

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

Греков Евгений Михайлович

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ РЕЖИМА ВУЛКАНИЧЕСКОЙ
СЕЙСМИЧНОСТИ В ПЕРИОДЫ МАГМАТИЧЕСКИХ
ИНТРУЗИЙ**

1.6.9. Геофизика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
д.ф.-м.н., доцент
Смирнов В.Б.

Научный руководитель:
д.ф.-м.н., член-корр. РАН
Шебалин П.Н.

Москва – 2026

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Обзор состояния проблемы	12
1.1 Краткая информация о природе вулканизма и вулканической сейсмичности.....	12
1.1.1 Общая информация о вулканах	12
1.1.2 Вулканические сейсмические сигналы	14
1.1.3 Общие представления о сейсмическом режиме вулканов	15
1.1.4 Магматические интрузии	17
1.2 Вулканические рои и их природа.....	18
1.3 Наклон графика повторяемости в вулканической сейсмичности.....	26
Заключение к главе 1	30
Глава 2. Методы	32
2.1 Оценка представительной магнитуды и наклона графика повторяемости	32
2.2 Оценка временной асимметрии роев землетрясений	38
Глава 3. Основные результаты.....	41
3.1 Вулкан Редаут.....	41
3.1.1 Обзор	41
3.1.2 Анализ сейсмичности	44
Резюме.....	50
3.2 Вулкан Августина	52
3.2.1 Обзор	52
3.2.2 Длинный рой.....	55
3.2.3 Короткий рой	61
Резюме.....	62
3.3 Вулкан Кумбре-Вьеха.....	64
3.3.1 Обзор	64
3.3.2 Первый рой	71
3.3.3 Второй рой	73
3.3.4 Третий рой	77

3.3.5 Четвертый рой	78
Резюме.....	82
3.4 Вулкан Иерро.....	85
3.4.1 Обзор	85
3.4.2 Анализ сейсмичности	88
Резюме.....	95
3.5 Вулкан Баурдарбунга.....	97
3.5.1 Обзор	97
3.5.2 Анализ сейсмичности	103
Резюме.....	108
3.6 Вулкан Миякедзима	110
3.6.1 Обзор	110
3.6.2 Анализ роев.....	119
Резюме.....	158
3.7 Вулкан Фаградальсфьядль	164
3.7.1 Обзор	164
3.7.2 Анализ сейсмичности	168
Резюме.....	170
Глава 4. Обобщение и интерпретация результатов	172
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	189
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	193

Введение

Работа посвящена изучению закономерностей режима вулканической сейсмичности. Основная идея работы состоит в том, чтобы использовать события вулканической сейсмичности как инструмент для изучения закономерностей процесса разрушения пород и инициации землетрясений в целом.

Актуальность темы и степень её разработанности. Особый интерес в контексте работы представляют процессы интрузии магмы. Это явление по сути можно представить как натуральный эксперимент по воздействию интенсивного внешнего по отношению к среде источника, приводящего к разрушению. Подобно лабораторным экспериментам, где образцы горных пород подвергают различным воздействиям, чтобы проанализировать акустический отклик, в данном случае в качестве воздействия выступает природное явление – магматическая интрузия. Под интрузией здесь понимается процесс внедрения магмы в трещины горных пород под давлением, созданным в магматической системе.

Известно, что интрузии часто предвещают извержения, так как это основной способ продвижения магмы к поверхности сквозь толщу земной коры [Sigurdsson et al., 2015]. Как правило, этот процесс можно зарегистрировать по сейсмическим признакам и поверхностным деформациям. Также достаточно хорошо известно, что интрузия в большинстве случаев инициирует особый сейсмический режим – вулканические рои [Roman, Cashman, 2006; Glazner, McNutt, 2021]. Рои землетрясений – это серии относительно слабых сейсмических событий, происходящих за небольшой промежуток времени в ограниченном пространстве без ярко выраженного основного события.

Задача классификации вулканических роев стоит довольно давно и остается актуальной до сих пор. В общем случае она заключается в выявлении характерных признаков, по которым вулканические рои закономерно различаются, а затем в ассоциировании типов роев с конкретными физическими процессами. В работе [Benoit, McNutt, 1996] была создана база данных из более чем 600 вулканических роев, для каждого из которых приводятся даты возникновения, длительность, магнитуда максимального события и число событий. Там же предлагается вариант классификации вулканических роев на три типа: первые – рои предвещающие извержения, вторые – сопровождающие извержения и третьи – не приуроченные к извержениям (но все еще близкие к вулканам по пространству). Первые два типа авторы также разделяют на подкатегории в зависимости от того, как они соотносятся по времени с периодом извержения. Наибольшее внимание в работе [Benoit, McNutt, 1996] уделяется длительностям роев. Авторы отмечают закономерность: для наиболее длинных роев первого типа прослеживается положительная корреляция между их длиной и логарифмом длительности вулканического затишья перед извержением. Авторы интерпретируют это так: чем дольше было

вулканическое затишье, тем более механически прочную и холодную породу магма встретит на своем пути перед извержением. В качестве направлений дальнейшей работы в [Benoit, McNutt, 1996] предлагаются исследования соотношений параметров роев с параметрами извержений, а также выявление общих закономерностей в процессах, наблюдаемых при различных типах сейсмичности, предшествующей извержению.

В более современной работе [McNutt, 2025] автор подчеркивает, что диагностика вулканических роев является «ключом к успешному прогнозированию извержений». Автор вводит два типа роев на основе 6 примеров извержений. Он отмечает закономерность: перед извержениями иногда наблюдается пара роев – сперва «длинный» рой, затем «короткий», в котором появляются землетрясения с длиннопериодными компонентами в сигнале. [McNutt, 2025] предполагает, что первый тип роя является откликом среды на рост давления магмы, а второй свидетельствует о процессе продвижения магмы к поверхности в результате открытия канала.

Такая модель во многом носит концептуальный характер, о чем говорит и сам автор. Он также отмечает, что обозначенная закономерность выполняется не на всех вулканах. Даже в предложенных 6 примерах на одном вулкане отсутствует длинный рой, а на другом он выражен очень слабо (всего 82 события за 30 суток). К тому же в выборке рассмотрены вулканы только из субдукционных зон. Закономерное поведение параметра наклона графика повторяемости, на которое в том числе опирается автор, наблюдается только в половине рассмотренных случаев. Таким образом, на наш взгляд, работа [McNutt, 2025] свидетельствует о том, что задача классификации вулканических роев далека от решения.

Другим наиболее интригующим результатом при исследовании вулканических роев на данный момент является широкий диапазон значений наклона графика повторяемости (который часто называют «*b-value*» в англоязычной литературе). Этот параметр входит в один из ключевых законов сейсмологии – закон Гутенберга-Рихтера [Gutenberg, Richter, 1944], который описывает зависимость логарифма числа событий с определённой магнитудой в некотором регионе за некоторый период времени от величины этой магнитуды. Наклон графика повторяемости показывает соотношение между количеством событий той или иной силы. То есть если на одно событие магнитуды 3 в одном случае приходится 10 событий с магнитудой 2, а в другом 15 событий, то в первом случае параметр *b* меньше, чем во втором. Известно, что для режимов тектонической сейсмичности этот параметр принимает значения около единицы на различных масштабах, и редко сильно отклоняется от него. В вулканической же сейсмичности встречаются значения от аномально низких (вплоть до 0.44) до экстремально высоких (иногда более 3) [Roberts et al., 2015]. Разделение на повышенные, нормальные и экстремально высокие значения условно и используется для удобства описания в тексте. Качественно эти оценки даются

относительно «нормального» значения — единицы, характерного для тектонической сейсмичности. В вулканической сейсмичности значения параметра b в среднем повышены, в работе [Glazner, McNutt, 2021] авторы приводят значение 1.7 как характерное. Значения более 1.9 мы считаем аномально высокими даже для вулканической сейсмичности, а относительно единицы мы называем эти значения экстремально высокими.

Достаточно хорошо известен эффект падения наклона графика повторяемости во времени перед извержениями на разных масштабах времени [Konstantinou, 2022]. В первую очередь его объясняют изменением напряженного состояния среды, либо изменениями в неоднородности среды, однако исчерпывающей модели, которая бы предсказывала все наблюдаемые особенности и устанавливала связь с каким-либо механизмом инициации роев, на данный момент нет.

Экстремально высокие значения наклона графика повторяемости (более 1.90) являются предметом активной дискуссии в научном сообществе. Например, можно обратить внимание на работу [Roberts et al., 2015], озаглавленную вопросом «Высоки ли b -value вулканической сейсмичности, если да, то когда?». Отвечая на вторую часть вопроса, авторы приводят довольно общее суждение: повышенные значения наклона графика повторяемости характерны для периодов активизации вулканов. Некоторые ученые до сих пор подвергают сомнению истинность экстремально высоких значений параметра в вулканической сейсмичности (например, [Konstantinou, 2022] и [Roberts et al., 2015]). Во всяком случае не изучено в полной мере, чем они обусловлены и при каких именно условиях наблюдаются.

Также стоит отметить, что многообразие методов оценок параметра наклона графика повторяемости, используемых в исследованиях вулканической сейсмичности, делает актуальной задачу пересчета значений этого параметра унифицированной методикой даже для тех случаев, где подобный анализ уже выполнялся. В той же работе [Roberts et al., 2015] при использовании своей методики на двух уже известных случаях авторы для одного эпизода подтверждают наличие экстремально высоких значений, а для другого опровергают. Используемые методики, как правило, отличаются по четырем аспектам, каждый из которых в значительной степени влияет на результат: оценка наклона графика повторяемости, оценка представительной магнитуды, оценка погрешности и способ выбора представительной магнитуды в скользящем по времени окне.

Наша работа в основном посвящена исследованию вулканических роев, приуроченных к процессам магматических интрузий. Вулканические рои рассматриваются как сейсмические отклики среды горных пород на внешнее воздействие. В таком случае форма этого отклика и характеристики его режима могут нести информацию о параметрах воздействия и состоянии среды, что в конечном итоге позволит судить о механизме его инициации.

Объектом исследования является сейсмичность, приуроченная к периодам магматических интрузий, связанным с извержениями вулканов, находящихся в различных геодинамических обстановках.

Предметом исследования являются статистические параметры режима вулканических роев, приуроченных к процессам магматических интрузий. А именно сейсмическая активность, высвобождение сейсмического момента или энергии, вариации параметра наклона графика повторяемости во времени, в некоторых случаях временная кластеризация сейсмических событий, форма временных профилей вулканических роев.

В работе проанализирована сейсмичность ряда интрузивных эпизодов (в скобках указана природа вулканизма):

- два случая на Аляске – извержения вулканов Редаут 2009 года и Августина 2006 года (зона субдукции);
- два случая на Канарских островах – извержения вулканов Кумбре-Вьеха 2021 года и Иерро 2011 года (внутриплитовый вулканизм, «горячая точка»);
- два случая в Исландии – извержения вулканов Баурдарбунга 2014 года и Фаградалсфьядль 2021 года (рифтовая зона и «горячая точка»);
- один случай в Японии – извержение вулкана Миякедзима 2000 года (зона субдукции).

В основном рассматривались именно периоды, предвещающие начало извержений, чтобы избежать наложения сигналов различных источников сейсмичности, многообразие которых характерно для периодов извержений. Эпизод Миякедзима является исключением, однако процесс интрузии в этом случае происходил в стороне от центральной вулканической постройки, и в области интрузии не было эруптивной активности. Также были выбраны те случаи, в которых не только по сейсмическим данным достоверно известно о реализации процесса интрузии. Это обеспечивает корректную причинно-следственную направленность исследования – изучается сейсмичность, вызванная интрузией, а не идентифицируется наличие интрузии по сейсмичности. Таким образом, в работе охвачены зоны с разной природой вулканизма и вулканические системы с различным строением.

Цели и задачи исследования. Целями данной работы являются: выявление общих для различных вулканических зон закономерностей сейсмического режима роев в периоды интрузий; выделение характерных паттернов сейсмичности; уточнение причин экстремально высоких и низких значений наклона графика повторяемости; установление наличия или отсутствия закономерных отличий во временных профилях вулканических роев; установление наличия или отсутствия связи формы временного профиля вулканических роев с другими параметрами сейсмического режима (в первую очередь с параметром наклона графика повторяемости). Для достижения этих целей требуется выполнение следующих **задач**:

1. Сравнить временные профили вулканических роев, происходивших в разных вулканических зонах.
2. Построить временные вариации наклона графика повторяемости для ряда вулканических роев.
3. Сопоставить полученные вариации с временными профилями вулканических роев. Выделить рои, обладающие общими признаками, если таковые имеются.
4. Сравнить полученные по разным зонам результаты и провести обобщения.

Научная новизна работы заключается в следующем.

Впервые предложена классификация вулканических роев по форме временного профиля. Впервые проведена количественная оценка временной асимметрии для выборки из 32 вулканических роев, а именно асимметрии высвобождения сейсмического момента (или энергии) во времени и асимметрии временного профиля активности. На этой основе выявлен тип вулканических роев, обладающих наибольшей отрицательной асимметрией; кульминация каждого такого роя предвещала начало извержения.

Впервые показано, что между формой временных профилей и поведением наклона графика повторяемости во времени есть связь: наибольшие значения параметра характерны для роев с наибольшей отрицательной асимметрией временного профиля, в них наблюдается спад значения параметра от экстремально высоких (более 1.9) в начале до повышенных или нормальных (от 0.8 до 1.7) в конце, причем независимо от длительности роя.

Для ряда вулканических роев впервые рассчитаны временные вариации наклона графика повторяемости (2 роя перед извержением вулкана Редаут 2009 года, 1 рой перед извержением вулкана Фаградалсфьядль 2021 года, 21 рой в период интрузии вулкана Миякедзима). Для длинного роя перед извержением вулкана Августина 2006 года пересчитаны известные результаты оценок временных вариаций наклона графика повторяемости более современными методами, что частично изменило картину и возможную интерпретацию.

Впервые с применением унифицированной по четырем ключевым аспектам методики построены вариации наклона графика повторяемости во времени для большого числа вулканических роев, приуроченных к 7 разным вулканам из 4 зон с различной природой вулканизма и геодинамическими обстановками. Это обеспечило методологическую однородность и сопоставимость результатов. Показано, что выделенный тип роев присутствует только на одном вулкане из трех, находящихся в зонах тектонического рифтового растяжения, и на каждом из 4 вулканов, не находящихся в таких условиях.

Теоретическая значимость работы заключается в:

- развитии представлений о механизме инициации вулканических роев;

- демонстрации подобия сейсмических откликов (вулканических роев) в натурных условиях при магматических интрузиях акустическим откликом, моделируемым в лабораторных экспериментах с различными сценариями нагружения под прессом, что позволяет рассматривать выявленные закономерности как проявление единых физических механизмов, действующих в широком диапазоне пространственно-временных масштабов;
- расширении набора свидетельств в пользу одной из гипотез, объясняющих эффект падения наклона графика повторяемости перед извержениями, а именно гипотезы о падении значений параметра в результате формирования макроразрыва перед извержением из-за процесса слияния трещин меньшего масштаба в контексте физики переходных режимов;
- продвижении в вопросе о том, чем вызываются и в каких условиях наблюдаются экстремально высокие значения (более 1.9) наклона графика повторяемости вулканической сейсмичности, а именно выдвинута гипотеза о том, что такие значения наблюдаются в периоды накопления дефектов под воздействием напряжений, создаваемых магматической интрузией в условиях её стагнации. Продемонстрирована её обоснованность.

Практическая значимость работы заключается в развитии подхода к классификации вулканических роев на основе формы их временных профилей. Продемонстрирована перспективность и обоснованность такого подхода. Решение задачи классификации вулканических роев в перспективе позволит по типу роя судить о процессах, происходящих в магматической системе, что может существенно улучшить качество мониторинга вулканов и повысить надежность прогноза извержений.

Методология и методы исследования. В работе применены широко апробированные методы оценок представительной магнитуды и наклона графика повторяемости, преимущество которых показано в современных исследованиях. Для расчета наклона графика повторяемости использовалась оценка максимального правдоподобия по методике из работы [Bender, 1983]. Для оценки представительной магнитуды был выбран метод LLS (Lower End of Linear Segment), описанный в работе [Смирнов, 2009]. Оценка погрешности наклона графика повторяемости проводилась с помощью бутстрэпа [Woessner, Wiemer, 2005]. Для ключевых точек предоставляются графики повторяемости для визуального контроля над формой распределения и корректностью оценок. Для описания форм временных профилей роев используются коэффициенты асимметрии высвобождения сейсмического момента во времени [Roland, McGuire, 2009] и асимметрии временного профиля активности.

Положения, выносимые на защиту.

1. Разработанная классификация вулканических роев по форме их временного профиля позволяет выявить обособленный тип вулканических роев, отличающихся наибольшей отрицательной асимметрией временного профиля, то есть обладающих свойством значительного

преобладания по длительности стадии активизации над стадией спада, а также ростом максимальной магнитуды событий по мере приближения к кульминации, предвещающей начало извержения.

2. Для выявленного типа роев, характеризующихся наибольшей отрицательной временной асимметрией, характерен спад наклона графика повторяемости от экстремально высоких значений (более 1.9) в начале роя до нормальных или повышенных (от 0.8 до 1.7) в конце.

3. Выявленный тип роев, характеризующихся наибольшей отрицательной временной асимметрией, не характерен для интрузий, происходящих в условиях тектонического рифтового растяжения.

Личный вклад автора. Все приведённые в диссертации результаты являются оригинальными и получены самим автором, если не указано, что они взяты из другой работы. Автор осуществлял поиск, отбор и систематизацию сейсмических данных для анализа. Самостоятельно программно реализовывал алгоритм для оценки представительной магнитуды, в том числе в скользящем по времени окне, а также алгоритм оценки наклона графика повторяемости, его вариаций во времени, оценки его погрешности. Все вычисления выполнены лично автором. Все графики построены лично автором, если не указано, что они взяты из другой работы. Соискатель самостоятельно выбирал как методы исследования, так и анализируемые параметры. Задачи исследования, выводы и интерпретация сформулированы соискателем самостоятельно.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов исследования обеспечивается комплексным применением современных методик анализа сейсмических данных, верификацией результатов независимыми методами и согласуемостью с результатами других исследований. Исследование основано на анализе большой (32) выборки вулканических роев, наблюдавшихся на 7 разных вулканах из 4 разных вулканических зон, что обеспечивает репрезентативность исследовательского материала.

Основные идеи и положения диссертационной работы изложены в 3 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ им. М.В. Ломоносова по специальности и отрасли наук.

Список публикаций в журналах, удовлетворяющих требованиям Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова:

- А.1 *Греков Е.М.* Применение метода ближайшего соседа для анализа вулканических роев по данным извержений вулканов Исландии Баурдарбунга и Фаградалсфьядль // Вулканология и сейсмология. – 2025. – № 1. – С. 92-110. – EDN HGFHUB. (1.73 п.л.)

Импакт-фактор 1.105 (РИНЦ)

Переводная версия: Grekov E.M. Applying the Nearest Neighbor Method to the Analysis of Volcanic Swarms Based on Data for Bárðarbunga and Fagradalsfjall Volcanoes // Journal of Volcanology and Seismology. – 2025. – Vol. 19, № 1. – pp. 78-92. – EDN MUHSFK. Импакт-фактор 0.20 (JCI)

- A.2 Греков Е.М., Шебалин П.Н., Смирнов В.Б. Два типа сейсмической активности перед извержением вулкана Августина 2006-го года на Аляске // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2025. – Т. 521, № 1. – С. 98-106. – EDN FTSXIN. (1.04 п.л., вклад автора: проведение всех расчетов, построение всех графиков, составление текста статьи). Импакт-фактор 0.861 (РИНЦ)

Переводная версия: Grekov E.M., Shebalin P.N., Smirnov V.B. Two Types of Seismic Activity Prior to the 2006 Eruption of Augustine Volcano in Alaska // Doklady Earth Sciences. – 2025. – Vol. 520, № 2. – pp. 1-8. – EDN RQEZKQ. Импакт-фактор 0.19 (JCI)

- A.3 Греков Е.М., Шебалин П.Н. Анализ группирования вулканической сейсмичности по данным извержения вулкана Августина 2006-го года // Russian Journal of Earth Sciences. – 2025. – Т. 25, № 4. – С. ES4005. – EDN XPILAB. (2.31 п.л., вклад автора: проведение всех расчетов, построение всех графиков, составление текста статьи). Импакт-фактор 0.14 (JCI)

Список конференций, на которых были представлены доклады по теме диссертационного исследования:

1. Ломоносовские чтения-2026, секция физика, МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Россия, 23 марта - 5 апреля 2026.
2. Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений. IV Всероссийская научная конференция 22–23 октября 2025 г., Москва, Россия, Москва, Россия, 22-23 октября 2025.
3. XXVI Уральская молодежная научная школа по геофизике, г. Пермь, Россия, 17-21 марта 2025.
4. Ломоносовские чтения - 2024. Секция Физика., МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 28 марта - 3 апреля 2024.
5. The 13th International Statistical Seismology workshop (StatSei13), Southern University of Science and Technology, 1088 Xueyuan Avenue, Nanshan District, Shenzhen, Китай, 16-20 марта 2024.
6. III Всероссийская научная конференция с международным участием «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений», г. Москва, Россия, 25-26 октября 2023.
7. Девятая Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов», г. Петропавловск-Камчатский, Россия, 24-30 сентября 2023.

