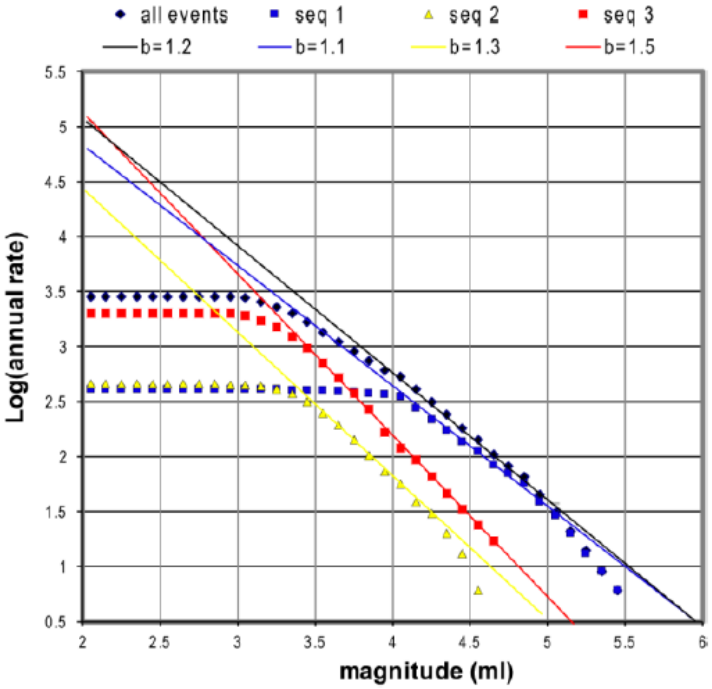

Рисунок 3. Параметр b для 3 кластеров землетрясений и всей последовательности [1]

Регистрация сейсмического события 11 ноября 2018 г.

11 ноября 2018 года широкополосные станции во всем мире зафиксировали очень низкочастотный монохроматический продолжительный тремор, связанный с периодом ~ 16 с. Волновая картина этого события очень необычна, по всем мировым станциям наблюдается низкочастотная продолжительная сейсмическая фаза, как будто затухающие колебания в резонаторе. По записям близких станций в работе [1] удалось определить природу этой волны, судя по поляризации и скорости – это волна Релея LR. На рисунке 4 представлены сейсмические записи этого события по станциям глобальной сети наблюдений IRIS IDA и IRIS GSN, расположенные от расстояния 906 км (станция ABPO, Мадагаскар) до 17000км. На рисунке 5 представлены сейсмические записи этого события по станциям сети мониторинга ИГИ.

Расстояние до станций ИГИ составляет 6697-7741 км. По казахстанским станциям на основе f-k анализа можно определить азимут на эпицентр. Он хорошо совпадает с предполагаемым эпицентром возле острова Майотте. Ниже на рисунке 6 F-K диаграммы по станции Акбулак. По волне P Азимут равен 203.3 градуса, кажущаяся скорость 13.84 км/с, для волны LR азимут равен 204.2 градуса, кажущаяся скорость 3.65 км/с. На рисунке 7 приведены спектры Фурье для вертикальных компонент станций ИГИ, максимум спектра по всем станциям примерно совпал, он соответствует периоду Tmax=15.4 с.

Несмотря на то, что станции ИГИ расположены от острова Майотте на далеких расстояниях и в узком створе азимутов, была предпринята попытка локализовать это событие. На рисунке 8 представлена карта расположения эпицентра сейсмического

события 11.11.2018 г., по данным сейсмических станций ИГИ, участвовавших в обработке, и эллипс ошибок, в таблице 1 представлен сейсмический бюллетень. По 3-м станциям была рассчитана магнитуда MLH, среднее значение MLH=4.5.

Интересно, что сейсмическое событие из глобальных сейсмологических Центров было обработано только в МЦД [3]. В таблице 2 представлены параметры сейсмического события 11.11.2018 г. по данным различных сейсмологических Центров. В МЦД эллипс ошибок составил Smaj=1152 км^2, Ms=4.3, mb=3.8. Кроме данных МЦД и ИГИ в таблице представлены результаты локализации по сети локальных станций [1]. Интересно что по данным близких станций хорошо видно, что событие произошло не одно, а как минимум 3. На рисунке 9 представлена сейсмограмма станции MCHI, канал B-3. Здесь 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.

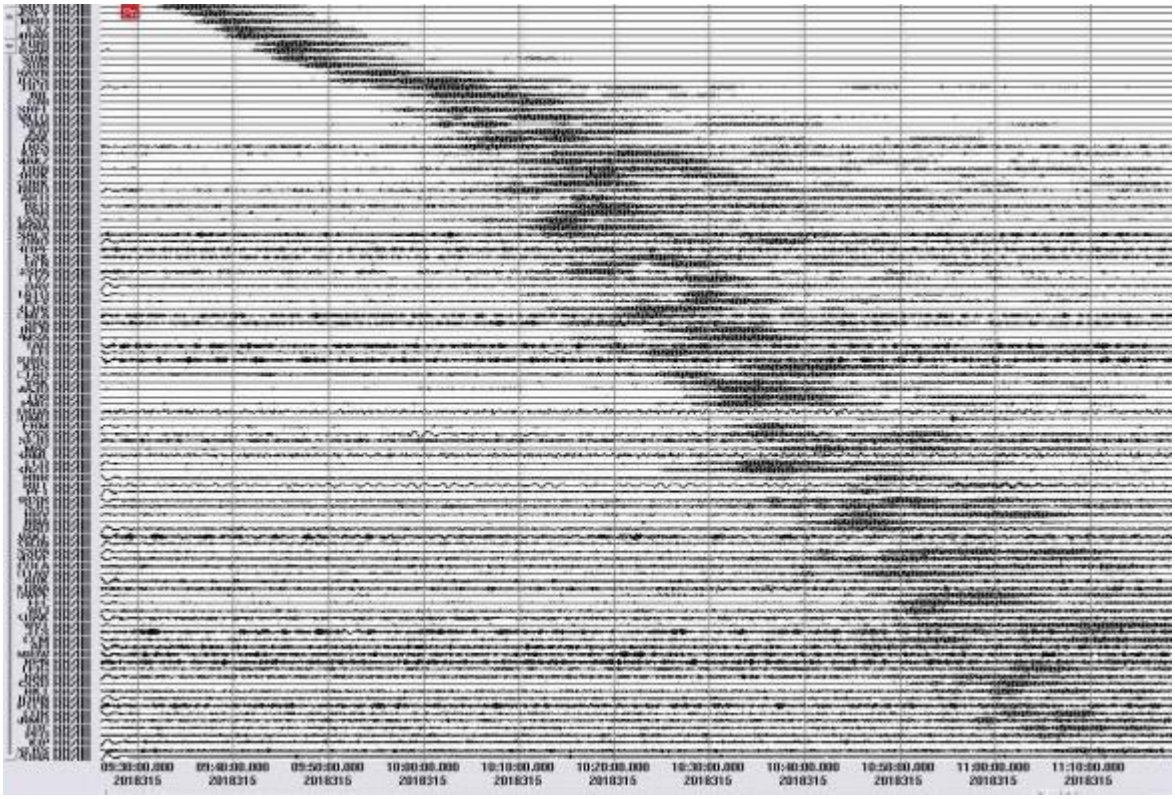

Рисунок 4. Сейсмические записи события 11 ноября 2018 г. 09-27, вблизи Мадагаскара по сети станций IRIS IDA и IRIS GSN, расстояние 906-17375 км. Фильтр 0.01-0.1 Гц