Глава 1. Обзор состояния проблемы

1.1 Краткая информация о природе вулканизма и вулканической сейсмичности

1.1.1 Общая информация о вулканах

Рассмотрим общее устройство вулканических систем, чтобы иметь представление о процессах, протекающих при извержениях, а также уточнить терминологию, которая будет далее использоваться.

Извергающаяся на вулканах магма зарождается на глубине несколько десятков километров, как правило это жидкость, основной состав которой: кислород, кремний, алюминий и железо. Она также обычно содержит фрагменты твёрдых пород и растворённые газы [Tilling, 1999]. Магма, истекшая на поверхность, называется лавой [Tilling, 1999]. Сама жидкая магма образуется в результате локального подплавления горных пород в верхней мантии [Sigurdsson et al., 2015; Tilling, 1999]. Расплавленная порода, которая имеет меньшую плотность, чем окружающая твердая порода, под действием силы плавучести и давления газа двигается вверх и может проникнуть сквозь слабые участки земной коры. Стремясь вверх, жидкость накапливается в резервуарах (магматических камерах) и каналах [Tilling, 1999]. Вулканы как правило образуются в зонах субдукции (например, Камчатка, Япония, Новая Зеландия и т.д.), в зонах мантийных плюмов (например, Гавайи, Исландия), которые в англоязычной литературе называются «hot spots». Также множество подводных вулканов существует в рифтовых зонах [Sigurdsson et al., 2015]. Известно, что мантийное вещество может частично расплавляться при определенных условиях, и образующаяся менее плотная базальтовая магма поднимается к поверхности и накапливается в резервуарах [Sigurdsson et al., 2015]. В субдукционных зонах, вода, насыщающая погружающуюся плиту, приводит к локальному подплавлению мантийного вещества. Также погружающаяся плита дополнительно поднимает часть мантийного вещества с глубины, также вызывая его подплавление вследствие декомпрессии [Sigurdsson et al., 2015]. В рифтовых зонах, мантийное вещество поднимается в результате снятия нагрузки вышележащих слоев, которая происходит в результате раздвижения литосферных плит. Это также приводит к расплавлению вещества. Вулканизм в зонах мантийных плюмов («hot spots»), предположительно, вызван потоками горячего вещества из нижней мантии [Sigurdsson et al., 2015].

Вулканические постройки обычно сложены продуктами извержений вулкана: вулканический пепел, лава и пр. Согласно [Tilling, 1999] геологи обычно делят вулканы на четыре основные группы:

а) Шлаковые конусы. Как правило низкие вулканические постройки, сложенные мелкими фрагментами затвердевшей лавы и пепла, выброшенными в воздух и осевшими вокруг жерла, образовавшими округлый конус.

б) Составные вулканы (стратовулканы). Носят своё название благодаря чередующимся слоям лавовых потоков и вулканического пепла в вулканической постройке. Сама постройка может достигать высоты 2500 метров и представляет собой симметричный конус с крутыми сторонами. Важной чертой вулканов такого типа является наличие системы каналов, соединяющей глубинный подземный резервуар с поверхностью.

в) Щитовые вулканы. Названы так благодаря щитообразной форме вулканической постройки, образованной очень жидкой лавой, которая после извержения растекается на большие расстояния, в результате чего получается широкий пологий конус.

г) Лавовые купола. Образуются в результате того, что извергнутая лава оказывается слишком вязкой, чтобы успевать растекаться прежде, чем затвердеть. Таким образом возникает купол, расширяющийся изнутри и затвердевающий на периферии.

Помимо центральной постройки или кальдеры, у вулканов бывает несколько боковых кальдер, а также сети трещин (в англоязычной литературе «fissure swarms»), иногда простирающихся на десятки километров, по которым лава может истекать на поверхность. Как правило, под вулканом на различных глубинах находятся одна или несколько магматических камер. Перед извержением давление магмы в камерах повышается, что заставляет лаву или газы двигаться к поверхности по старым закрытым каналам. Этот процесс может носить как взрывной характер, так и происходить медленно, иногда годами [Sigurdsson et al., 2015].

Рассмотрим основные типы вулканических извержений. Один и тот же вулкан может проявлять несколько типов активности [Tilling, 1999].

а) Стромболианский тип. Расплавленная жидкая лава выбрасывается вверх на большие высоты, образуя характерные дуги в небе.

б) Вулканский тип. Выброс большого газопеплового облака над вершиной вулкана.

в) Плинианский тип. Сопровождается мощными взрывами с выбросами большого объёма тефры.

г) Пелейский тип. Отличительной особенностью являются сходящие со склонов вулкана с большой скоростью лавины, образованные газом, пеплом и раскалённой лавой.

д) Гавайский тип. Активное фонтанирование жидкой лавы из жерла. Чаще всего характерно для щитовых вулканов.

е) Фреатический тип. Взрывы расширяющегося пара при контакте холодных вод с горячей магмой.

В более общем случае процесс извержения по характеру разделяют на взрывной (взрывной) и эффузивный (истечение лавы), в рамках одного извержения могут чередоваться эпизоды различного характера [Sigurdsson et al., 2015]. Так как в магме содержатся растворённые газы, по мере снижения давления ближе к поверхности, они начинают высвобождаться из жидкого вещества. Характер этого процесса (медленный или резкий) зависит от вязкости магмы. Если вязкость низкая, то газы беспрепятственно покидают магму, если же магма густая, то газы будут улетучиваться со взрывами [Tilling, 1999].

Вулканические процессы вызывают множество сейсмических сигналов различных типов [Papadimitriou, 2019].

1.1.2 Вулканические сейсмические сигналы

Основу современной классификации сигналов вулканической сейсмичности заложил японский ученый Минаками [Minakami, 1960]. В [Гордеев, 2007] и [Sigurdsson et al., 2015] описываются основные типы сигналов:

А-тип (вулcano-тектонические): иногда также называют высокочастотными, происходят на глубинах до нескольких десятков километров. Имеют четкие фазы Р- и S-волн и высокие частоты (около 5-15 Гц). Это сдвиговые землетрясения, вызванные разрушением горных пород под давлением магмы. Часто проявляются в виде роев. Отличаются от тектонических землетрясений только меньшими максимальными магнитудами.

В-тип: иногда называют длиннопериодными. Частотный состав низкий (1–3 Гц), фазы волн выражены слабо. Обычно связывают с движением магматического расплава по системе каналов и резервуаров, а также с формированием пузырей газа.

Взрывные сигналы: сопровождают выбросы в кратере. По форме близки к В-типу, но более интенсивны.

Вулканическое дрожание (тремор): длительные непрерывные колебания, возникающие при движении лавы и газопепловых потоков. Может длиться от нескольких часов до многих дней. Предположительно, формируется из серий длиннопериодных сигналов.

Гибридные землетрясения: сложные сигналы, сочетающие в себе признаки тектонического разрыва (высокочастотная часть в начале) и резонансных колебаний магматической системы (низкочастотная часть).

Далее автор предлагает разделить сигналы вулканической сейсмичности по природе происхождения всего на две группы:

Первая группа – это вулcano-тектонические землетрясения, вызванные напряжениями в твердой среде связанными с внедрением магмы в породы [Гордеев, 2007], то есть А-тип по классификации [Minakami, 1960].

Вторая группа – это низкочастотные сейсмические сигналы, в состав которых входят землетрясения Б-типа, сигналы взрывного типа и вулканическое дрожание, то есть сигналы, связанные с высвобождением газов из магмы и колебаниями магматического расплава [Гордеев, 2007].

С точки зрения исследования процессов инициации землетрясений, вероятно, следует сосредоточиться на сравнении вулcano-тектонических режимов (первая группа по [Гордеев, 2007]) с тектоническими, поскольку они схожи по форме, но отличаются по природе источника. Они преобладают в предэруптивных фазах и, вероятно, связаны с влиянием интрузии, которая создает дополнительные напряжения в среде, вызывая рои вулcano-тектонических землетрясений [Гордеев, 2007].

1.1.3 Общие представления о сейсмическом режиме вулканов

В данной работе землетрясения исследуются с точки зрения сейсмического режима, без детального рассмотрения непосредственных сейсмических сигналов. Сейсмический режим складывается из совокупности сейсмических событий в некотором регионе за некоторый период времени. Таким образом, сейсмический режим характеризуется распределением событий во времени и пространстве, а также рядом параметров известных для сейсмичности статистических законов, таких как закон Гутенберга-Рихтера, закон Омори, закон продуктивности и другие.

При этом по сейсмическому режиму можно получить представление о процессах, протекающих в недрах, если найти какие-либо закономерности в параметрах режима и

постараться установить их связи с физическими процессами, многие параметры сейсмического режима связаны с физическими свойствами и состоянием среды. В случае вулканической сейсмичности предэруптивных фаз сейсмический режим в первую очередь представляет собой отклик среды на внешнее воздействие.

Много информации получают, рассматривая пространственно-временное распределение сейсмических событий. Например, в работе [Giudicepietro et al., 2021] авторы проанализировали сейсмичность трёх вулканов Италии: Везувий, Флегрейские поля и Искья. На острове Искья сейсмичность распределена по зонам разломов. На Везувии большая часть сейсмичности сосредоточена под кратером, очерчивая непрерывную осевую структуру, совпадающую с путем движения жидкости из глубинной гидротермальной системы. Похожую картину можно обнаружить и в районе Флегрейских полей, где землетрясения в основном концентрируются под областью с высоким выбросом гидротермальных флюидов. В частности, перемещения облаков землетрясений подтверждают, что основные сейсмические рои в области Флегрейских полей очерчивают каналобразный путь, по которому гидротермальные флюиды переходят из глубины в область ближе к поверхности.

Аналогичный результат получен в работе [Yang et al., 2022], где исследователи с помощью сейсмической томографии построили трехмерную модель вулкана Большой Ситкин, обнаружив два подземных резервуара с подплавленной на 30% породой. А затем показано, что облака сейсмичности коррелируют по пространственному расположению с этими резервуарами, а также с каналами, по которым мигрирует лава. На основании данных о сейсмичности авторы даже предложили модель цикла извержений.

Хотя вулканическая сейсмичность довольно широко исследуется, однозначного способа отделения её от тектонической до сих пор не разработано. В большинстве работ [Steinke et al., 2023], [Jacobs et al., 2010], [Rubeis et al., 1997], [Fischer et al., 2022], [Schmid, Grasso, 2012] к вулканической сейсмичности относят любую сейсмичность, которая приурочена к извержению, то есть которая происходит во время извержения в области вокруг извергающегося вулкана. Также обоснованность предположений подкрепляют различной информацией из других источников (визуальное наблюдение истечения лавы, изменения уровня жидкости в лавовых озёрах, локальное повышение температуры и т.п.). Действительно, во многих случаях это оправдано. Так, например, если в некоторой области до и после извержения сейсмической активности практически не наблюдалось, а проявилась она только во время извержения, к тому же из геологических данных и истории прошлых извержений известно, что в данной области находится рой древних магматических каналов, по которым к поверхности из глубины продвигается облако сейсмичности, а затем в этой области наблюдается истечение лавы на

поверхность, то можно вполне обосновано предположить, что эта сейсмичность связана с вулканическими процессами.

Более надежным подходом является рассмотрение волновых форм землетрясений [Jacobs et al., 2010], поскольку, как было указано в этой главе выше некоторые вулканические сигналы отличаются по спектральному составу от тектонических. Однако, это, во-первых, применимо не ко всем типам вулканических сигналов, а во-вторых, является довольно трудоёмкой задачей, особенно при анализе больших объёмов данных (сотни тысяч событий). В большинстве случаев в каталогах вулканической сейсмичности не дается информации об отношении события к тому или иному типу.

С точки зрения сейсмического режима особый интерес представляют именно вулкано-тектонические землетрясения. Это в основном сдвиговые разрушения, которые могут быть использованы как показатели напряжённого состояния вулкана [Traversa, Grasso, 2010]. В работе [Traversa, Grasso, 2010] изучались землетрясения в период затиший для вулканов Везувий и Этна, для оценки фоновых значений. А затем сравнивались режимы в период затиший с режимом перед и во время извержений, который, предположительно, связан с интрузией по дайкам (вулкано-тектоническими событиями). Также все эти данные сравнивались с обычной тектонической сейсмичностью, чтобы выделить особенности вулканической сейсмичности. Отмечается, что на Этне на фоне относительно стационарной сейсмичности периодически выделяются пики сейсмической активности, связанные, вероятно, с движением магмы по дайкам. То есть рои вулкано-тектонических событий можно представить как возмущения сейсмического режима в результате воздействия магматических интрузий.

1.1.4 Магматические интрузии

В толще земной коры магма в основном распространяется в виде даек [Glazner, McNutt, 2021]. Дайки — это уплощенные внедрения изверженных горных пород в уже существующие породы, которые образуются в результате интрузии магмы [Sigurdsson et al., 2015; Marti et al., 2013]. По сути дайки представляют собой заполненные магмой разломы, которые могут достигать поверхности Земли, вызывая извержение, или, наоборот, могут останавливаться на некоторой глубине, вызывая только деформацию и сейсмичность [Konstantinou, 2024]. Дайки имеют толщину порядка 1-10 метров и длины порядка 1-100 километров в латеральном направлении. Оценки скорости распространения даек, полученные на основе сейсмических наблюдений, составляют порядка нескольких метров в секунду [Sigurdsson et al., 2015]. Для

распространения даек магма должна оказывать достаточное давление на вершину дайки, чтобы преодолеть прочность породы на разрыв. Также давление магмы внутри дайки должно превышать напряжения, создаваемые окружающей породой на её стенках, чтобы предотвратить её смыкание, и быть достаточным для преодоления вязкого сопротивления магмы [Sigurdsson et al., 2015]. Напряжения концентрируются на кончике дайки в микротрещинах, развитие которых приводит к продвижению дайки [Sigurdsson et al., 2015]. Необходимое давление создается за счет плавучести магмы относительно окружающих пород, увеличения объема вещества горных пород при расплавлении, сжатия расплава при коллапсе пород, упругой энергии накопленной при «раздувании» магматического очага.

Всего выделяют три типа даек по механизму распространения: (1) самораспространяющиеся дайки конечного объема, которые продвигаются за счет собственной плавучести и не имеют притока вещества в процессе; (2) дайки, распространяющиеся в частично подплавленных породах и получающие приток вещества от них; (3) и дайки, связанные с магматическими камерами, распространяющиеся за счет давления в ней [Sigurdsson et al., 2015].

Дайки преимущественно внедряются в плоскости, перпендикулярной направлению минимального сжимающего напряжения. Однако это поведение может меняться при наличии ослабленных зон в окружающих породах, например, вследствие слоистости [Sigurdsson et al., 2015]. Параметры процесса интрузии определяются давлением магмы, плотностью, упругими свойствами и прочностью на разрыв окружающих пород, а также напряженным состоянием среды [Marti et al., 2013]. Повышение давления в камере и интрузии могут привести к изменениям напряженного состояния системы разломов [Sigurdsson et al., 2015].

1.2 Вулканические рои и их природа

В [Mogi, 1963] рассматривается связь различных серий землетрясений со структурной гетерогенностью пород. Он предлагает три типа последовательностей землетрясений, возникающих в системе трещин при наличии внутреннего источника растущих напряжений (Рис. 1).

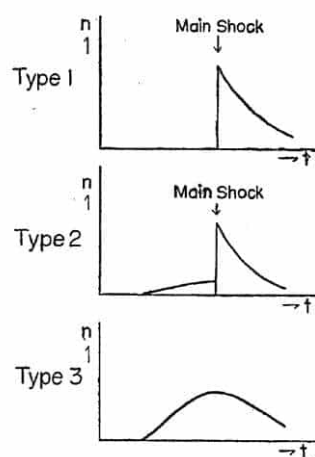


Рисунок 1. Схематичное изображение трех типов сейсмических последовательностей, предложенное в [Mogi, 1963], n – число событий в единицу времени

Он считает, что первый тип – афтершоковая серия, реализуется в областях с гомогенной структурой при равномерном приложении давления; третий тип – рой, в областях с высокой степенью раздробленности и при приложении концентрированных напряжений, например, при магматической интрузии; второй тип – форшок-афтершоковая серия, смешение других двух типов, в системах со средней гетерогенностью или при приложении неравномерного напряжения.

Могги дает следующее определение роев землетрясений – это случаи «когда количество и магнитуа землетрясений постепенно увеличиваются со временем, а затем уменьшаются после определенного периода. Среди них нет одного преобладающего главного землетрясения.» Автор предполагает, что они возникают в условиях, когда воздействие постепенно нарастает и разрушение на множестве трещин и разломов происходит уже при небольших напряжениях, поэтому выраженное крупное основное событие не может произойти. Но также этот тип может реализовываться при высококонцентрированном воздействии. По мнению автора, именно поэтому рои так часто наблюдаются в вулканической сейсмичности.

На данный момент наиболее общепринятое определение роев приводят в [Glazner, McNutt, 2021]: «заметное увеличение интенсивности сейсмической активности выше визуально установленного фонового уровня сейсмической активности без явного триггерного основного землетрясения».

Современные исследования расширяют представления Могги, выделяя конкретные физические механизмы, управляющие такими последовательностями. Так, авторы в [Roland, McGuire, 2009] на примере трансформных разломов показывают, что основным драйвером роев является асейсмический крип (медленное скольжение по разлому).

Также в работе [Roland, McGuire, 2009] предложен количественный критерий, который позволяет различать три типа последовательностей, предложенных Моги – параметр асимметрии высвобождения сейсмического момента во времени. В работе [Passarelli et al., 2018] затем показано, что для афтершоковых серий этот параметр принимает большие положительные значения (более 8), так как большая часть энергии выделяется в начале серии, а для тектонических роев лежит ближе к нулю в диапазоне от -4 до 4.

В вулканических областях механизмы возникновения роев усложняются за счет активного динамического взаимодействия расплавов и гидротермальных флюидов с вмещающими породами. Как отмечают авторы [Keir et al., 2021], в таких условиях рои служат ключевым диагностическим признаком движения магмы и летучих фаз в коре. Если в чисто тектонических условиях основным драйвером считается крип, то в вулканических системах рои, вероятно, обусловлены либо диффузией порового давления флюидов, либо непосредственным изменением поля напряжений при внедрении магматических даек.

В последнем случае на данный момент известно три основных модели генерации землетрясений при интрузии [Roman, Cashman, 2006] (Рис. 2).

В модели Хилла [Hill, 1977] землетрясения происходят на сдвиговых плоскостях, соединяющих края раздувающихся даек. Его модель основывается на трех утверждениях:

- 1) В хрупких объемах земной коры существуют скопления (кластеры) заполненных магмой даек.
- 2) Дайки внутри такого скопления систематически ориентированы своей длинной осью в направлении максимального главного регионального напряжения (σ_1)
- 3) Серия сдвиговых разрушений (рой землетрясений) происходит вдоль системы сопряженных плоскостей разломов, соединяющих концы в эшелоне даек под косыми углами.