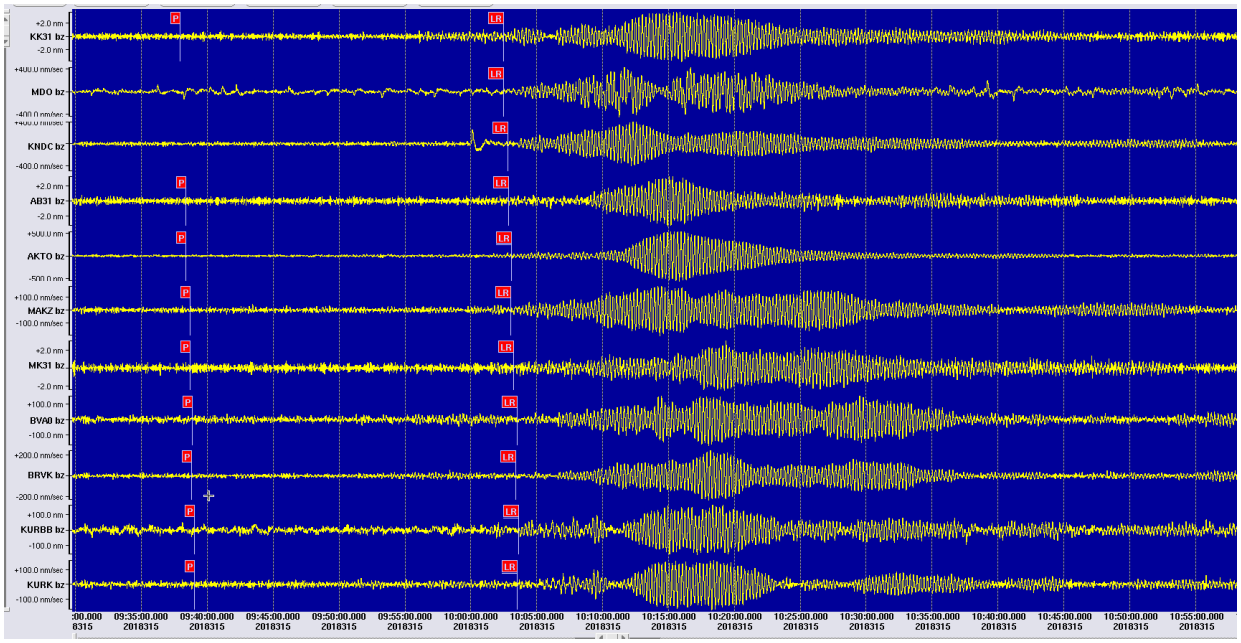

Рисунок 5. Сейсмические записи события 11 ноября 2018 г. 09-27, вблизи о.Майотте по сети станций ИГИ, расстояние 6697-7741 км. Фильтр 0.01-0.1 Гц

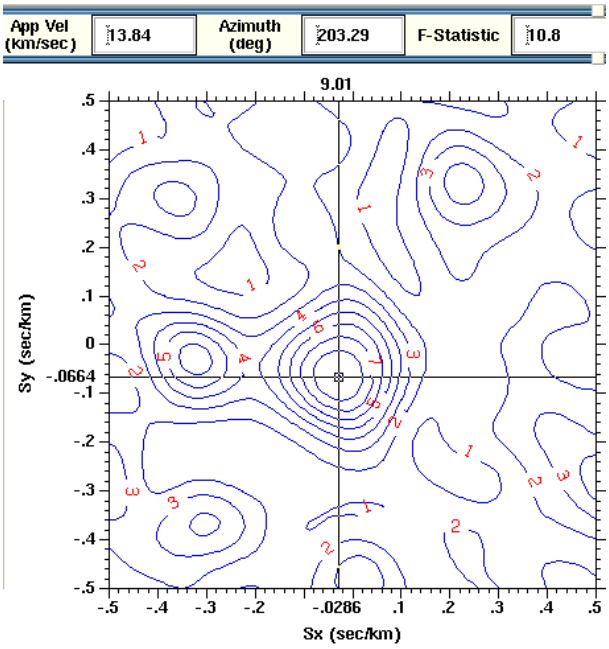

Рисунок 6а. FK-анализ, волна P, СГ ABKAR

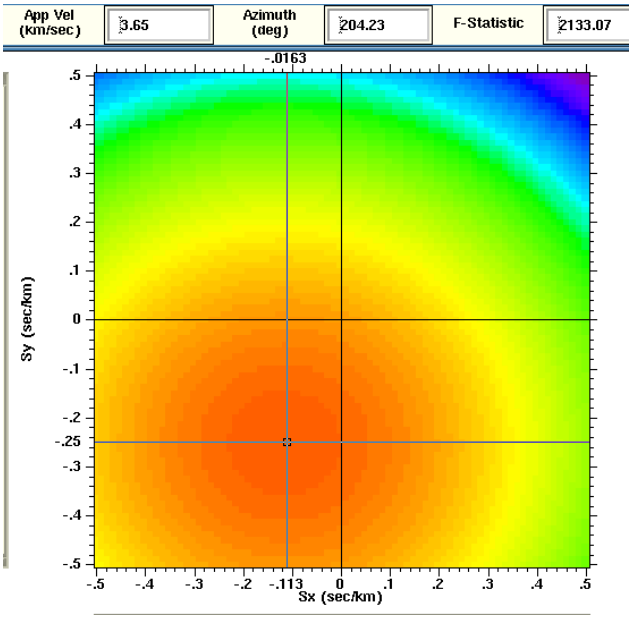

Рисунок 6б. FK-анализ, волна LR, СГ ABKAR

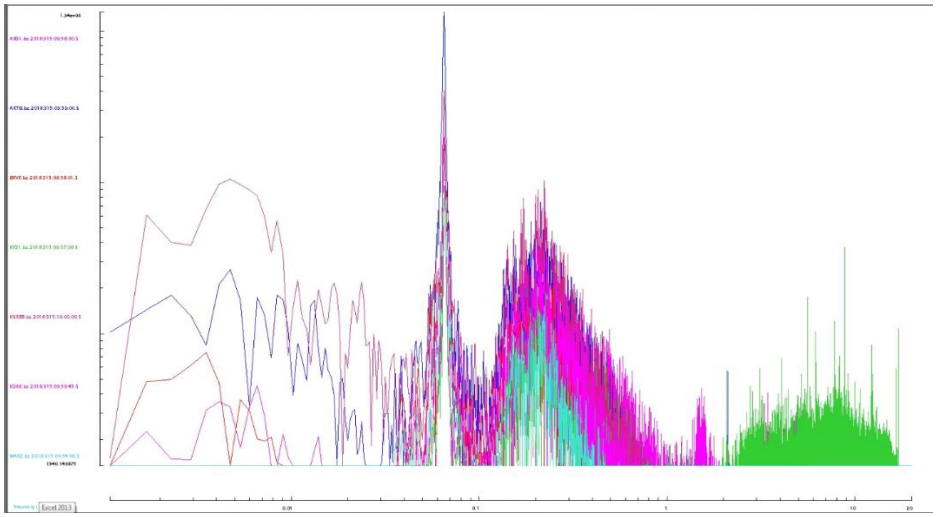

Рисунок 7. Спектры Фурье волны LR сейсмических станций сети ИГИ. Z-компоненты

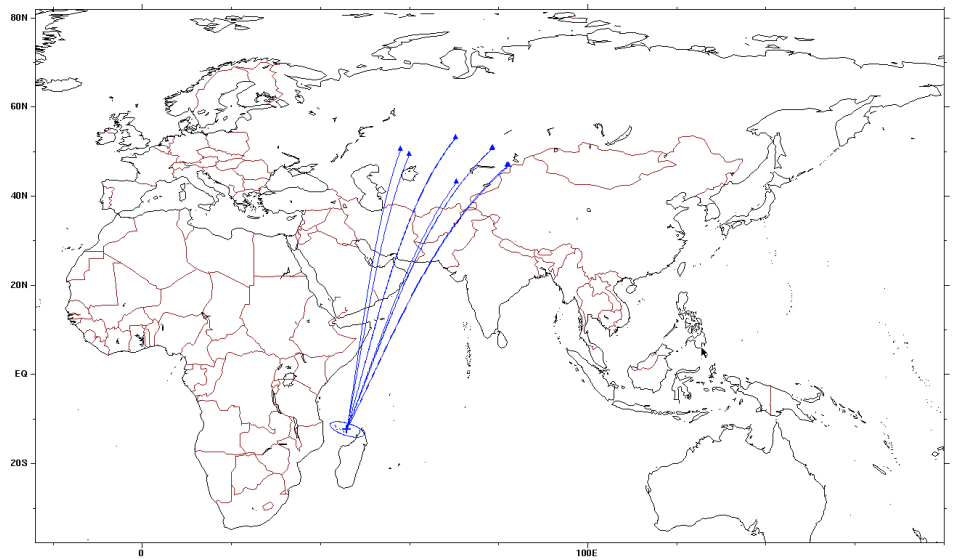

Рисунок 8. Карта расположения эпицентра сейсмического события 11.11.2018 г., сейсмических станций ИГИ, участвовавших в обработке, и эллипса ошибок

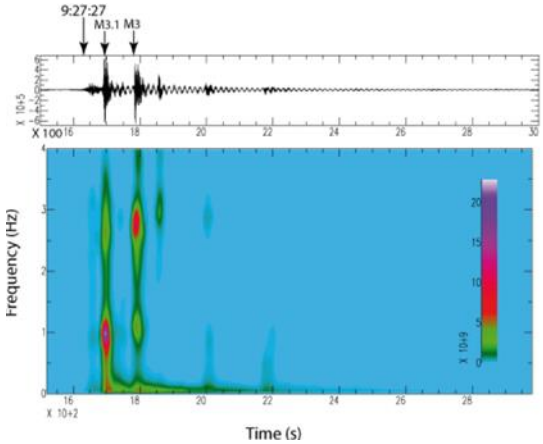

Рисунок 9. Сейсмограмма и спектрограмма сейсмических событий 11.11.2018 г. по станции MCHI [1]

Таблица 1. Бюллетень сейсмического события 11.11.2018 г.

Код станции	Время вступления	Фаза	Азимут	Amax, нм	v_{app}, км/с	Период, Tmax	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.Майотте по данным различных сейсмологических Центров.

Сеть	Время в очаге	Координаты		Количество станций в определении	Smaj, 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	9:27:27	-12.58	45.47					3

Сейсмические события 2 сентября.

После исследования тремора 11 ноября 2018 г. мы задались вопросом, было ли это необычное событие уникальным в своем роде? В работе [1] по данным локальной сети мониторинга было обнаружено еще 2 длиннопериодных тремора меньшей интенсивности. Оба тремора произошли 2 сентября 2018 г. и представляли собой несколько небольших высокочастотных событий сопровождавщихся монохромными низкочастотными волнами, с пиковой частотой F=0.062 Гц. Первая серия была 08:38 – 08:55, вторая 11:12-11:32.