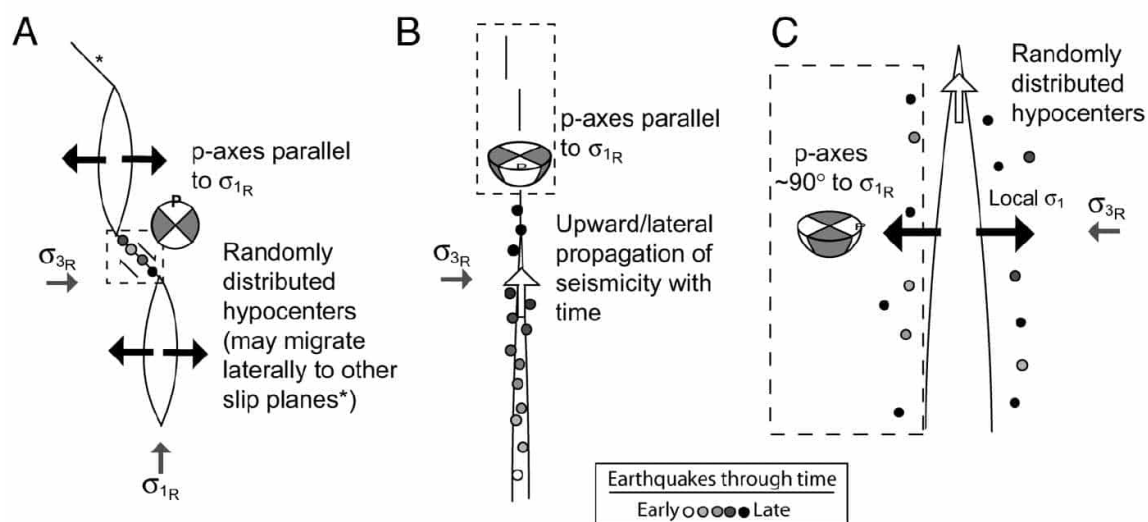


Рисунок 2. Схема трех возможных вариантов инициации вулканических роев при интрузиях из работы [Roman, Cashman, 2006]. А – модель Хилла [Hill, 1977], В – модель по [Ukawa, Tsukahara, 1996], С – модель по [Roman, 2005]

В пользу такого расположения даек говорят наблюдения конфигураций эруптивных разломов при трещинных извержениях, предполагается, что они и представляют собой дайки, достигшие поверхности.

Разрушение по перемычкам может происходить, как и при повышении давления внутри даек, так и при изменении региональных тектонических напряжений, в последнем случае магма пассивно втекает в раскрываемые трещины.

В любом случае в такой модели магнитудно-частотное распределение землетрясений будет связано с размерами даек и расстояниями между ними, а интенсивность и длительность роев будет зависеть от упруго-вязких свойств системы магма-порода и скорости с которой магма способна заполнять новый объем.

Конкретный тип очага — сдвиг, сброс или взброс — зависит от того, как ориентированы оси напряжений (σ_1 и σ_3) относительно поверхности. Если обе оси лежат в горизонтальной плоскости, то преобладают сдвиги; если σ_1 направлена вертикально, а ось σ_3 горизонтально, то сбросы; если ось σ_3 вертикально, а ось σ_1 горизонтально, то взбросы. Последний вариант почти не наблюдается.

В модели [Ukawa, Tsukahara, 1996] землетрясения происходят в зоне на кончике дайки под давлением создаваемым газом или флюидом, выделяющимся из магмы. Авторы исследовали вулканические рои при интрузиях на полуострове Изу в Японии. В июле 1989 года в этой зоне произошло подводное извержение, которое называют извержением Ито-оки. Перед этим

извержением наблюдались несколько вулканических роев и сильные деформации поверхности, говорящие о магматической интрузии, дайку моделировали как внедрение толщиной 1 метр, шириной 3 км и высотой 6 км на глубинах от 7 до 2 км. Далее авторы сравнивали положение гипоцентров землетрясений в роях с моделью интрузии и показали, что горизонтальной миграции событий не происходило, но при этом наблюдалась выраженная вертикальная миграция на несколько километров, из чего делается вывод, что интрузии происходили вертикально. Авторы предлагают механизм генерации роев при интрузии, который бы объяснил наблюдаемые эффекты: события роя были тектонического типа, события имели сдвиговый механизм с осями напряжений соответствовавшими региональным осям тектонических напряжений, вертикальную миграцию землетрясений. Они делают вывод, что именно изменения в поле напряжений, создаваемые интрузией вызывают роеподобную активность. Предполагается, что раскрытие дайки сжимает стороны по бокам от нее и одновременно увеличивает растягивающие напряжения в зоне над дайкой. Из-за того, что дайка раскрывается в направлении минимальных тектонических напряжений, девиаторные напряжения увеличиваются на кончике и уменьшаются по бокам, что и приводит к тому, что землетрясения наблюдаются только в верхней части дайки [Ukawa, Tsukahara, 1996].

Авторы [Ukawa, Tsukahara, 1996] отмечают, что, по их мнению, модель Хилла не может объяснить наблюдаемую миграцию событий по глубине, поскольку расширение дайки по Хиллу должно продуцировать землетрясения на всей длине дайки одновременно. К тому же магма, внедряющаяся в маленькие трещины, должна застывать гораздо быстрее, чем длилась интрузия в действительности, поэтому интрузия скорее происходила в виде одной толстой дайки. Также авторы упоминают, что и изменение порового давления может вызвать рои землетрясений: из-за внедрения магмы поровое давление в окружающих породах может вырасти и уменьшить прочность пород. Однако, по их мнению, такой механизм также не объясняет миграцию роев по вертикали и затухание сейсмичности в нижней части дайки.

В работе [Rubin, Gillard, 1998] на примере интрузии вулкана Килауэа 1983-го года исследовались поля напряжений, создаваемые внедрением дайки, и проверялось может ли интрузия создать новый разлом в породах с магнитудой землетрясения порядка 1, типичной для вулканических роев. Процесс инициации землетрясений управляется суперпозицией фоновых напряжений и напряжений, создаваемых интрузией. Авторы рассчитывают изменения эффективных напряжений, учитывая поровое давление жидкости. Внедрение дайки создает растягивающие напряжения перед её кончиком, направленные вдоль оси фоновых наименьших напряжений, снижая их, что приближает породу к разрушению. Однако одновременно с этим

может происходить падение порового давления из-за расширения объема пор (дилатансии), что, наоборот, упрочняет породу.

Авторы [Rubin, Gillard, 1998] утверждают, что, согласно моделям, на кончике дайки есть область, куда магма не может проникнуть из-за своей вязкости, в этой «полости на кончике» (tip cavity) находятся либо газы, высвобождаемые из магмы, либо поровые флюиды окружающих пород. В ней создается зона пониженного давления относительно фонового сжатия, действующего на стенки дайки. Влияние этой полости сильно зависит от расстояния до нее. Авторы показывают: чтобы землетрясение произошло на расстоянии 100 м от кончика 2-километровой дайки, фоновые напряжения должны составлять 70–80% от предела прочности, то есть дайка лишь подталкивает разломы к разрушению. Разрушение происходит за счет уменьшения наименьшего эффективного сжимающего напряжения.

Непосредственно вблизи полости, важную роль играет «всасывание», создаваемое низким давлением. Наиболее благоприятные условия для генерации землетрясений возникают, когда давление полости поддерживается притоком порового флюида из окружающих пород, в противном случае падение порового давления вблизи полости наоборот предотвращает разрушение. Однако даже в благоприятных условиях для генерации землетрясения с типичной магнитудой требуются либо очень низкие сдерживающие давления, либо высокие фоновые напряжения, держащие породы в состоянии близком к разрушению.

Далее авторы показывают, что влияния дайки недостаточно для того, чтобы создать новый разлом в цельном участке породы на глубинах менее 12 км.

Авторы приходят к выводу, что детектируемые землетрясения происходят только там, где порода уже была близка к разрушению. Дайка может быть намного длиннее, чем зона, отмеченная облаками землетрясений. Однако отмечается, что в этой модели не учитывались более сложные механизмы, например, разрушение по перемычкам (модель Хилла). Также выдвинута идея, что число и сила событий при интрузии зависят от того, сколько напряжений было накоплено в области тектоническими напряжениями.

Выводы работы [Rubin, Gillard, 1998] частично снимают аргументы против модели Хилла, приведенные в [Ukawa, Tsukahara, 1996]. Можно сказать, что события не происходят по всей длине дайки, потому что на пройденном дайкой пути уже не осталось разломов, на которых можно было бы инициировать разрушение.

В модели Роман землетрясения происходят в стенках по бокам дайки под воздействием напряжений, создаваемых раздуванием дайки. В работе [Roman, 2005] автор моделирует изменения кулоновских напряжений, вызываемых надуванием плоских (даек) и цилиндрических

магматических каналов. Кулоновское напряжение – это разница между сдвиговыми напряжениями по берегам разлома и удерживающими силами трения между ними. Сила трения зависит от коэффициента трения, прижимающих напряжений и от давления флюида в трещине. Предполагается, что до воздействия породы находятся в состоянии равновесия и землетрясений не происходит, внедрение магмы может повлиять на обе компоненты кулоновских напряжений. Если изменение кулоновских напряжений положительно относительно состояния покоя, то порода ослабляется и происходят разрушения. Изменения кулоновских напряжений на разломах будет зависеть от того, как они ориентированы по отношению к дайке. В результате моделирования [Roman, 2005] показывает, что надувание дайки длиной 1 м продуцирует значительные положительные изменения в кулоновских напряжениях на разломах, ось сжатия которых ориентирована идеально вдоль оси максимального сжатия поля напряжений дайки, на расстояниях до 4 км по направлениям перпендикулярным стенкам дайки и вдоль кончика дайки. Сами разломы при этом будут ориентированы под углом 55 градусов к направлению на Север, если региональная ось максимального сжатия направлена с Юга на Север. На разломах же, ориентированных по региональной оси максимального сжатия (35 градусов к направлению на Север), положительные изменения происходят в областях по диагонали от кончика дайки. В первой и второй группе оси сжатия очагов будут расположены под 90 градусов к друг другу, так как дайка, как правило, раскрывается в направлении минимального регионального сжатия.

Таким образом, характерным признаком реализации этого механизма может служить наличие событий с механизмами очагов, в которых оси сжатия направлены под 90 градусов к региональной оси максимального сжатия. Такое, например, обнаружили при интрузии на вулкане Августина в 2006-ом году [Zhan et al., 2022]. В заключение, применив свою модель к данным извержения Кратер-Пик (1992), [Roman, 2005] успешно объяснила 86% аномальных механизмов очагов, однако отметила, что локализация событий ограничивалась лишь зонами вблизи канала. Автор объясняет это тем, что разломы с нужной ориентацией могут просто не существовать во всей области интрузии, либо тем, что модельных положительных изменений кулоновских напряжений в действительности не хватает для того, чтобы инициировать разрушение на разломах на больших расстояниях от дайки.

В работе [Roman, Cashman, 2006] проводится сравнение всех трех моделей и предпринята попытка сопоставить их предсказания с реальными наблюдениями. Авторы считают, что в модели Хилла гипоцентры событий должны быть распределены вокруг краев дайки без явной миграции во времени, либо должны следовать за латеральным продвижением дайки, оси сжатия очагов должны быть направлены вдоль оси максимального регионального сжатия. В случае модели [Ukawa, Tsukahara, 1996] гипоцентры должны следовать за головой интрузии и оси

сжатия очагов так же направлены вдоль оси максимального регионального сжатия. В случае модели [Roman, 2005] события должны быть случайно распределены во времени в объеме пород по берегам дайки, оси сжатия очагов должны быть под 90 градусов к оси максимального регионального сжатия.

Рассмотрев 10 случаев, авторы в [Roman, Cashman, 2006] приходят к выводу, что ни одна из моделей не способна описать все наблюдаемые ситуации, поскольку, судя по всему, каждая модель описывает влияние интрузии в своей области пространства относительно дайки и на практике может реализовываться каждая из них. Хотя аналитические и численные модели показали, что гипотезы [Ukawa, Tsukahara, 1996] и [Roman, 2005] могут работать одновременно, на практике таких случаев не наблюдается, что может говорить о том, что зачастую один из процессов может происходить асейсмически. Первая модель характерна для вулканов с базальтовыми магмами и в условиях сильных девиаторных тектонических напряжений, а вторая наблюдается на стратовулканах с сильно-кристаллизованными магмами. Признаки же модели Хилла авторы никогда не наблюдают отдельно от прочих, из чего делается вывод, что эта модель может работать только как сопутствующая. Таким образом, реализация того или иного механизма зависит от параметров существующей системы разломов, ориентации и величины региональных напряжений и от реологических характеристик магмы.

Похожие наблюдения обсуждались в [Passarelli et al., 2015]. Авторы считают, что преобладающий механизм землетрясений при интрузиях может быть разным: при длинных приповерхностных латеральных интрузиях в рифтовых зонах без существующих сдвиговых разломов, дайки генерируют в основном сбросы и небольшое число мелких сдвигов на кончике. Поднимающиеся же вертикально дайки индуцируют большое число сдвигов в вертикальных стенках и малое количество чистых сбросов на верхней границе дайки. В местах, где тектонические напряжения превалируют над интрузивными, например, в Исландии или Эфиопии, преобладают сбросы.

Вероятно, благодаря наличию различных механизмов инициации в природе наблюдается многообразие вулканических роев. Задача их классификации стоит довольно давно и остается актуальной до сих пор. По сути она сводится к объединению роев в группы по какому-либо признаку так, чтобы это в конечном итоге отражало некоторое принципиальное физическое различие между ними. В таком случае каждый тип роев будет поставлен в соответствие конкретному физическому процессу происходящему в недрах, что позволит получать информацию динамике магматической системы.

В работе [Benoit, McNutt, 1996] была создана база данных из более чем 600 вулканических роев, для каждого из которых приводятся даты возникновения, длительность, магнитуа максимального события, число событий. Там же предлагается некоторая классификация вулканических роев на три типа: первые – рои предвещающие извержения, вторые – сопровождающие извержения и третьи – не приуроченные к извержениям (но все еще близко к вулканам по пространству). Первые два типа авторы также разделяют на подкатегории в зависимости от того как они соотносятся по времени с периодом извержения: например, начались до извержения и закончились с началом извержения, или начались до извержения и закончились в конце извержения и т.п.

В основном авторы в [Benoit, McNutt, 1996] уделяют внимание именно длительностям роев. Они описывают интересное наблюдение: для наиболее длинных роев первого типа прослеживается положительная корреляция между их длиной и логарифмом длительности вулканического затишья перед извержением. Авторы интерпретируют это так: чем дольше было затишье, тем более механически прочную и холодную породу магма встретит на своем пути перед извержением. Однако для большой группы более коротких роев этого типа такая корреляция отсутствует. На наш взгляд, это подводит к мысли, что типизация просто по моменту реализации роя относительно периода извержения не в полной мере отражает действительность.

В более современной работе [McNutt, 2025] автор подчеркивает, что диагностика вулканических роев является «ключом к успешному прогнозированию извержений». Автор вводит два типа роев на основе 6 примеров извержений. Он отмечает закономерность: перед извержениями иногда наблюдается пара роев – сперва «длинный» рой, затем «короткий», в котором появляются землетрясения с длиннопериодными компонентами в сигнале. [McNutt, 2025] предполагает, что первый тип роя является откликом среды на рост давления магмы, а второй свидетельствует о процессе продвижения магмы к поверхности в результате открытия канала. Такая модель во многом носит концептуальный характер, о чем говорит и сам автор. Он также отмечает, что обозначенная закономерность выполняется не на всех вулканах. Даже в предложенных 6 примерах на одном вулкане отсутствует длинный рой, а на другом выражен очень слабо (всего 82 события за 30 суток). К тому же в выборке рассмотрены вулканы только из субдукционных зон. Закономерное поведение параметра наклона графика повторяемости, на которое в том числе опирается автор, наблюдается только в половине рассмотренных случаев.

1.3 Наклон графика повторяемости в вулканической сейсмичности

Одним из ключевых законов сейсмологии является закон Гутенберга-Рихтера [Gutenberg, Richter, 1944], который описывает зависимость логарифма числа событий с определённой

магнитудой в некотором регионе за некоторый период времени от величины этой магнитуды. Эмпирически было выявлено, что эта зависимость линейная:

$$\lg N = a - bM,$$

где N — число событий с магнитудой M , a и b — константы. Сама эта зависимость обычно называется частотно-магнитудным распределением, либо графиком повторяемости, а коэффициент b — наклоном графика повторяемости, далее для краткости мы иногда будем называть его *b-value* или параметр b .

Наклон графика повторяемости показывает соотношение между количеством событий той или иной силы. То есть если на одно событие магнитуды 3 в одном случае приходится 10 событий с магнитудой 2, а в другом 15 событий, то в первом случае параметр b меньше, чем во втором.

Важно отметить, что интерпретация значений *b-value* на данный момент проводится обычно в сравнении. В сейсмологии в качестве реперной точки используется величина 1.0, которая наблюдается в среднем по всей планете для «классических» тектонических режимов. Поэтому если в каком-то режиме наклон графика повторяемости значительно отклоняется от 1.0, можно говорить об аномальных значениях.

Исследование наклона графика повторяемости является распространенным методом анализа сейсмичности, в том числе вулканической, предполагается, что этот параметр может зависеть от напряженного состояния среды (при увеличении напряжений, *b-value* снижается), однородности пород, порового давления и термальных градиентов [Ibáñez et al., 2012; Konstantinou, 2022; Passarelli et al., 2015].

В отличие от «классической» тектонической сейсмичности, где параметр наклона графика повторяемости обычно близок к единице с небольшими локальными отклонениями, в вулканической сейсмичности наблюдается широкий диапазон значений [Ibáñez et al., 2012].

В статье [Roberts et al., 2015] авторы приводят сводную таблицу, где представлены уже известные общие оценки параметра b для 34 случаев вулканической сейсмичности. Значения колеблются от аномально низких (вплоть до 0.5) до аномально высоких (вплоть до 3.07). Авторы отмечают, что есть небольшой тренд уменьшения параметра при увеличении размера выборки событий, по которым оно рассчитывается.

В работе [Ibáñez et al., 2012] авторы также приводят сводку по текущим исследованиям *b-value* в вулканической сейсмичности. Упоминается работа [McNutt, 2005], где в различных вулканических регионах значения везде более единицы и иногда приближаются к 2.0. Также указывается, что в спокойных вулканических зонах, как, например, Везувий [Del Pezzo et al,

2003], значения в основном близки к единице, когда же проявляются магматические процессы значения обычно выше единицы, в этом контексте упоминается работа [Gresta, Patane, 1983], в которой при извержении вулкана Этна в 1981 году получены значения параметра b от 2.4 до 3.7. Там же отмечается, что значение b увеличивалось перед началом извержения и быстро снижалось за несколько дней до него. Отмечается спад наклона графика повторяемости перед извержениями вулкана Лоихи Гавайских островов в 1971 и 1975 годах [Klein, 1982]. Общий вывод авторов работы [Ibáñez et al., 2012]: «В целом, высокие значения параметра b в вулканических районах, по-видимому, напрямую связаны с наличием, миграцией и извержением магмы. Напротив, когда преобладает тектонический режим, значения параметра близки к единице.»

Паттерн роста и падения b -value перед извержениями отмечается и в других работах. Так в работе [Jacobs, McNutt, 2010] показано, что перед извержением вулкана Августина 2006-го года, значение b -value сперва резко выросло до значения около 2.10 и затем упало до, примерно, 0.80. Временной масштаб аномалии 255 суток. Авторы рассуждают, что по мере приближения извержения должны расти напряжения в породах из-за повышения давления магмы, что должно снижать b -value, также можно ожидать повышения порового давления и термического градиента, что должно привести к росту b -value непосредственно перед началом извержения. Тем не менее оказалось, что поведение параметра не удовлетворяет такой модели. Они считают, что повышенное значение параметра в период за месяц до извержения можно связать с повышением порового давления в результате начала активного внедрения дайки. Они также отмечают, что временные вариации b -value коррелируют со стадиями, выделенными по поверхностным деформациям, только в среднем, но при этом есть и дополнительные флуктуации, которые не сопровождаются никакими изменениями в деформациях. Хотя авторы подтверждают рост термального градиента перед извержением, параметр b тем не менее падает, в связи с чем, ключевым фактором, влияющим на параметр, авторы считают повышение напряжений в среде.