Первое из событий было обработано в МЦД [3,4], его параметры приведены в таблице 3. Станции ИГИ тоже записали оба тремора, но локализовать их источники не удалось. В таблицах 4 и 5 приведены бюллетени этих событий, азимуты и периоды. Форма записи близка к событию 11.11.2018 г., что говорит о схожем механизме события и близком расположении очага (рисунок 10 а, б).

Таблица 3. Параметры сейсмических событий 09.02.2018 г. вблизи о. Майотте по данным МЦД.

Сеть	Время в очаге	Координаты		Количество станций в определении	Smaj, км	MLH/MS	mb	ML
		Широта	Долгота					
MCM	08:46:33.4	-12.7761	45.3708	21	46	4.0	4.1	4.4

Таблица 4. Бюллетень сейсмического события 2 сентября 2018 г. t0=08-38.

Код станции	Фаза	Азимут	v_{app}, км/с	Amax, нм	Период, Tmax	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 2 сентября 2018 г. t0=11:12.

Код станции	Фаза	Азимут	v_{app}, км/с	Amax, нм	Период, Tmax	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

Обсуждение природы события

Это событие 11 ноября 2018 г. вблизи о. Майотте имеет некоторое сходство с двумя событиями, описанными в 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 (относительно диапазона частот), его формы волны являются типичными для некоторых событий больших периодов, связанных с затухающими колебаниями в резонаторе. Как и в случае событий, зарегистрированных в 2011 и 2013 годах в Полинезии [6], событие 11 ноября 2018 года и другие более мелкие события, генерируемые на шельфе Майотты,

можно рассматривать как сейсмические события, связанные с колебаниями после точечного возбуждения [1].

В работе [1] при помощи исследования GNSS станций и анализа инферометрии InSAR показано, что с середины июля 2018 года весь остров Майотта дрейфует с небольшим увеличением скорости, пока в конце 2018 года не достиг пиковых скоростей ~ 224 мм в год на восток и ~ 186 мм в год вниз. С тех пор деформация плавно уменьшалась, достигая половины максимальной скорости в июле 2019 года. Смоделированная камера спада магмы расположена в 45 ± 5 км к востоку от Майотты, на глубине 28 ± 3 км. Скорость извлечения магмы составляет ~ 94 $м^3$ $с^{-1}$ на максимуме в конце 2018 года и ~ 44 $м^3$ $с^{-1}$ в июле 2019 года. Общий объем, извлеченный из глубокого источника в июле 2019 года, составляет 2.3 $км^3$.

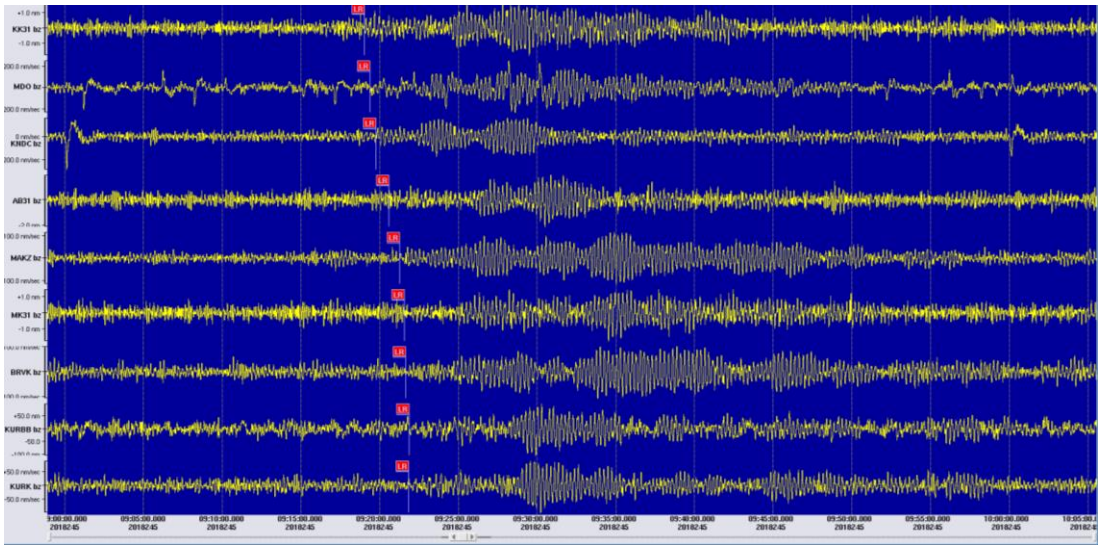

Рисунок 10а. Сейсмические записи события 2 сентября 2018 г. 08-38, вблизи о. Майотте по сети станций ИГИ. Фильтр 0.01-0.1 Гц