Похожий паттерн падения b -value наблюдается в работах [Roberts et al., 2015; Ibáñez et al., 2012; Martí et al., 2013] перед извержением вулкана Иерро в 2011-ом году. Значение падало от 2.47 до, примерно, 1.0 в течение около 80 суток. В работе [Konstantinou, 2022] исследовались вариации наклона графика повторяемости за длительные периоды (более 25 лет) для четырех вулканов Алеутской дуги: Макушин, Мартин, Редаут и Спурр. На всех вулканах анализ вариаций проводился в окнах шириной более 1000 событий со сдвигом на 1 событие, для оценки b -value использовался метод Аки-Утсу [Aki, 1965; Utsu, 1965]. Автор показывает, что на всех вулканах наблюдается падение b -value перед извержениями или периодами вулканического беспокойства. Однако экстремально высоких значений ни в одном случае получено не было.

На основе своих наблюдений и сравнений с результатами лабораторных исследований автор предлагают следующую интерпретацию: напряжения, создаваемые интрузией, сперва продуцируют большое количество маленьких трещин, которые постепенно объединяются в макроскопический разрыв. [Konstantinou, 2022] сообщает, что в лабораторных экспериментах по разрушению магматических пород *b-value* акустической эмиссии достигал минимума прямо перед сломом образца.

Также автор [Konstantinou, 2022] утверждает, что другие лабораторные эксперименты показали связь гетерогенности материалов с параметром *b*: трещины прорастали на более короткие расстояния в более гетерогенных образцах, давая более локальные разрозненные разрушения. Показано, что в акустической эмиссии менее гетерогенные образцы давали значения параметра *b* меньше либо равно 1, а более гетерогенные единицу и выше. Этим автор объясняет более низкие значения параметра на вулканах Макушин и Мартин по сравнению с вулканами Спурр и Редаут.

Некоторые ученые ставят под сомнение правдоподобность экстремально высоких значений наклона графика повторяемости [Konstantinou, 2022; Roberts et al., 2015]. Так в работе [Roberts et al., 2015] критикуются методы, использовавшиеся в предыдущих работах, сообщающих об экстремально высоких значениях параметра *b*. Они считают, что во многих работах недооценена погрешность значений *b-value*, они также не доверяют значениям, полученным по слишком маленькой выборке или по слишком короткому диапазону магнитуд. Тем не менее при использовании своей методики, самой надежной по мнению авторов, они подтверждают экстремально высокое значение (2.39 ± 0.10) на вулкане Йерро перед извержением 2011-го года, хотя и опровергают некоторые значения, полученные ранее для вулкана Этна. [Konstantinou, 2022] критикует расчет *b-value* по узкому диапазону магнитуд и в своей работе ставит требование к ширине диапазона не менее двух единиц магнитуд, он считает значения *b-value* более 1.20 завышенными, хотя в работе [Roberts et al., 2015] уже было получено экстремально высокое значение с соблюдением очень жестких требований к расчетам.

Важной работой в контексте темы текущего раздела является исследование [Glazner, McNutt, 2021]. Авторы отмечают, что в вулканических роях характерное значение *b*, примерно, 1.6-1.8. Авторы принимают логнормальное распределение, как наилучшую модель распределения толщин даек. Восстановив статистику по наблюдениям достигнувших поверхности застывших даек, авторы генерируют набор случайных толщин, выбирая их из логнормального распределения, затем вычисляют энергию раскрытия каждой лайки, берут в качестве сейсмической энергии 1% от неё и вычисляют магнитуду такого события. По нескольким симуляциям авторы получают значения *b*, примерно, от 1.6 до 1.8. Авторы также показывают,

что на сам наклон распределения влияет только стандартное отклонение логнормального распределения толщин даек: более низкое значение отклонения дает более низкие значения *b-value*.

Таким образом авторы связывают распределение толщин геологических даек с наклоном графика повторяемости землетрясений в вулканических рядах, и получают модельное значение около 1.7, что очень похоже на аномально высокие значения, наблюдаемые в вулканической сейсмичности. Авторы считают, что высокое *b* отражает преобладание числа мелких даек над крупными. То есть эта работа показывает, что наклон графика повторяемости в вулканических рядах может определяться структурой разломов среды. Авторы также ссылаются на модель генерации вулканических роев Хилла, как частичное подтверждение своей гипотезы, так как в его модели магнитудно-частотное распределение вулканического роя связано с размерами даек и расстояниями между ними.

Заключение к главе 1

Первопричиной вулканизма является конвекция вещества в верхней мантии Земли, благодаря которой в конечном итоге происходит локальное частичное расплавление мантийного вещества. Затем из-за действия силы плавучести расплавленное вещество поднимается к поверхности, распространяясь в основном посредством даек – уплощенных разломов в горных породах, заполняемых магмой. В общем случае упрощенной моделью дайки служит форма в виде «монеты». Внедрение магмы в такие разломы называют интрузией. Для распространения даек требуется достаточное давление магмы, чтобы преодолеть прочность породы на разрыв, сопротивление вязкого трения и сжимающее давление, действующее на стенки дайки. Необходимое давление создается за счет плавучести магмы относительно окружающих пород, увеличения объема вещества горных пород при расплавлении, сжатия расплава при коллапсе пород, упругой энергии накопленной при «раздувании» магматического очага.

Интрузии зачастую предвещают извержения, вызывая вулканические рои. В основном такие рои представлены сдвиговыми, вулкано-тектоническими землетрясениями. В качестве основного кандидата для инициации вулканических роев при интрузиях рассматривается механическое изменение напряженного состояния среды под давлением магмы в дайке, а разрушение происходит на уже существующих разломах, в состояниях близких к пределу прочности.

Вариации значений наклона графика повторяемости вулканической сейсмичности является предметом активной дискуссии. Многие ученые подвергают сомнению истинность экстремально высоких значений (более 1.90), считая, что это результат артефактов расчета. Хотя в некоторых случаях такое мнение, видимо, не беспочвенно, применение авторами наиболее строгих методов

подходов к расчету все равно подтверждает принципиальное существование таких значений. Тем не менее все еще недостаточно хорошо изучено, где и при каких условиях они проявляются.

Падение значения наклона графика повторяемости перед извержениями достаточно достоверно наблюдается на многих вулканах и основной гипотезой для объяснения такого поведения является зависимость параметра от величины напряжений, которые, предположительно, растут по мере роста давления магмы. Однако такая модель не в полной мере объясняет, почему такое явление наблюдается не перед всеми извержениями, а также не объясняет наличие экстремально высоких значений.

Глава 2. Методы

2.1 Оценка представительной магнитуды и наклона графика повторяемости

В вопросе методологии оценок наклона графика повторяемости можно выделить три ключевых аспекта, каждый из которых в значительной степени влияет на результат: метод оценки представительной магнитуды, метод оценки самого наклона графика повторяемости, метод оценки его погрешности. Большинство работ, посвященных оценкам параметра наклона графика повторяемости в вулканической сейсмичности, различаются по этим трем аспектам, поэтому для корректного сравнения и дополнительного подтверждения результатов исследований актуальной задачей является пересчет значений унифицированной методикой даже для тех случаев, где подобный анализ уже выполнялся.

Наименьшая вариативность в исследованиях наблюдается в методе оценки наклона графика повторяемости, хотя иногда встречается применение метода наименьших квадратов, предпочтительным считается метод максимального правдоподобия [Roberts et al., 2015]. Часто используется формула Аки-Утсу [Aki, 1965; Utsu, 1965], но в данной работе для оценки наклона графика повторяемости везде будет использоваться метод Бендер [Bender, 1983]. В [Bender, 1983] указывается, что другие оценки b методом максимального правдоподобия (в том числе, например, формула Аки) дают смещенные оценки при использовании на группированных данных. Метод Бендер учитывает этот фактор, а также ограничение выборки сверху и возможность наличия пустых интервалов гистограммы, что особенно важно на малых выборках.

Представительной магнитудой (обычно обозначается M_c от английского *magnitude of completeness*) называют порог магнитуд событий, начиная с которого сейсмической сетью зарегистрированы все сейсмические события без пропусков в некоторой области пространства за некоторый период времени. Этот порог зависит от чувствительности сети, так как чем слабее землетрясение, тем сложнее его зарегистрировать. На практике этот факт выражается в отклонении графика повторяемости от линейной формы в области малых магнитуд, то есть в неполноте регистрации слабых событий, из-за чего график повторяемости «загибается» вниз на магнитудах меньших порога представительности. Выбор порога представительности оказывает значительное влияние на оценки наклона графика повторяемости, поэтому задача определения порога представительности всегда стоит остро при анализе сейсмических каталогов [Woessner, Wiemer, 2005], [Смирнов, 2009].

Существует ряд методов оценки порога M_c , которые периодически применяются в различных исследованиях. Стоит отметить, что, по крайней мере, в исследованиях

вулканической сейсмичности выбор метода не всегда обосновывается авторами, и зачастую субъективен. Приведем три основных метода, которые используются чаще всего [Roberts et al., 2015].

1) Метод максимальной кривизны (MAXC) – в качестве порога принимается значение магнитуды, при котором достигается максимальная кривизна кумулятивного графика повторяемости [Mignan, Woessner, 2012], [Wiemer, Wyss, 2000].

2) Оценка посредством расчета критерия согласия (в англоязычной литературе Goodness-of-fit test или GFT) – метод заключается в итерации по порогам магнитуд от меньших к большим и проверки линейности графика повторяемости на каждом шаге, критерием линейности служит коэффициент детерминации R – величина характеризующая модуль разности числа событий в каждом магнитудном интервале между наблюдаемыми значениями и модельными. Порог считается найденным на первом значении магнитуды, при котором коэффициент детерминации достигает заданного значения, обычно 90% или 95% [Mignan, Woessner, 2012], [Wiemer, Wyss, 2000].

3) Метод по стабильности значений параметра b (the b -value stability method (BVS или MBS)) – метод заключается в предварительной итерации по порогам магнитуд от меньших к большим, покрывающим весь диапазон значений. Для каждого из порогов рассчитывается значение наклона графика повторяемости и его погрешность. В качестве порога выбирается магнитуда, при которой текущее значение b -value не отличается от следующих с учетом погрешности, предполагая, что при порогах больших искомого значения M_c наклон графика повторяемости остается постоянным [Mignan, Woessner, 2012], [Cao, Gao, 2002].

Анализ работы этих методов на синтетических данных был проведен в работе [Roberts et al., 2015]. Показано, что качество работы методов меняется в зависимости от размера выборок, наклона графика повторяемости и «остроты» пика распределения, причем по-разному. Под «остротой» пика распределения в данном случае подразумевается форма дифференциального графика повторяемости в верхней части, в области перехода от линейной части к непредставительной. Этот переход может происходить резко, в лучшем случае в рамках двух интервалов магнитуд гистограммы, либо плавно, постепенно отклоняясь от линейной формы на протяжении нескольких интервалов гистограммы.

Метод MAXC работает лучше всех на «остром» распределении как при стандартном b (близком к 1), так и при высоком, благодаря тому, что метод по существу сводится к отысканию максимума дифференциального магнитудно-частотного распределения, который в случае «острой» формы совпадает с переходом в зону ниже порога представительности. Метод BVS

работает так же хорошо, как МАХС на низком значении наклона графика повторяемости, но для высокого b дает завышенную оценку M_c , но при этом на выборках большого объема он все еще дает хорошие оценки наклона. Метод GFT на малых выборках достигает 95% уровня только на очень больших магнитудах, оставляя слишком мало представительных событий. На больших выборках качество его работы улучшается, но для «острого» распределения этот метод дает самые неточные оценки b , и авторы считают его худшим из рассмотренных.

Для распределения с «закругленной» формой пика метод GFT не дает надежных оценок представительной магнитуды M_c , но на малых выборках все еще позволяет получить неплохие оценки b в пределах статистической ошибки, но оценки смещены в сторону завышения. На больших выборках (число событий выше порога представительности $N_c = 1000$ и 5000) он дает хорошие оценки и для низкого, и для высокого наклона графика повторяемости. Метод МАХС работает плохо при любом размере выборки. Качество оценки M_c методом BVS увеличивается с ростом размера выборки. При $N_c \geq 200$ он дает стабильно хорошие оценки b как для высоких, так и для низких значений, но для малых выборок метод может дать аномально большие значения b при низком истинном значении b .

В данной работе мы отдадим предпочтение другому методу. Его алгоритм описан в [Смирнов, 2009] и основан на работах [Писаренко, 1989; Садовский, Писаренко, 1991]. Его суть заключается в итерации по магнитудам от малых до больших, на каждой итерации проверяется две гипотезы на заданном уровне значимости: гипотеза о линейности графика повторяемости с текущим порогом и гипотеза о полноте регистрации в текущем младшем интервале магнитуд. В качестве представительной магнитуды принимается первый порог, при котором не отвергнуты обе гипотезы. Полнота регистрации в младшем интервале магнитуд проверяется через сравнение наблюдаемого числа событий с восстановленным по следующим интервалам значением. Сравнение работы этого метода с другими на синтетических данных с распределениями разной формы было проведено в работе [Павленко, Завьялов, 2022], где он обозначен как метод LLS (Lower End of Linear Segment). Авторы приходят к выводу, что метод из работы [Смирнов, 2009] показывает одни из лучших результатов: его оценки являются состоятельными, быстро сходятся к истинному значению при росте размера выборки и обладают относительно невысокой дисперсией в большинстве протестированных сценариев.

Проведем дополнительное сравнение работы трех методов из [Roberts et al., 2015] с методом LLS на примере наборов данных вулканической сейсмичности, используемых далее в работе. Для этого воспользуемся методом бутстрэпа [Hesterberg et al., 2005] в соответствии с рекомендацией [Woessner, Wiemer, 2005].

Рассмотрим два графика повторяемости для двух роев предэруптивной фазы вулкана Редаут перед извержением 2009-го года (Рис. 1). Первый служит примером относительно малой выборки с зашумленным распределением (198 событий), второй график с выраженной линейной частью и большим числом событий (1735).

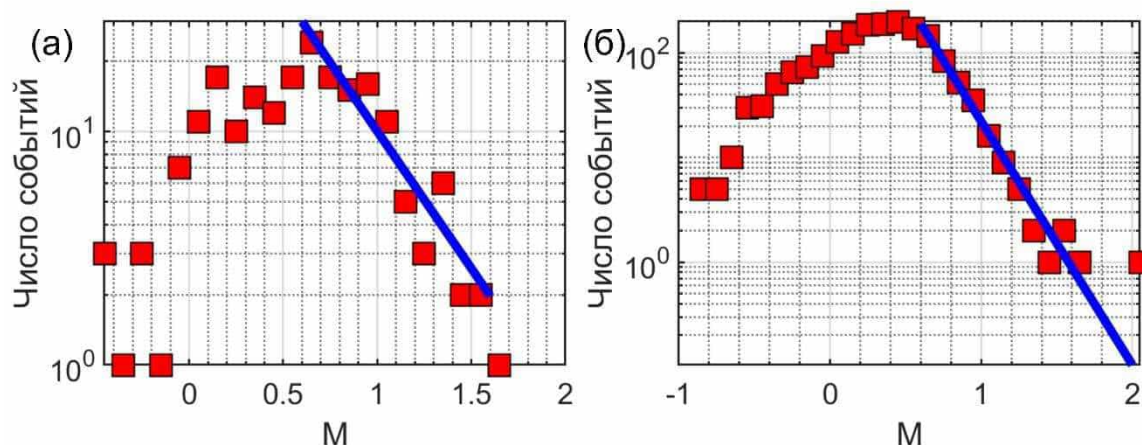


Рисунок 1. Графики повторяемости для двух роев вулкана Редаут, (а) – первый рой, (б) – второй рой, синей линией показана полученная аппроксимация наклона графика с порогом $M_c = 0.6$.

Сравним результаты работы 4 методов по 1000 итерациям бутстрэпа, для метода LLS в первом случае использовался уровень значимости 0.15, во втором – 0.05. Результаты по данным первого роя показаны в таблице 1, по данным второго роя в таблице 2.

Таблица 1. Результат теста методов оценки представительной магнитуды бутстрэпом для первого роя вулкана Редаут

	MAXC	BVS	GFT95	Метод по [Смирнов, 2009] (LLS)
Число неудачных итераций	1	417	997	152
Значение M_c	0.62 ± 0.17	0.64 ± 0.07	0.95 ± 0.19	0.66 ± 0.13
Значение b	1.22 ± 0.31	1.23 ± 0.17	2.24 ± 0.18	1.31 ± 0.35

Таблица 2. Результат теста методов оценки представительной магнитуды бутстрэпом для второго роя вулкана Редаут

	MAXC	BVS	GFT95	Метод по [Смирнов, 2009] (LLS)
Число неудачных итераций	0	52	185	57
Значение M_c	0.40 ± 0.08	0.64 ± 0.09	0.58 ± 0.06	0.61 ± 0.08
Значение b	1.95 ± 0.23	2.38 ± 0.23	2.29 ± 0.18	2.32 ± 0.21

Неудачной считается итерация, в которой не был найден порог, удовлетворяющий требованиям метода, либо если найденный порог оказался настолько высок, что число событий выше порога стало меньше 20. Для подсчета параметров все неудачные итерации удаляются из рассмотрения. В случае второго роя методы LLS, GFT и BVS показывают схожие результаты, но метод GFT95 дает значительно большее число неудачных итераций. Оценки методом MAXC занижены относительно трех других. На примере данных первого роя методы MAXC, BVS и LLS дают схожие оценки, но метод BVS имеет наибольшее число неудачных итераций. Метод GFT95 имеет более 90% неудачных итераций и дает завышенные относительно трех других методов оценки. Ясно, что метод MAXC дает наименьшее число неудачных итераций по своей природе, но при «закругленных» формах распределения он будет систематически занижать оценки.

На основе результатов работы [Павленко, Завьялов, 2022] и проведенного нами сравнения для дальнейшего использования было отдано предпочтение методу LLS (Lower End of Linear Segment) в реализации [Павленко, Завьялов, 2022], показавшему наилучшую стабильность на синтетических и реальных тестах по сравнению с прочими популярными методами. Отметим, что второй по стабильности метод (BVS) согласно [Roberts et al., 2015] очень плохо работает на узких диапазонах магнитуд, с которыми часто приходится работать при анализе вулканических роев, так как ему требуется, чтобы справа от порога наблюдалось достаточное число стабильных значений b -value, что в узких диапазонах магнитуд выполняется не всегда.

На практике задача оценки временных вариаций наклона графика повторяемости осложняется тем, что чувствительность сети может меняться во времени, например, из-за добавления новых станций, но более важным в контексте вулканической сейсмичности является свойство сети «забываться» при росте активности – при большом числе сейсмических событий в

единицу времени их сигналы могут накладываться друг на друга, усложняя их регистрацию, что приводит к повышению представительной магнитуды.

Это подводит к еще одному аспекту, по которому отличаются исследования временных вариаций наклона графика повторяемости. Существует два основных подхода. В обоих случаях используется метод скользящего по времени окна, но в одном случае представительная магнитуда оценивается индивидуально в каждом окне. Такой метод, хотя и позволяет использовать наибольший доступный объем данных, имеет некоторую проблему. Значения наклона графика повторяемости, рассчитанные для одного и того же распределения при разных порогах (даже если оба выше M_c), могут различаться. Это происходит из-за влияния локальных отклонений эмпирических данных от линейной формы и различного вклада старших интервалов магнитуд в итоговую оценку. В этом смысле вариации представительной магнитуды во времени в некоторой степени модулируют значения параметра b , приводя к мнимым вариациям. К тому же в таком подходе, каждая точка рассчитывается по разному объему выборки. Альтернативный подход заключается в предварительном построении вариации M_c во времени и выборе на их основе единого порога для всего периода, после чего оценка значений b производится в скользящем по времени окне с фиксированным числом событий выше порога. Хотя на данный момент предложена и принципиально другая методика расчета временных вариаций наклона графика повторяемости [Roberts et al., 2016], в данной работе мы отдаем предпочтение широко апробированному методу скользящего по времени окна с фиксированным порогом представительной магнитуды, в том числе для возможности сопоставлять результаты как с другими исследованиями вулканической сейсмичности, так и с результатами исследований тектонической сейсмичности и лабораторных экспериментов.