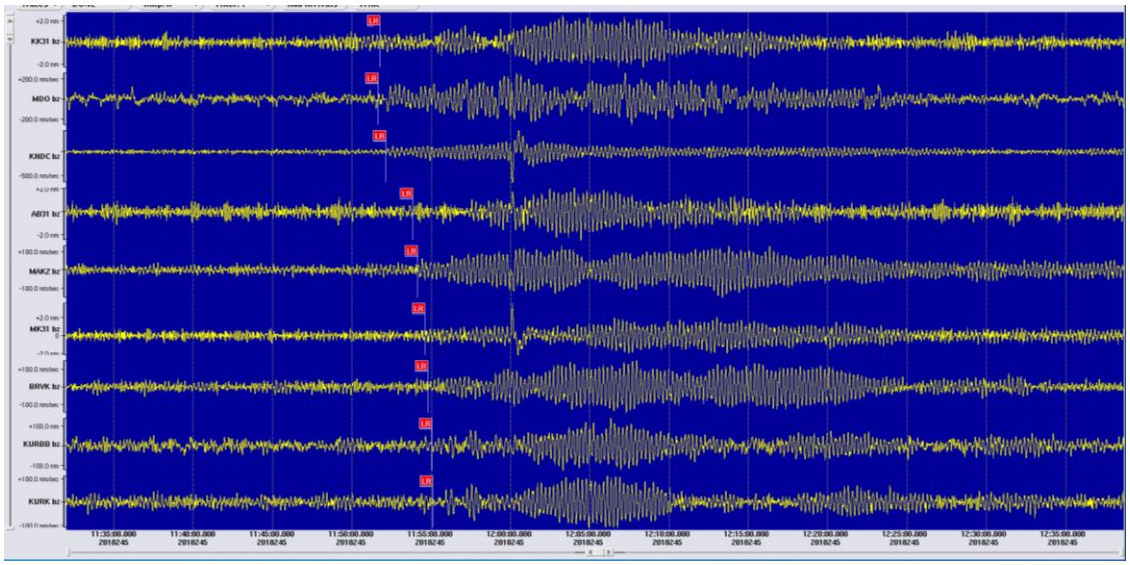

Рисунок 10б. Сейсмические записи события 2 сентября 2018 г. 11-12, вблизи о. Майотте по сети станций ИГИ. Фильтр 0.01-0.1 Гц

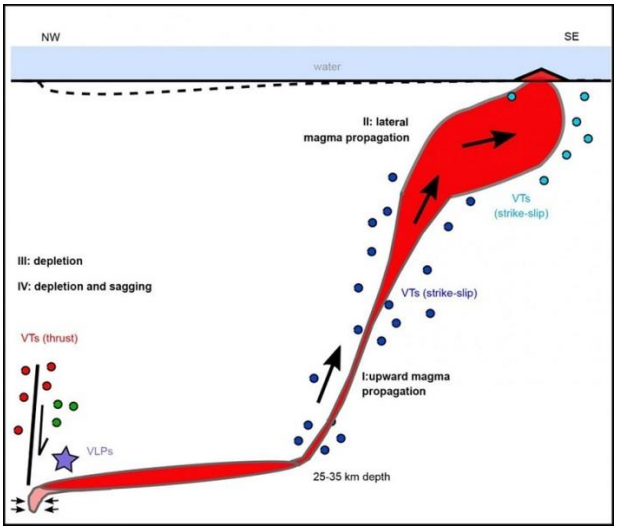

Рисунок 11. Эскиз глубокого магматического резервуара и восходящего пути магмы для формирования нового подводного вулкана. Различные типы сейсмических и поверхностных деформаций сопровождают четыре выявленные фазы волнений [6]

Заключение

По сейсмическим записям сети ИГИ РК был 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. Решение получено с неплохой точностью.

Найдены и исследованы сейсмические записи аналогичных событий 2 сентября 2018 г.

Полученные результаты можно использовать для задач сейсмического распознавания природы источника. Даны рекомендации аналитикам Центра Данных.

Литература.

1. Lemoine A., Briole P., Bertil D., Roullé A., Foumelis M., Thinon I., RaucoulesD., de Michele M., Valty P. The 2018-2019 seismo-volcanic crisis east of Mayotte, Comoros islands: seismicity and ground deformation markers of an exceptional submarine eruption // Geophysical Journal International. 2020. 55 p. preprint.

2. Mikhailova N.N., Sokolova I.N. Monitoring system of the Institute of Geophysical Research of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan // 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., Hyvernaud, O., & Maury, R. C., 2016. Unusual seismic activity in 2011 and 2013 at the submarine volcano Rocard, society hot spot (French Polynesia). Geophys. Res. Lett., 43, 4247-4254, doi: 10.1002/2016GL068342.

6. Cesca S. et al Drainage of a deep magma reservoir near Mayotte inferred from seismicity and deformation nature research // January 2020Nature Geoscience 13(1):87-93. DOI: 10.1038/s41561-019-0505-5.