В работе [Roberts et al., 2015] рекомендуют использовать выборки с числом представительных событий ($N_c \geq 200$), при анализе временных вариаций в вулканических роях такое требование зачастую либо невыполнимо, либо приводит к критическому снижению временной разрешающей способности, не позволяя отследить динамику процесса. Об этом упоминают авторы [Woessner, Wiemer, 2005] и допускают использование меньших выборок с осторожностью. Далее в работе сперва будут строиться вариации представительной магнитуды во времени в окнах шириной не менее 150 событий, на основе которых будет выбираться фиксированный для всего интервала порог. После чего оценки наклона графика повторяемости будут проводиться по размерам окон от 50 до 150 событий выше выбранного порога представительности, оценка погрешности в каждой точке будет проводиться с помощью бутстрэпа, для ключевых точек будут предоставляться графики повторяемости для визуального контроля над формой распределения и корректности оценок. Также для фаз с

предположительным различным значением наклона графика повторяемости будет проводится Z-тест значимости различий. Более детально проделанные операции приводятся в каждом частном случае для каждого роя далее в тексте.

Авторы в [Roberts et al., 2015] также подвергают сомнению аномально высокие значения *b-value*, полученные по малым выборкам, указывая, что на малых выборках оценки *b* стремятся к завышению значения. В качестве одного из аргументов они приводят тренд падения *b-value* при увеличении выборки, наблюдающийся по статистике измерений на различных вулканах. Однако, этот аргумент не кажется полностью состоятельным, так как вполне вероятно, что увеличение размера выборки просто приводит к усреднению локальных значений *b-value*, которые при этом могли быть истинно высокими. К тому же практика показывает, что по одинаково малой выборке в вулканической сейсмичности можно получить, как высокое, так и низкое значение в разные моменты времени. Стоит также иметь в виду, что при истинно высоком *b-value*, график повторяемости естественным образом будет иметь более узкий диапазон магнитуд из-за большей «крутизны» наклона, но в таком случае авторы [Roberts et al, 2015] методологически ограничивают возможность параметра *b* принимать высокие значения, в таком случае велика вероятность исказить истину. Например, в этом разделе выше мы уже получили экстремально высокое значение наклона графика повторяемости (2.32 ± 0.21) для одного из вулканических роев предэруптивной фазы вулкана Редаут, такое значение получено с использованием трех методов оценки представительной магнитуды по выборке размером более 1700 событий и по 352 представительным событиями, при этом используемый диапазон магнитуд охватывает значений от 0.6 до 2. По нашему мнению, оснований сомневаться в истинности такого значения нет. Отметим также, что сами авторы в работе [Roberts et al, 2015] тем не менее получают экстремально высокое значение наклона 2.39 ± 0.10 в предэруптивной фазе вулкана Йерро.

Для оценки погрешности *b-value* в данной работе используется метод бутстрэпа по 200 итерациям (в [Woessner, Wiemer, 2005] указано, что оценки стабилизируются при 200 итерациях и больше).

2.2 Оценка временной асимметрии роев землетрясений

Временным профилем роя будем называть график зависимости числа событий роя в единицу времени от времени, такие профили схематично изображены у Моги [Mogi, 1963] в качестве изображения трех различных типов последовательностей. Временным энергетическим профилем роя – график высвобождения сейсмической энергии или момента во времени. Такой график можно критиковать с той точки зрения, что суммарная энергия или момент в единицу

времени является неустойчивой оценкой и в каждом интервале времени подавляющая доля энергии будет обеспечиваться событием с наибольшей магнитудой. Тем не менее такое представление важно в контексте данной работы, он позволяет увидеть, в какой части роя выделилась наибольшая доля энергии. Такой график применим для роев еще и по причине того, что в них события имеют относительно слабые магнитуды, что зачастую позволяет выставлять линейную шкалу по вертикальной оси, а также допускает ситуации, когда достаточное число более слабых событий может перевесить одно более сильное. Кульминацией роя будем называть период его максимальной активности. На первый взгляд кажется тривиальным, что большая часть энергии роя выделяется в период его кульминации, такое, например, будет выполняться для мейншок-афтершоковых серий – наибольшее число афтершоков в единицу времени происходит сразу после основного толчка – в момент выделения большей части энергии серии. Однако для роев в общем случае это не обязательно выполняется – сильнейшее событие может произойти в любой случайный момент времени роя, тогда момент высвобождения большей части энергии может не совпасть с кульминацией роя.

Для формализации описания формы профиля последовательностей воспользуемся критериями асимметрии. Энергетический критерий асимметрии был предложен в [Roland, McGuire, 2009], он характеризует насколько симметрично высвобождается энергия роя относительно времени центроида – взвешенного по энергиям среднего временного центра последовательности:

$$t_{centroid} = \bar{t} = \frac{\sum_i^n t_i * M_{0i}}{M_{0tot}}$$

где t_i – время события, M_{0i} – сейсмический момент события, n – число событий, M_{0tot} – суммарный сейсмический момент последовательности.

Далее рассчитывается коэффициент асимметрии [Roland, McGuire, 2009]:

$$skewness_E = \frac{\sum_i^n (t_i - \bar{t})^3 * M_{0i}}{M_{0tot} * \sigma^3}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i^n (t_i - \bar{t})^2 * M_{0i}}{M_{0tot}}}$$

В [Passarelli et al., 2018] показано, что этот коэффициент принимает большие положительные значения (более 8) для афтершоковых серий, указывая на их правую асимметрию по высвобождению энергии. А для тектонических роев севера Исландии значения лежали в диапазоне от -4 до 4. А в статье [Roland, McGuire, 2009] значения от -11.1 до 1.8 для

тектонических роев Южной Калифорнии. Эта методика была апробирована нами на примере вулканических данных в работе [Греков, 2025].

Для анализа временного профиля роев используется второй коэффициент асимметрии Пирсона:

$$skewness_N = \frac{3 * (\bar{t} - \tilde{t})}{\sigma_t}$$

где $\bar{t}$ – среднее арифметическое времен событий роя, $\tilde{t}$ – медиана, σ_t – стандартное отклонение времени событий.

Далее в таблицах коэффициент асимметрии высвобождения сейсмического момента будет обозначаться $M_{0\ skew}$ или альтернативно E_{skew} – если для оценки асимметрии используется сейсмическая энергия, а не момент. Коэффициент асимметрии временного профиля активности будет обозначаться как N_{skew} .

Глава 3. Основные результаты

3.1 Вулкан Редаут

3.1.1 Обзор

В данном разделе рассматривается предэруптивная сейсмичность вулкана Редаут (Аляска) в 2009 году. Редаут – это стратовулкан высотой более 3 км, в 2009-ом году он возобновил активность через 20 лет после извержения 1989 года. Первые признаки подготовки извержения проявились в апреле 2008 года в виде аномальных поверхностных деформации [Grapethin et al., 2013]. Первая сейсмическая активизация наблюдалась в конце сентября в виде слабого вулканического дрожания, глубокие длиннопериодные землетрясения появились в декабре 2008 года [Bull, Buurman, 2013; Power et al., 2013]. К маю 2008 года очаг магмы предположительно локализовался на глубинах 9–11 км. Извержение началось 23 марта 2009 года – после интенсивного сейсмического роя произошел магматический взрыв, сменившийся излиянием лавы [Bull, Buurman, 2013]. Далее период с декабря 2008 года до 24 марта 2009 года будем называть предэруптивной фазой. Период интрузии в [Grapethin et al., 2013] идентифицируют с апреля 2008-го года до начала извержения.

Структура вулкана была детально изучена методом сейсмической томографии в работе [Kasatkina et al., 2014]. Исследователи выявили под вершиной вулкана область высоких скоростей P -волн, что указывает на наличие жесткого каркаса из консолидированных пород. Примечательно, что если до извержения под вулканом наблюдалась зона повышенных скоростей S -волн, то после него она сменилась зоной низких значений V_s . Авторы интерпретируют это как результат насыщения геологической среды жидким расплавом по принципу «губки».

В рамках данного исследования будет использоваться каталог вулканической обсерватории Аляски (AVO) [Power et al., 2019]. Этот каталог посвящен именно вулканической сейсмичности и представляет собой отдельные по пространству облака землетрясений, приуроченных к тому или иному вулкану, зарегистрированные станциями, установленными вокруг них. Каталог включает всего включает более 121 тысячи событий за период 1989–2018 гг. Сеть вулканической обсерватории Аляски имеет около 217 станций, которые служат для мониторинга 32 вулканов [Konstantinou, 2022].

Для анализа сейсмичности вулкана Редаут был выделен участок с координатами от 60.4 до 60.6 градусов по широте, от -152.85 до -152.65 градусов по долготе, который охватывает все события, произошедшие под вулканом в предэруптивной фазе. Из

обработки были исключены глубокофокусные толчки (7 событий глубже 30 км), таким образом, основная часть выборки сосредоточена в верхних 15 км. Временная динамика сейсмичности в предэруптивный период (рис. 1) демонстрирует два отчетливых пика активности, между которыми наблюдается период относительного сейсмического покоя. Второй рой непосредственно предшествовал началу извержения. События до 26 января 2009 в выбранном участке практически отсутствуют. Эти же рои по анализу активности выделяют в работе [Buurman et al., 2013].

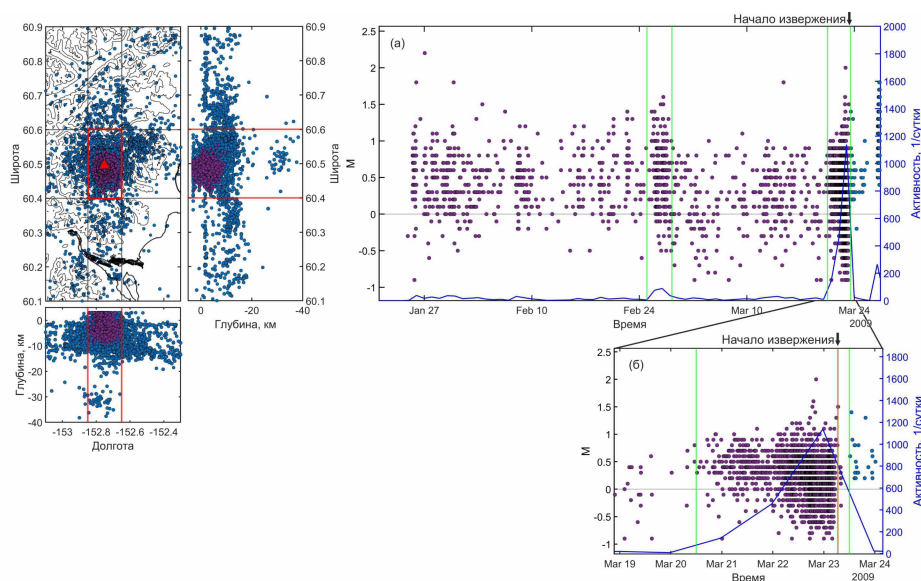


Рисунок 1 – распределение событий интрузии вулкана Редаут во времени и пространстве. Синие кружки – события каталога за все время, фиолетовые – за период интрузии, красным прямоугольником показана рассматриваемая область. На распределении событий во времени синей линией показано число событий в сутки, вертикальными зелеными линиями выделены два роя событий, (а) – показан весь период интрузии, (б) – приближен период второго роя

На рисунке 2 представлены графики повторяемости для двух роев, а их параметры показаны в таблице 1. Представительная магнитуда оценивалась на уровне значимости $\alpha = 0.05$. Погрешность *b-value* рассчитывалась по 1000 итераций бутстреп.

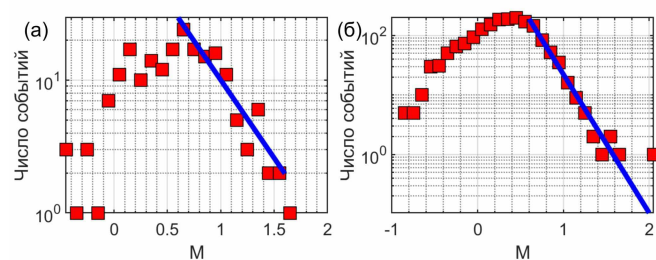


Рисунок 2 – графики повторяемости для двух роев вулкана Редаут, (а) – первый рой, (б) – второй рой, синей линией показана полученная аппроксимация наклона распределения с $M_c = 0.6$

Таблица 1. Параметры двух роев периода интрузии вулкана Редаут

Период	N	M_c	N_c	$b\text{-value}$	M_{max}	$\bar{M}$	$M_{0\ skew}$	N_{skew}
2009.02.25 – 2009.02.28 6:00	198	0.6/ 0.9	102/ 46	1.31 ± 0.35 / 1.55 ± 0.36	1.6/ 1.6	0.86/ 1.08	-0.10	-0.94
2009.03.20 12:00 – 2009.03.23 12:00	1735	0.6	352	2.32 ± 0.21	2	0.74	-1.08	-0.65

В таблице 1 в первом столбце – даты начала и конца роев, N – число событий в рое, M_c – представительная магнитуда, N_c – число событий выше порога представительности, $b\text{-value}$ – наклон графика повторяемости, M_{max} – максимальная магнитуда, $\bar{M}$ – средняя магнитуда, $M_{0\ skew}$ – коэффициент асимметрии высвобождения сейсмического момента, N_{skew} – коэффициент асимметрии профиля активности. Для дополнительной проверки для первого роя была также повышена представительная магнитуда до 0.9, основные параметры с таким порогом представлены в таблице через слеш.

Для расчета коэффициента асимметрии энергии роев необходимо рассчитать сейсмический момент событий. Для региона Южной Аляски, куда входят вулканы Редаут и Августина, существует эмпирическая связь локальной магнитуды и сейсмического момента, представленная в [Dutta et al., 2003]:

$$\log M_o = (1.275 \pm 0.06)M_L + (10.00 \pm 0.26),$$

где M_o – сейсмический момент в Н*м. Однако она получена для диапазона событий от 3 до 6.3 и может быть неточной для слабых вулканических событий, тем не менее это,

вероятно, лучшая региональная оценка, которую можно получить без дополнительных расчетов.

3.1.2 Анализ сейсмичности

Рассмотрим подробнее каждый рой. На рисунке 3 представлен временной профиль первого роя. Сверху показан суммарный высвобожденный сейсмический момент в интервале 12 часов.

Параллельно приведены распределение числа событий во временных интервалах и распределение магнитуд событий во времени. На нижнем графике также показаны вариации представительной магнитуды во времени. Они были рассчитаны в скользящем по времени окне шириной 100 событий и сдвигом 25 событий с уровнем значимости 0.15. В основном значение совпадает со средним порогом 0.6, однако поднимается до 0.8 в центре роя. Это может быть связано с тем, что из-за затишья в этом окне набираются события из двух разных пиков, и это скорее является артефактом, чем реальным падением чувствительности, поэтому средняя оценка 0.6 для всего роя кажется приемлемой.

Видно, что этот рой представляет собой два всплеска событий симметричных относительно периода затишья между ними.

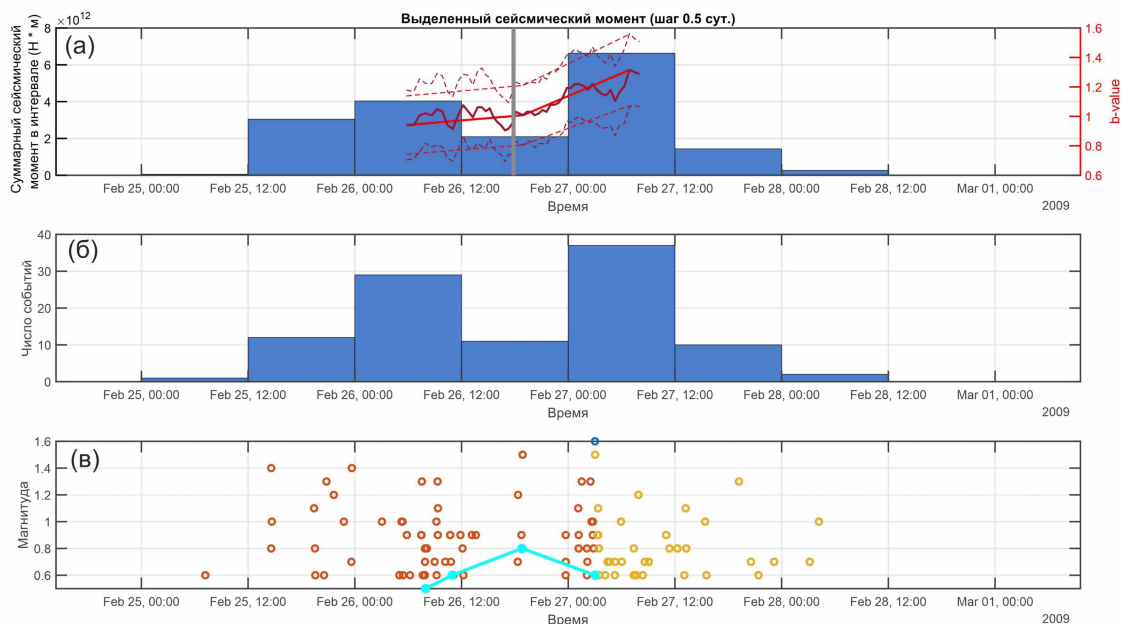


Рисунок 3 – графики для первого роя интрузии вулкана Редаут с шагом по времени 12 часов: (а) – график высвобождения суммарной условной энергии во временном окне; (б) – графики числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, синяя кружок – сильнейшее событие роя, оранжевые кружки – события до сильнейшего,

желтые – события после сильнейшего. На графике (а) красной линией показаны вариации *b-value* в скользящем по времени окне шириной 100 событий и сдвигом 25 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу, бордовой линией показаны вариации *b-value* в скользящем по времени окне шириной 50 событий и сдвигом 1 событие, пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу. На графиках (в) бирюзовой линией показаны вариации *M_c* во времени

Энергетически эти два всплеска сбалансированы, давая близкий к 0 коэффициент энергетической асимметрии -0.10. Коэффициент асимметрии профиля активности имеет большое отрицательное значение -0.94. Коэффициент асимметрии Пирсона в случае бимодальной формы не в полной мере отражает действительность. В целом этот рой нельзя назвать истинно отрицательно асимметричным из-за разницы в поведении коэффициентов: энергетический показывает почти полную симметрию, а коэффициент профиля активности сильную отрицательную асимметрию.

Наличие таких похожих симметричных всплесков наталкивает на мысль, что это два отдельных вулканических роя. Однако против этого говорит тот факт, что до и после этого всплеска активности наблюдаются довольно длительные периоды затишья, то есть если это и есть два отдельных роя, то они по какой-то причине произошли очень близко к друг другу во времени, что вряд ли является случайностью. Значимых вариаций *b-value* для этого роя не наблюдается, тут стоит обратить внимание на первую и последнюю точки в вариациях с шириной окна 50 событий, так как только эти окна не перекрываются из-за малого числа событий в рое. Значения держатся на среднем уровне для этого роя.

Перейдем к рассмотрению второго роя. Его временной профиль представлен на рисунке 4. Видно, что магнитуды событий постепенно растут от начала роя, достигая кульминации ближе к концу в виде группы сильнейших событий с максимальным значением *M_L* = 2, назовем это событие основным. Причем перед этим самым сильным событием можно увидеть нарастание энергии роя, а после него резкий спад. Еще два сравнимых по силе события произошли в самом конце роя, однако стоит иметь в виду, что 23 марта началось извержение, поэтому эти события могут быть связаны уже с ним. Таким образом, четыре из шести событий, следующих по силе после основного, группируются в нескольких часах перед ним. С ростом максимальных магнитуд событий увеличивается также их активность, в целом можно сказать, что этого для роя наблюдается длительная стадия активизации, а его кульминация находится ближе к концу. Это отражается в

значениях асимметрии: по энергии сильная отрицательная асимметрия -1.08 и также отрицательная асимметрия по числу событий -0.65.

Вариации представительной магнитуды рассчитаны в скользящем по времени окне с шириной 500 событий и сдвигом 50 событий с уровнем значимости 0.05. Значение в основном не выше среднего порога 0.6, но локально поднимается до 0.7 в начале роя. Ввиду высокой чувствительности оценок *b-value* к выбору порога, для расчета временных вариаций *b* установим порог $M_c = 0.7$. Для расчета прочих статистик роя будем использовать среднюю оценку 0.6. Вариации *b-value* представлены на рисунке 4 с различными конфигурациями скользящих по времени окон. Использовались ширины окон 100 и 50 событий, причем последний случай представлен в двух вариантах: со сдвигом на 1 событие, чтобы показать устойчивость тренда к добавлению одиночных событий, и со сдвигом 50, то есть без перекрытия, чтобы продемонстрировать, что значения меняются в серии независимых выборок. Относительно маленькое окно в 50 событий используется с целью увеличения разрешающей способности, поскольку аномалия *b-value*, судя по всему относительно коротка во времени и более широкое окно сильно сглаживает её. Общий тренд сохраняется от конфигурации к конфигурации: падение от аномально высоких значений в начале роя до умеренно повышенных к моменту кульминации.

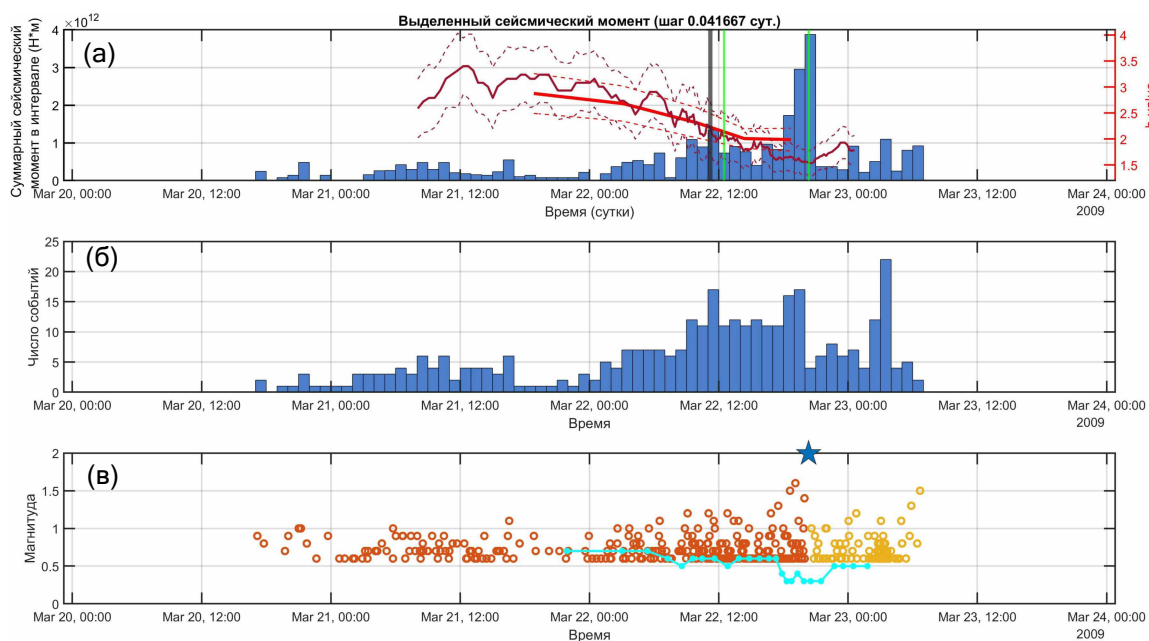


Рисунок 4 – графики для второго роя интрузии вулкана Редаут с разным шагом по времени 1 час: (а) – график высвобождения суммарной условной энергии во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, синяя звезда – сильнейшее событие роя, оранжевые кружки – события до

сильнейшего, желтые – события после сильнейшего. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 100 событий и сдвигом 25 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу, бордовой линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 50 событий и сдвигом 1 событие, фиолетовая линия – вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 50 событий и сдвигом 50 событие, пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу. На графике (в) бирюзовой линией показаны вариации M_c во времени

Чтобы убедиться, что наблюдаемое поведение не артефакт, вызванный, например, отклонением графика повторяемости от линейной формы, дополнительно построим графики повторяемости для периода, где значение аномально высокое и для периода, где происходит спад. На рисунке 4 первому периоду соответствует интервал от начала роя до первой вертикальной зеленой линии – это интервал до момента за 8 часов от основного события. Второму периоду соответствует интервал между вертикальными зелеными линиями – 8 часов перед сильнейшим событием, не включая его. Для первого интервала получено значение $b = 2.74 \pm 0.31$, а для второго $b = 1.68 \pm 0.29$, оценки проведены с одинаковым порогом представительности 0.7. В первом случае значение получено по 115 событиям, во втором по 51 событию. Графики повторяемости для этих двух периодов представлены на рисунке 5, они оба имеют выраженную линейную часть. Проверим статистическую значимость этих различий с помощью Z-теста: $Z = \frac{|2.74 - 1.68|}{\sqrt{0.31^2 + 0.29^2}} = 2.50 > 1.96$, различие значимо на уровне $p < 0.05$.

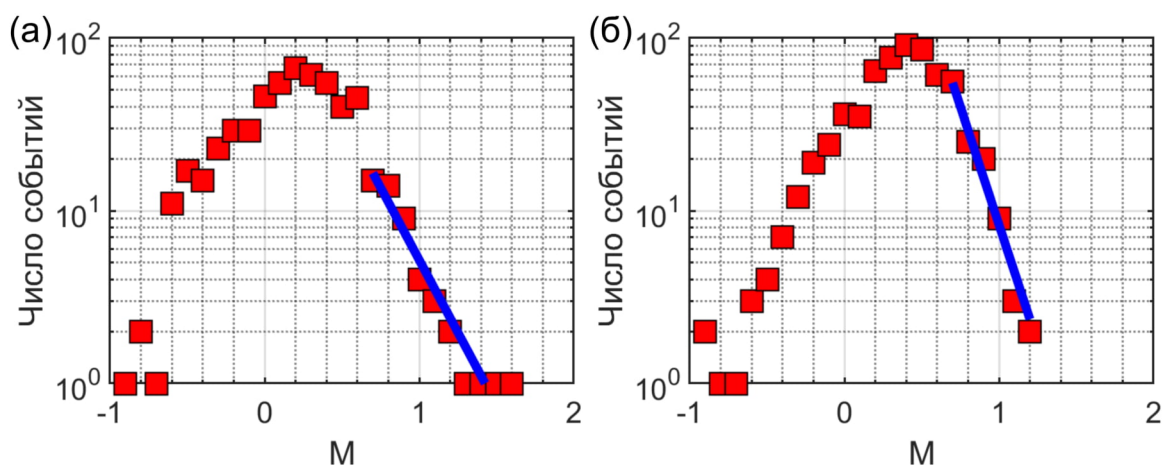


Рисунок 5 – графики повторяемости для событий прямо перед основным толчком (за 8 часов до него) (а) и в начале роя (б)

Аномально высокое значение до 2.74 может вызвать сомнения, как было описано в главе 2. Некоторые исследователи предполагают, что такое значение является просто артефактом, вызванным узким диапазоном магнитуд, по которому оно оценено. Однако отметим, что для всего роя в среднем получено также аномально высокое значение 2.32, которое уже рассчитано по широкому диапазону и по большому числу событий (352 представительных события).

На рисунке 6 показано более детальное представление событий фазы активизации этого роя. Явной миграции событий не наблюдается, они все произошли в достаточно ограниченной области пространства.

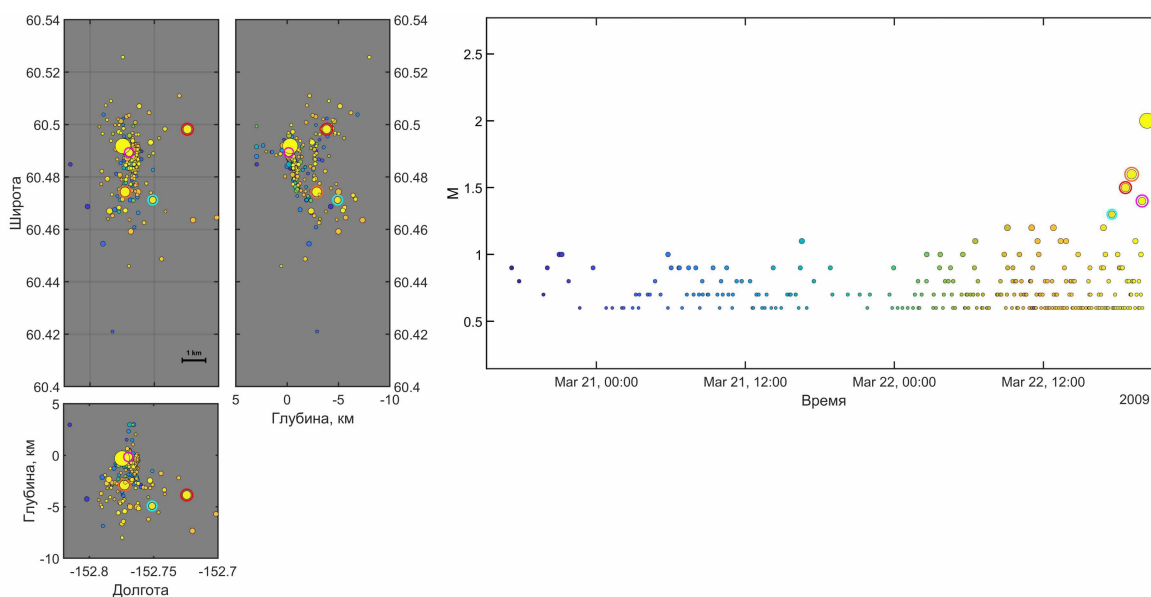


Рисунок 6 – графики распределения событий второго роя интрузии вулкана Редаут в пространстве и времени до момента сильнейшего события, дополнительно разноцветными кругами (бирюзовый, красный, оранжевый, розовый) обведены 4 сильнейших события роя, помимо основного, произошедших перед ним

В контексте изучения роев интересным может быть проанализировать как нарастает интенсивность роя на фазе активизации. Для афтершоковых серий хорошо известен закон Омори, описывающий спад активности афтершоков во времени:

$$n = \frac{K}{(c+t)^p},$$

где n – число событий в единицу времени, t – время относительно основного события, K , c , p – параметры распределения.

На рисунке 7 представлено распределение числа событий в единицу времени по мере приближения к основному событию для исследуемого роя.

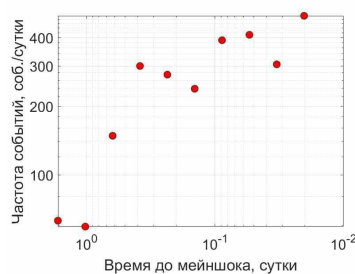


Рисунок 7 – изменение числа событий в единицу времени по мере приближения к основному событию для второго роя интрузии вулкана Редаут

Это распределение действительно возможно аппроксимировать законом Омори, оценка по методу [Holschneider et al., 2012] дает значения: $c = 0.98$ суток, $p = 2.17$. Однако, однозначного вывода, что это единственная возможна аппроксимация, сделать нельзя.

Также был проведен анализ временного группирования событий для двух стадий роя: в начале и перед кульминацией. Для этого были построены распределения расстояний между последовательными событиями по времени (Рис. 8). Принцип работы такой методики подробно описан в [Греков, Шебалин, 2025]. Для второго периода использовался порог $M_c = 0.5$, так как в этом интервале содержится 548 событий и оценки представительной магнитуды получаются 0.4, 0.6, 0.6 с уровнями значимости 0.05, 0.10 и 0.15 соответственно. Построение распределений времен до следующего события менее чувствительно к выбору M_c , чем оценка b -value, поэтому выбрано среднее значение между двумя полученными оценками, с целью сохранения большей выборки.

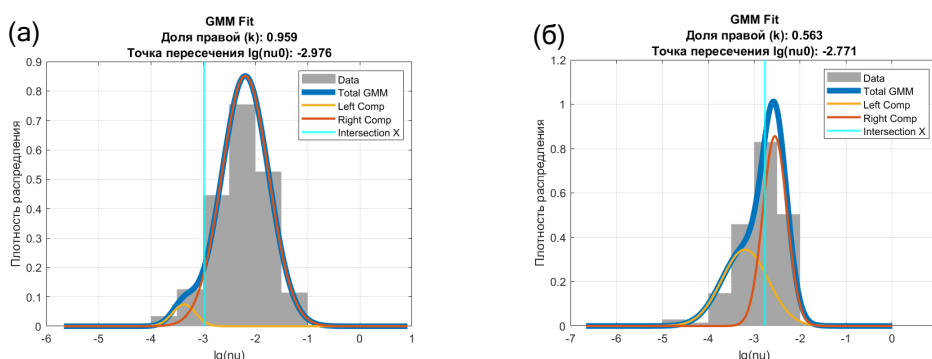


Рисунок 8 – (а) – распределение для периода с 20.03.2009 12:00:00 по 22.03.2009 12:29:59 в начале роя, (б) – в период с 22.03.2009 12:29:59 по 22.03.2009 20:21:19 в период кульминации роя перед сильнейшим событием с представительной магнитудой 0.5

Для выделения мод распределение аппроксимировалась бимодальной гауссовой формой. В обоих периодах положения мод, примерно, совпадают: положение фоновой моды -2.2 и -2.6, а положение моды кластеризованных событий -3.4 и -3.2, но при этом доля фоновой моды меняется с 0.96 до 0.56, что говорит об увеличении степени кластеризации в период кульминации.

Особенности данного сейсмического роя также рассматривались в работе [Buurman et al., 2013], где авторы применили метод кластеризации волновых форм. В результате анализа было выделено три семейства схожих сигналов. Первые две группы характеризуются отчетливыми вступлениями *P*- и *S*-волн с доминирующими частотами около 5 Гц: одна из них фиксировалась на начальном этапе активизации, а вторая – в середине периода, вплоть до реализации наиболее мощного сейсмического события. Третью группу составили длиннопериодные (LP) события, возникшие синхронно с главным толчком и продолжавшиеся после него. Стоит отметить, что амплитуда LP-событий существенно уступает по величине двум первым группам. По этой причине они, вероятно, находятся ниже установленного в текущем исследовании порога представительности и не оказывают прямого влияния на расчетные значения *b-value*.

Такая последовательность событий позволяет реконструировать динамику процесса: под воздействием избыточного давления магматический расплав спровоцировал разрушение или смещение блоков горных пород, сформировав каналы для продвижения к поверхности. Последующее течение магмы по этим каналам стало источником длиннопериодных сигналов, что согласуется с общепринятыми представлениями о природе LP-событий [Гордеев, 2007]. Предложенная интерпретация во многом коррелирует с выводами, представленными в работе [Buurman et al., 2013].

Первый же рой согласно [Buurman et al., 2013] представлен в основном событиями с нечеткими вступлениями *P*-волн и низким частотным спектром 1-7 Гц, что не характерно для вулкано-тектонических землетрясений, но и к обычному длиннопериодному типу авторы их не относят. [Buurman et al., 2013] предполагают, что он вызван образованием трещин под давлением газа. Можно предположить, что различия в механизмах инициации двух роев и приводят к различиям в их форме и значениях параметра наклона графика повторяемости.

Резюме

Редаут это стратовулкан, находящийся в субдукционной зоне Аляски. Два вулканических роя периода интрузии перед извержением вулкана Редаут отличаются как по форме, так и по поведению и значениям *b-value*.

В первом рое в вариациях *b-value* меняется в диапазоне от 0.92 до 1.32 в окнах по 50 событий. Во втором рое от 1.55 до 3.40 в окнах по 50 событий.

Первый рой более симметричен во времени, имеет гораздо меньше событий и бимодальную форму, то есть состоит из двух равноценных всплесков активности, разделенных паузой, сильнейшее событие роя мало отстоит по магнитуде от прочих.

Второй рой, произошедший прямо перед началом извержения, имеет довольно хорошо выраженное сильнейшее событие – основное событие. Энергия и число событий постепенно увеличиваются от начала роя к основному событию, а большая часть сильнейших событий группируется в нескольких часах перед ним. Средний наклон графика повторяемости имеет повышенное значение в начале роя ($b = 2.74 \pm 0.31$) и падает перед сильнейшим событием ($b = 1.68 \pm 0.29$). Стадия активизации роя преобладает над стадией спада по длительности. Извержение началось со взрыва почти одновременно с кульминацией этого роя.

О падении *b-value* перед этим извержением уже сообщалось в работе [Konstantinou, 2022], однако там нигде в вариациях не получено значений более 1.20, вероятно, из-за широкого усреднения (окна более 1000 событий) и требования к ширине магнитудного диапазона не менее 2 единиц. Отметим также, что на графике вариаций M_c во времени для вулкана Редаут в работе [Konstantinou, 2022] значения нигде не превышают 0.5 и лежат ближе к 0, чем к 1. При этом в нашей работе для второго роя получено значение M_c не менее 0.6, хотя в обеих работах использовался один и тот же каталог для этого периода. Поскольку в [Konstantinou, 2022] не приводятся графики повторяемости, судить о причинах такого различия затруднительно.

В отличие от работы [Konstantinou, 2022] мы связываем характерный паттерн временной эволюции параметра *b* с характерным временным профилем роя.

Второй рой периода интрузии вулкана Редаут является одним из ключевых объектов в данной работе, он показывает, что встречающееся иногда на больших масштабах (месяцы) закономерное падение наклона графика повторяемости от экстремально высокого значения может проявляться и на малых временных интервалах (в данном случае порядка 3 суток). Он также является первым в данной работе свидетельством, что экстремально высокое значение характерно именно для фазы активизации такого роя. Появление длиннопериодных событий, которые часто связывают с колебаниями магматических расплавов, а также начало извержения сразу после энергетической кульминации роя, подводят к мысли, что такой рой связан с финальным прорывом магмы к поверхности и формированием магматического канала.

3.2 Вулкан Августина

3.2.1 Обзор

Августина является стратовулканом, образующим одноименный остров, все известные извержения этого вулкана происходили в центральном конусе вулкана [Koulakov et al., 2023]. Он является частью вулканической дуги, связанной с Аляска-Алеутской субдукционной зоной [Fisher et al., 2010], вулканизм в этой части дуги вызван погружением тихоокеанской плиты под Северо-Американскую [Larsen et al, 2010]. Предполагается, что вулкан имеет неглубокую магматическую камеру в коре [Koulakov et al., 2023].

В томографическом исследовании строения вулкана [Koulakov et al., 2023] авторы обнаружили, что в вершине вулканической постройки присутствует аномалия с повышенными V_p скоростями и пониженными V_s , что может говорить о том, что это область сложена изверженными породами, но при этом раздроблена и насыщена флюидами. Также под вулканом обнаружена вертикальная аномалия повышенных V_p скоростей с нейтральными или сниженными V_s скоростями, которая протягивается до глубин более 1.5 км. Такую аномалию обычно связывают с вертикальным магматическим каналом (Рис. 1).

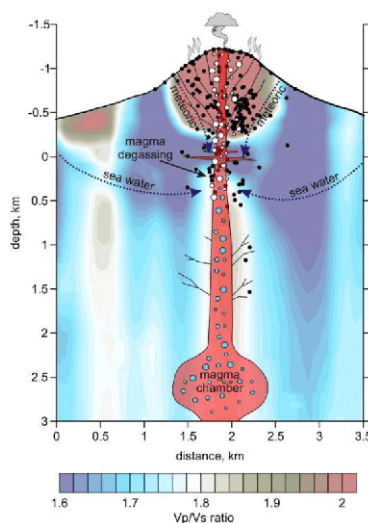


Рисунок 1 – схематичное изображение строения вулкана Августина из работы [Koulakov et al., 2023]

Извержение вулкана началось 11 января 2006-го года после стадии сейсмической активизации длиной 8.5 месяцев [Buurman, West, 2010]. Началом активизации считают дату 30 апреля 2005-го года [Jacobs, McNutt, 2010], она ознаменовала начало длинного вулканического роя землетрясений, который завершился только 10 января 2006-го года. Затем произошел еще один короткий рой длиной 13 часов, сразу после которого началось

извержение. Извержение проходило несколько стадий активности, начавшись со взрывов и продолжившись эруптивной фазой после 28 января. Затем ей на смену пришла эффузивная фаза, а завершилось извержение экструзивной фазой, длившейся с 3 по 16 марта [Вуштан, West, 2010].

Анализ поверхностных деформаций проводился в работе [Cervelli et al, 2006]. Примерно, с начала длинного роя до 17 ноября 2005-го года наблюдались радиальные деформации в стороны от вулканической постройки вместе с одновременным её подъемом. Это связывают с процессом «надувания» магматической камеры под вулканом. После 17 ноября характер деформаций изменился, и период с этой даты до начала извержения авторы связывают с процессом интрузии [Cervelli et al, 2006]. Но характер сейсмичности меняется, примерно, с 21 ноября.

Здесь так же, как и для вулкана Редаут используются данные каталога вулканической обсерватории Аляски (AVO) [Power et al., 2019]. Далее мы будем рассматривать участок вокруг вулкана со следующими границами: от -153.48 до -153.39 градусов по долготе и от 59.34 до 59.38 градусов по широте, число событий в каталоге в этом участке за всё время: 6446. Основная часть событий сконцентрирована возле поверхности (глубины до 5 км). Мы будем рассматривать период с 30 апреля до 11 января как предэруптивную фазу извержения (Рис. 2).

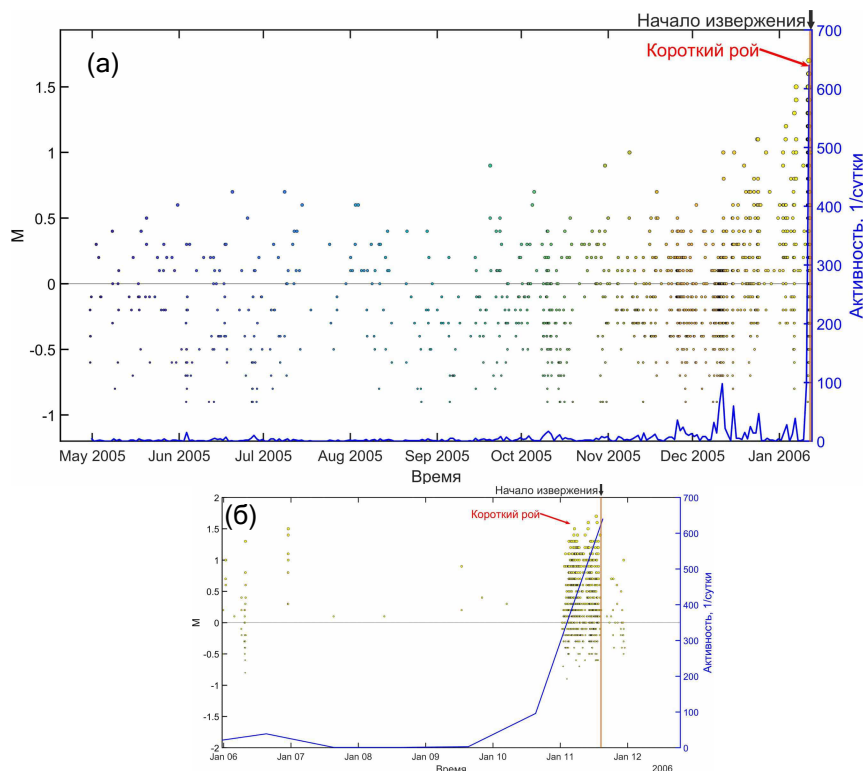
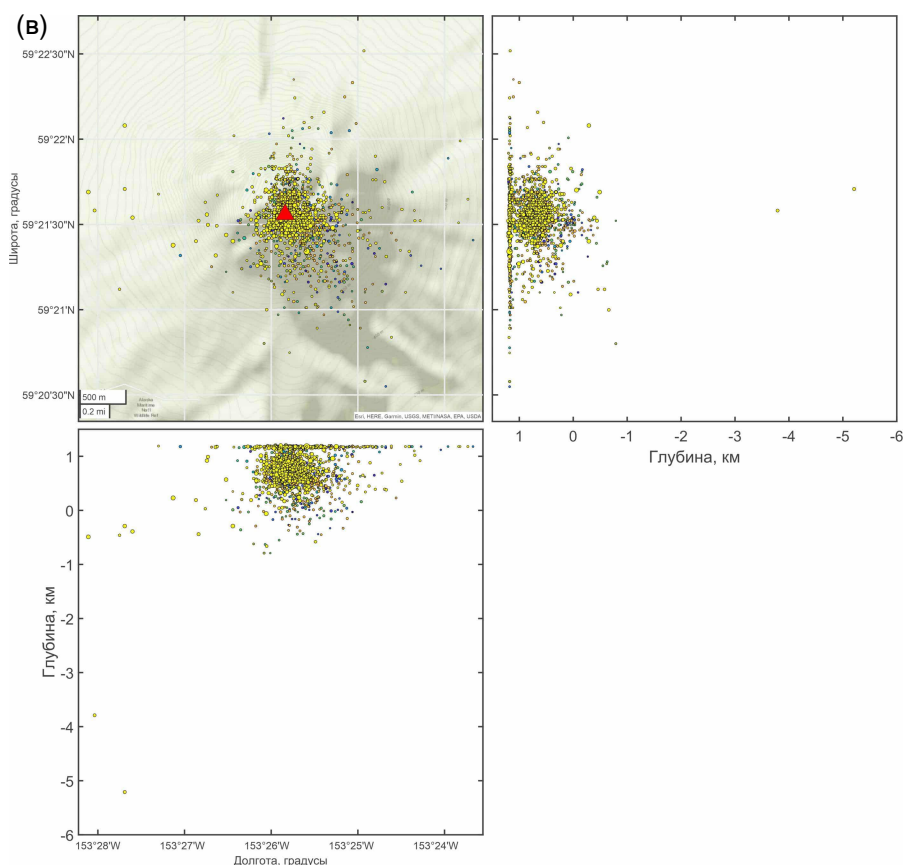


Рисунок 2 – события предэруптивной фазы в времени (а) и пространстве (в). (б) – приближен участок короткого роя



Продолжение рисунка 2

Анализ сейсмичности этой фазы также уже был проведен в работе [Jacobs, McNutt, 2010]. В том числе авторами были построены вариации *b-value* во времени. Они использовали метод максимальной кривизны (MAXC) для оценки представительной магнитуды и, предположительно, метод Аки [Aki, 1965; Utsu, 1965] для расчета наклона, хотя прямо этого не указано. Вариации *b-value* рассчитывались в окне шириной 100 событий и перекрытием 25 событий, при этом представительная магнитуда оценивалась в каждом окне индивидуально. Такая методика имеет ряд минусов: во-первых, известно, что метод MAXC склонен к занижению оценки при распределениях со «скругленным» пиком (это обсуждалось ранее в главе 2 «Методы»), что и наблюдается, например, на рисунке 3С работы [Jacobs, McNutt, 2010], мы приводим его на рисунке 3(б) ниже; во-вторых, расчет представительной магнитуды в каждом окне при фиксированной по числу событий ширине окна не дает контроля над размером выборки, по которому рассчитывается значение *b-value*, а изменения представительности во времени могут модулировать вариации наклона графика повторяемости. Здесь мы пересчитываем вариации наклона графика повторяемости с помощью другой методики.

В таблице 1 представлены параметры двух роев предэруптивной фазы, полученные нами. Для длинного роя отдельно также рассмотрен период с 2 ноября, примерно, соответствующий периоду интрузии по поверхностным деформациям.

Таблица 1. Параметры двух роев периода интрузии вулкана Августина

Период	N	M_c	N_c	b -value	M_{max}	$\bar{M}$	M_0 skew	N_{skew}
2005.04.30 – 2006.01.07	726	0.2	316	1.67 ± 0.09	1.5	0.41	-2.19	-1.26
2005.11.21 – 2006.01.07	726	0.1	296	1.47 ± 0.09	1.5	0.34	-0.84	0.21
2006.01.11 – 2006.01.12	727	1.1	74	2.45 ± 0.3	2.3	1.23	-0.25	0.93

Обозначения см. таблицу 1 раздела 3.1

3.2.2 Длинный рой

Известно, что длинный рой составлен событиями вулcano-тектонического типа [Power, Lalla, 2010].

Представительная магнитуда оценивалась с уровнем значимости 0.05, получена оценка $M_c = 0.2$ и $b = 1.67 \pm 0.09$ (Рис.3(а)). В работе [Jacobs, McNutt, 2010] для длинного роя дают значения: $M_c = -0.1$ и $b = 1.26 \pm 0.04$ (Рис.3(б)), то есть значительно более низкие значения, это, вероятно, результат использования метода максимальной кривизны для оценки представительной магнитуды. Со значением $M_c = -0.1$ мы как раз получаем b -value $= 1.30 \pm 0.05$.

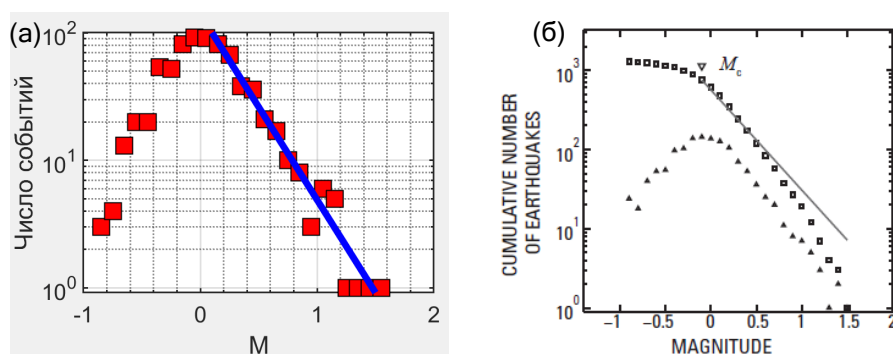


Рисунок 3 – (а) – дифференциальный график повторяемости для длинного роя, (б) – график повторяемости для длинного роя из работы [Jacobs, McNutt, 2010], треугольники – дифференциальный график повторяемости, квадраты – кумулятивный, перевернутым треугольником отмечена представительная магнитуда

Вариации представительной магнитуды оценивались в окне 200 событий и сдвигом 50 событий с уровнем значимости 0.15. Значение в вариациях не превышает величины 0.2. Его и будем использовать как пороговое для длинного роя.

В длинном рое прослеживается тренд постепенного роста числа событий и магнитуд от начала к концу (Рис. 4). Рой длится около 251 суток и почти сразу завершается после самого сильного события, затем, примерно, через 13 часов начинается извержение.

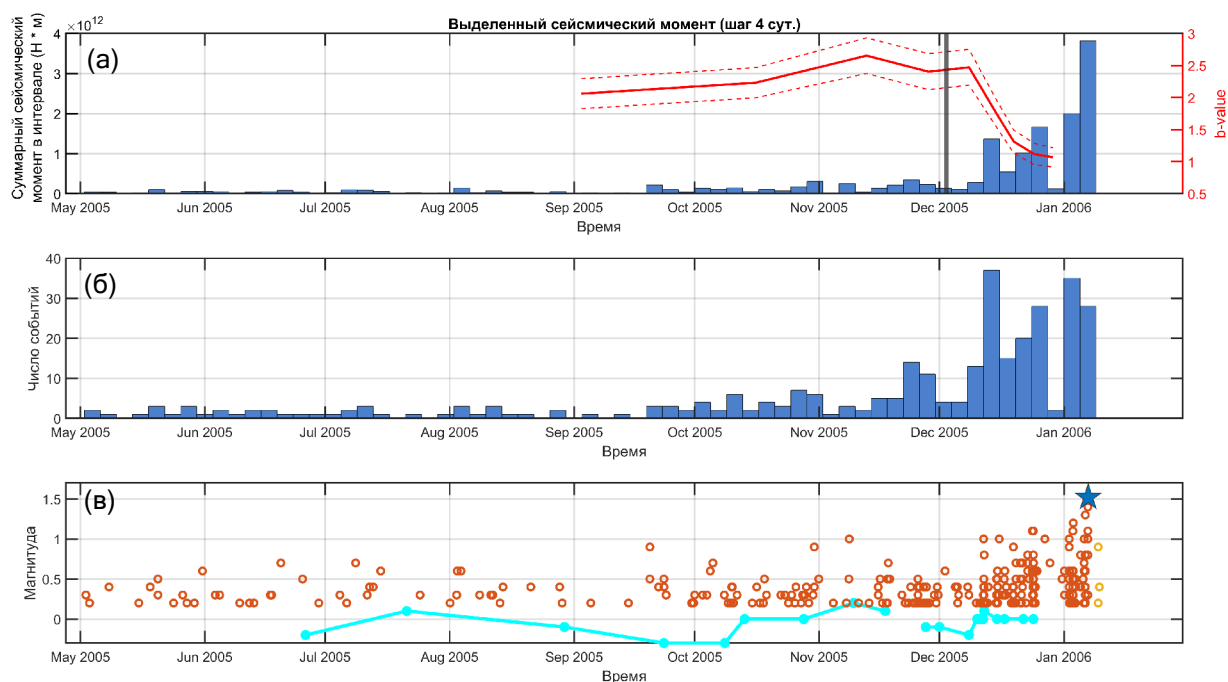


Рисунок 4 – графики для длинного роя предэруптивной фазы вулкана Августина: (а) – график высвобождения суммарного сейсмического момента во временном окне, серая вертикальная линия – время центроида; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, синее – сильнейшее событие, оранжевые кружки – события до сильнейшего события, желтые – события после сильнейшего события. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 100 событий и сдвигом 25 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу; на графике (в) бирюзовой линией показаны вариации M_c

На вариациях b -value видно, что в начальной фазе активизации роя значение держится в экстремально высоком диапазоне от 2.04 до 2.65. Затем резко снижается до значения 1.07 после, примерно, 12 декабря одновременно с кульминацией роя. Рассмотрим графики повторяемости для двух фаз роя: стадии активизации и периода кульминации роя (Рис. 5). Средние значения также подтверждают тренд падения b -value.

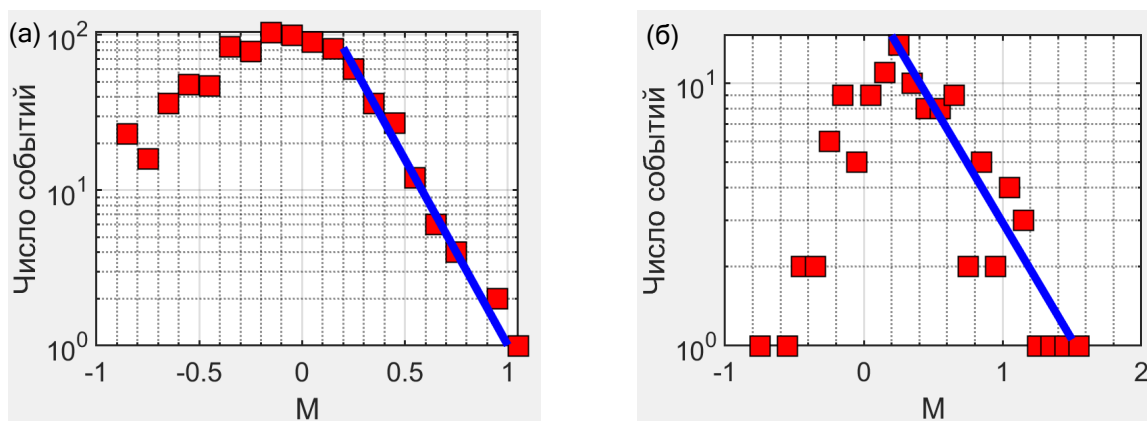


Рисунок 5 – (а) – график повторяемости от 30 апреля до 12 декабря: $b = 2.39 \pm 0.20$ с $M_c = 0.2$ по 148 событиям. (б) – график с 26 декабря до 10 января: $b = 0.89 \pm 0.17$ с $M_c = 0.2$ по 69 событиям

Проверим статистическую значимость различия значений в двух фазах с помощью Z-теста: $Z = \frac{|2.39 - 0.89|}{\sqrt{0.20^2 + 0.17^2}} = 5.71 > 1.96$, различие значимо на уровне $p < 0.05$.

Рассмотрим подробнее период с 21 ноября до конца роя, так как именно для этого периода подтверждено, что он связан с процессом интрузии (Рис.6). На рисунке 6 дополнительно показаны вариации b -value с порогом $M_c = 0.1$, так как при уровне значимости 0.10 значение в вариациях не превышает порога 0.1, а при уровне значимости 0.15 значение 0.2 достигается только в одной точке в конце этого периода.

Паттерн поведения b -value подтверждает тот, что наблюдался на большем временном масштабе.

В работе [Jacobs, McNutt, 2010] в начале роя значения b -value флуктуируют около диапазона 1.20-1.30, имея тренд роста и достигая максимального значения около 2.10 к 10-му декабря, после чего резко падает до значений около 0.8. В целом тренд после 10 декабря совпадает с полученным нами, до 10 декабря разница в том, что в нашем случае значение держится на экстремально высоком уровне на протяжении всего периода от начала роя, а в работе [Jacobs, McNutt, 2010] значения в этой фазе ниже и достигают экстремальных значений только к концу фазы. Это, как уже отмечалось выше, может быть результатом занижения значения из-за использования метода максимальной кривизны для оценки представительной магнитуды.

Стоит отметить, что паттерн роста магнитуд от начала к концу серии событий повторяется несколько раз и на меньших масштабах времени в период интрузии, элементы

с таким паттерном показаны зелеными линиями на рисунке 6. Этот эффект отмечался нами в работах [Grekov et al., 2025; Греков, Шебалин, 2025].

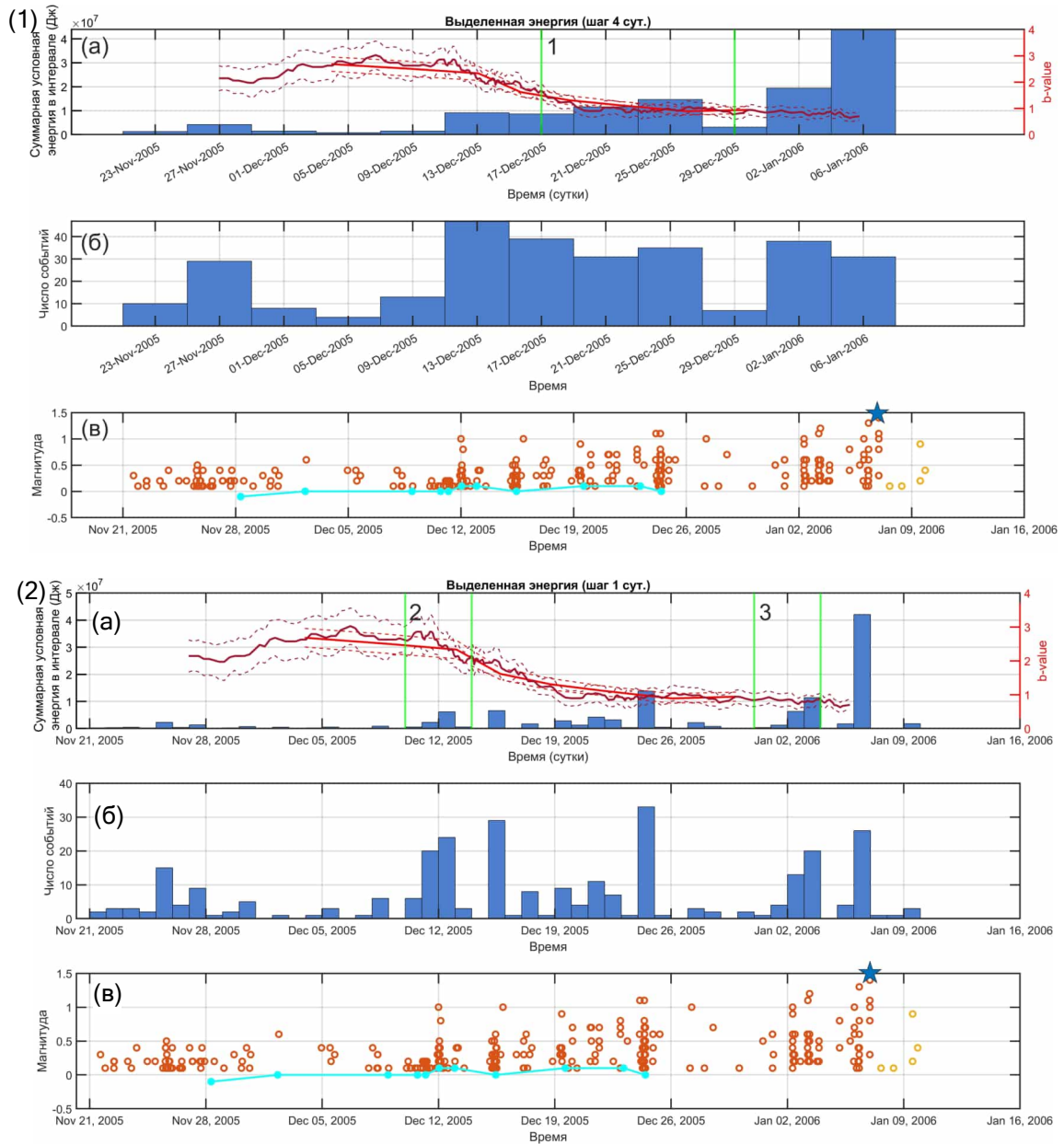


Рисунок 6 – графики для периода интрузии вулкана Августина с разным шагом по времени: (1) – графики с шагом по времени 4 суток; (2) – графики с шагом 1 суток. (а) – графики высвобождения суммарной условной энергии во временном окне; (б) – графики числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, синяя звезда – сильнейшее событие роя, оранжевые кружки – события до сильнейшего, желтые – события после сильнейшего. Зелеными линиями выделены схожие паттерны. На графиках (а) красной линией показаны вариации *b-value* в скользящем по времени окне шириной 100 событий и сдвигом 25 событий, красные пунктирные линии – погрешность оценки, бордовой линией показаны вариации *b-value* в скользящем по

времени окне шириной 50 событий и сдвигом 1 событие, пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу. На графиках (в) бирюзовой линией показаны вариации Ms во времени с уровнем значимости 0.10

На рис. 7 представлены графики изменения числа событий в единицу времени по мере приближения к сильнейшему событию для всего периода интрузии и отдельно для каждого из трех подобных элементов.

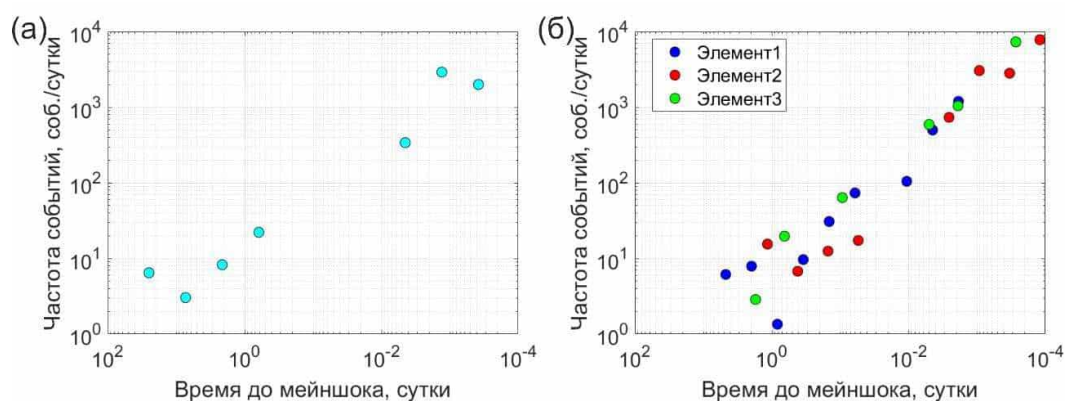


Рисунок 7 – изменение числа событий в единицу времени по мере приближения к основному толчку: (а) – для всего периода интрузии, (б) – для выделенных трех подобных элементов

Результат аппроксимации степенной функцией показан на рис. 8. Полученные параметры: s во всех случаях стремится к нулю, p для всего периода 0.32, для трех элементов: 0.51, 0.63 и 0.71, в том порядке, в котором они представлены на рис. 8.

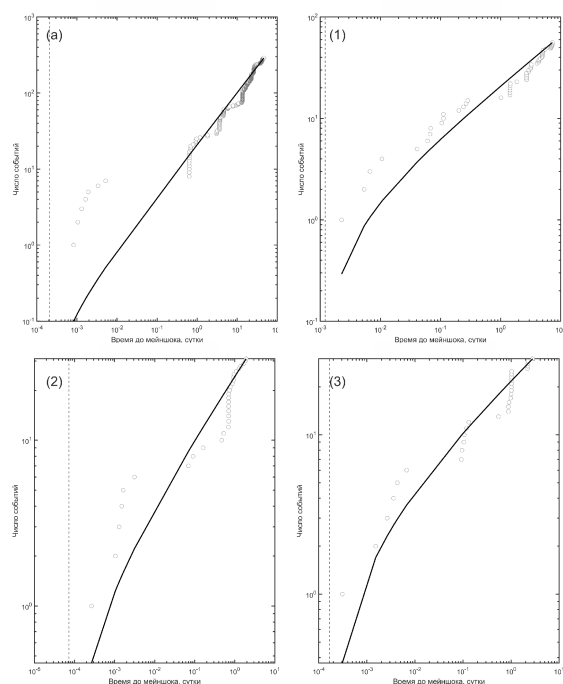


Рисунок 8 – аппроксимация изменения числа событий по мере приближения к основному событию для периода интрузии вулкана Августина. Белыми кружками показано изменение кумулятивного числа событий по мере удаления от основного события во времени, черной линией – результат аппроксимации. (а) – для всего периода интрузии; (1), (2), (3) – для каждого из трех подобных элементов роя, показанных на рис. 6

Также был проведен анализ временного группирования событий для двух стадий роя: в начале и в период кульминации. Для этого были построены распределения расстояний между последовательными событиями по времени (Рис. 9).

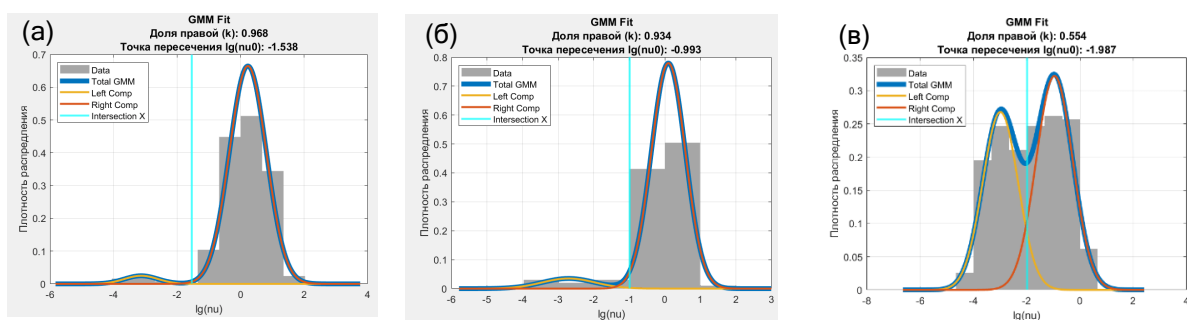


Рисунок 9 – (а) – распределение для периода с 01.01.2001 по 01.01.2003 в период вулканического затишья с представительной магнитудой 0.0, (б) – в период с 30.04.2005 по 21.11.2005 в начале роя с представительной магнитудой 0.1, (в) – в период с 21.11.2005 по 10.01.2006 в период кульминации роя с представительной магнитудой 0.1

Во всех периодах положения мод, примерно, совпадают: положение фоновой моды 0.2, 0.1 и -1, а положение моды кластеризованных событий -3.1, -2.8 и -3.0, но доля фоновой моды меняется с 0.96 и 0.93 до 0.55. В период кульминации фоновые события становятся немного ближе друг к другу. Интересно, что на вулкане постоянно присутствует мода близких событий в районе диапазона (-4; -2), но в период кульминации роя она резко активизируется, что свидетельствует об увеличении степени временной кластеризации в период кульминации. К таким же выводам мы пришли в работах [Grekov et al., 2025; Греков, Шебалин, 2025] при исследовании кластеризации сейсмичности этого периода.

3.2.3 Короткий рой

График повторяемости короткого роя имеет нестандартную форму с двумя модами (Рис. 10). Представительная магнитуда оценивалась с уровнем значимости 0.05, получены значения $M_c = 1.1$ и $b = 2.45 \pm 0.30$. В работе [Jacobs, McNutt, 2010] дают значения $M_c = 0.1$ и $b = 0.78 \pm 0.02$, так как метод максимальной кривизны определяет представительную магнитуду, как вершину левой моды распределения.

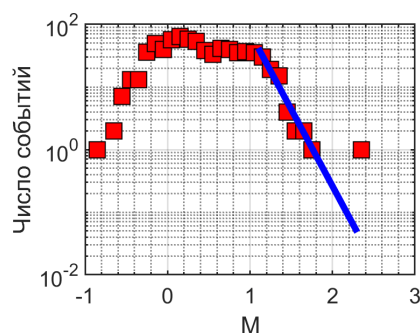


Рисунок 10 – график повторяемости для короткого роя

Сами авторы в [Jacobs, McNutt, 2010] отмечают, что такая оценка является результатом аномальной формы распределения этого роя, там же предложена гипотеза, которая объясняет это явление. Согласно их выводам, короткий рой состоял из двух статистически различных популяций землетрясений, происходивших одновременно: обычных высокочастотных событий и специфических землетрясений, имеющих сверх низкочастотную компоненту (VLP) с периодом более 20 секунд. Авторы интерпретируют появление этой VLP-составляющей как признак формирования новых трещин в массиве, а не простого скольжения по уже существующим разломам. Поскольку разрушение цельной породы требует значительно больше энергии, события с VLP-энергией отличались более высокими магнитудами ($M \geq 1.0$). Наложение этой группы мощных событий на общую статистику создало «излом» на графике распределения и привело к рекордно низкому значению b -value, что фактически стало индикатором финального прорыва магмы к

поверхности [Jacobs, McNutt, 2010]. Авторы считают, что события без этой компоненты являются продолжением процесса, вызвавшего длинный рой. Отметим, что паттерн роста максимальных магнитуд событий можно проследить и в коротком рое в продолжение длинному.

Тем не менее из-за примеси большого числа аномальных событий мы исключим этот короткий рой из дальнейшего анализа значений наклона графика повторяемости.

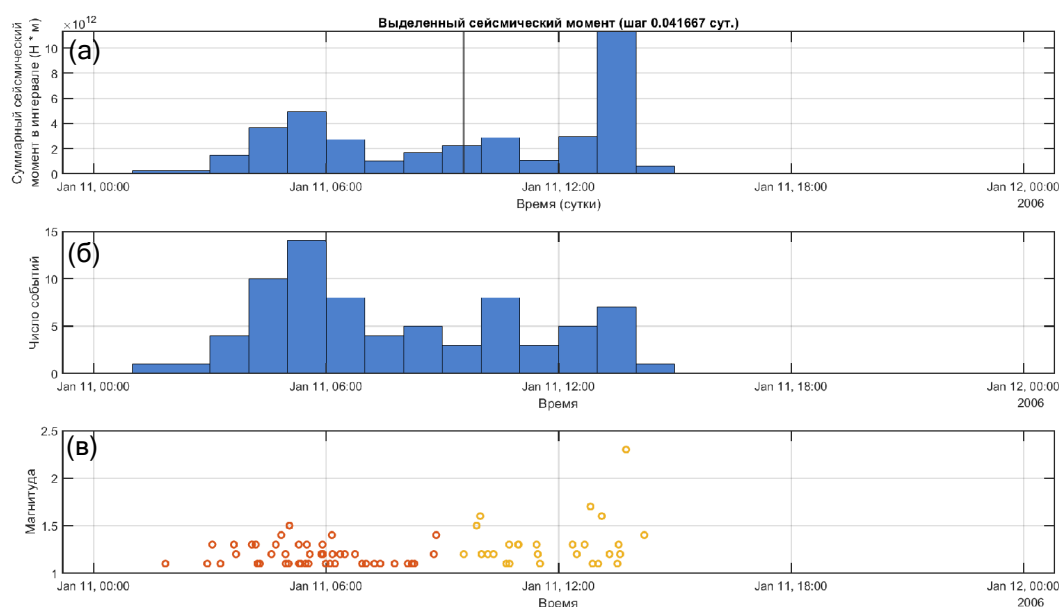


Рисунок 11 – графики для короткого роя предэруптивной фазы вулкана Августина: (а) – график высвобождения суммарного сейсмического момента во временном окне, вертикальная серая линия – время центроида; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, оранжевые кружки – события до времени центроида, желтые – события после времени центроида

Резюме

Августина – это стратовулкан дуги, связанной с Аляска-Алеутской субдукционной зоной, вулканизм в этой части дуги вызван погружением тихоокеанской плиты под Северо-Американскую. По томографическим данным предполагается, что под вулканом находится вертикальный магматический канал.

Сейсмическая активизация наблюдалась задолго до извержения 2006-го года (за, примерно, 255 суток), выражаясь в длинном вулканическом рое, выделенном в работе [Jacobs, McNutt, 2010]. После завершения этого роя произошел еще один короткий рой (длительностью несколько часов), сразу после которого началось извержение.

Длинный рой обладает четким паттерном роста максимальных магнитуд и числа событий по мере приближения к извержению. Последнюю фазу роя, примерно, за 50 суток до извержения, достоверно связывают с процессом внедрения дайки по данным поверхностных деформаций. Период до этого сопровождался надуванием вулканической постройки.

Мы пересчитали вариации *b-value* для этих роев более современными методами, так как значения в оригинальной работе [Jacobs, McNutt, 2010] могли быть занижены использованием метода максимальной кривизны для оценки представительной магнитуды. В работе [Jacobs, McNutt, 2010] авторы сообщают, что в начале роя значение *b* около 1.20-1.30, имея тренд роста и достигая максимального значения около 2.10 к 10-му декабря, после чего значение резко падает до величины около 0.8. Мы подтверждаем тренд падения в конце роя, однако по нашим расчетам значение держится на экстремально высоком уровне (от 2.04 до 2.65) на протяжении всего начала роя. Падение *b-value* совпадает с периодом кульминации роя. Значения в вариациях меняются от 2.65 до 1.07.

График повторяемости короткого роя имеет аномальную «двугорбую» форму из-за чего достоверный расчет наклона графика повторяемости там невозможен, поэтому для него вариации *b-value* не оценивались. В работе [Jacobs, McNutt, 2010] такая форма объясняется наличием двух различных групп событий, правая мода графика создается событиями, имеющими сверх длиннопериодную компоненту (VLP) в сигнале. Они отмечают, что остальные события короткого роя совпадают по параметрам с событиями длинного роя, предполагая, что они вызваны тем же продолжающимся процессом. Это также подтверждается по тренду роста максимальной магнитуды событий.

Длинный рой вулкана Августина является примером реализации тех же закономерностей, что и в случае второго роя вулкана Редаут, только на большем временном масштабе. Он также позволяет связать фазы такого роя с характером поверхностных деформаций и стадиями подготовки извержения: стадия активизации сопровождается инфляцией вулканической постройки, вероятно, вызванной повышением давления в магматической камере, а в фазу кульминации характер деформаций меняется и говорит о начале процесса интрузии. Идея о значительном различии в режимах сейсмичности на стадиях активизации и кульминации этого длинного роя выдвигалась нами в [Grekov et al., 2025; Греков, Шебалин, 2025]. Там же сделано и еще одно важное наблюдение: в период кульминации сейсмичность организуется во самоподобные серии событий, в каждой из которых прослеживается тренд роста максимальной магнитуды событий и затишье после завершения серии.

3.3 Вулкан Кумбре-Вьеха

3.3.1 Обзор

Вулкан расположен на острове Пальма Канарского архипелага. Кора под островом имеет комплексную структуру, а сам остров сложен несколькими вулканическими постройками. Одна из них Кумбре-Вьеха, где концентрируется современный базальтовый вулканизм острова [Mezcua, Rueda, 2023]. Сейсмические рои наблюдались еще за годы до извержения, первые – в октябре 2017 [Mezcua, Rueda, 2023]. В [De Luca et al., 2022] предэруптивной фазой активизации считается период с 8 сентября 2021 по 16 сентября 2021. Там же проанализированы поверхностные деформации по спутниковым интерферограммам. Наилучшей моделью, описывающей поверхностные деформации в фазе с 8 по 16 сентября, считается силлообразный источник. Извержение началось 19 сентября 2021-го года в 14:00 UTC и длилось 85 дней [De Luca et al., 2022]. Это было трещинное извержение, в основном эффузивное с рядом стромболианских взрывов [D'Auria et al., 2022]. Вулканизм, предположительно, вызван влиянием плюма, который выражен в слое пониженных скоростей под литосферой на глубинах 45-64 км [D'Auria et al., 2022]. Сейсмичность в предэруптивную фазу мигрирует к поверхности по мере приближения к моменту извержения [D'Auria et al., 2022]. В [D'Auria et al., 2022] с помощью сейсмической томографии обнаружили, что остров подстилается плотной океанической корой с повышенными скоростями волн, граница Мохо под островом находится на глубине, примерно, 10-12 км. До глубин около 3 км под вулканом обнаружена зона высокого значения соотношения V_p/V_s , которую связывают с ослабленной гидротермальной областью. Также зона высокого значения соотношения V_p/V_s обнаружена на глубинах, примерно, между 7 и 25 км, эту зону связывают с глубинным магматическим очагом, питающим извержение (Рис. 1). Предполагается, что в предэруптивную фазу магма поднялась с глубины к поверхности через слой плотной коры, а затем прошла по границе коры и геотермальной области под вулканом [D'Auria et al., 2022]. Похожая гипотеза предлагается в [Fresno et al., 2023].

В [Suarez et al., 2023] также исследовалась сейсмичность предэруптивной фазы извержения вулкана Кумбре-Вьеха в 2021-ом году. Авторами было использовано машинное обучение для распознавания сейсмических сигналов, записанных сетью IGN (Национальный Географический Институт Испании [National Geographic Institute (IGN), Spanish Seismic Catalogue. <https://doi.org/10.7419/162.03.2022>]), это позволило увеличить число событий в каталоге в 2 раза по сравнению с официальным «ручным» каталогом в основном за счет слабых событий. Отмечается, что в период с 11 по 16 сентября

наблюдается три всплеска сейсмичности, которые, по мнению авторов, могут быть связаны с преградами на пути магмы. Среди прочего анализируется вариации b -value во времени в предэруптивном периоде. Авторы использовали окна шириной 200 событий и оценивали представительную магнитуду в каждом окне. Значения наклона графика повторяемости колеблются от 0.8 до 2.2. Детально вариации b -value будут рассмотрены ниже.

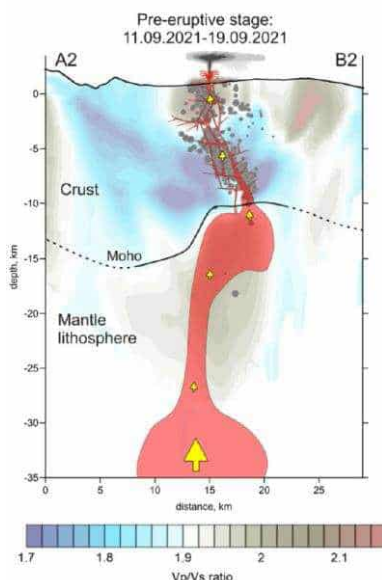


Рисунок 1 – схематичное изображение структуры вулканической системы перед извержением 2021-го года, восстановленное по томографии в работе [D’Auria et al., 2022]

В [Mezcua, Rueda, 2023] рассмотрены средние значения наклона графика повторяемости для вулканических роев вулкана. Авторы рассматривали период с октября 2017 по май 2022, то есть включая рои, наблюдавшиеся задолго до извержения и сам период извержения, и выделили более глубокие ранние рои (зadolго до извержения) с аномально высокими b (близко к 2.2) и низкой активностью, а также предэруптивные приповерхностные рои с умеренно повышенными b (от 0.9 до 1.6) и высокой активностью. Для оценки b авторы используют формулу Аки [Aki, 1965; Utsu, 1965], погрешность рассчитывали по методу Ши и Болта [Shi, Bolt, 1982]. Для оценки представительной магнитуды M_s авторы использовали пакет ZMAP без указания конкретного метода. Представительная магнитуда колеблется от роя к рою в диапазоне от 0.2 до 1.3 со средним около 0.8. Стоит отметить, что аномально высокие значения для ранних роев в работе [Mezcua, Rueda, 2023] получены по очень маленькому числу событий (от 12 до 162 событий до фильтрации по порогу представительности). В целом в работе [Mezcua, Rueda, 2023] рассмотрены только средние значения b для каждого роя без углубления во внутреннюю

структуру. Авторы предполагают, что ранние более глубокие рои сопровождали подъем магмы из мантии в кору, а предэруптивные – внедрение магмы в приповерхностный очаг, а затем и подъем к поверхности, такой же сценарий предлагали и в [D’Auria et al., 2022]. Падение среднего значения b от роя к рою от 1.6 до 0.9 на поздней стадии перед извержением авторы связывают с остыванием магмы.

В данном разделе мы рассмотрим подробно рои предэруптивной фазы в период с 8 сентября 2021 по 20 сентября 2021.

В данном разделе используется каталог Национального Географического Института Испании [National Geographic Institute (IGN), Spanish Seismic Catalogue. <https://doi.org/10.7419/162.03.2022>]. Приоритетная магнитуда каталога имеет тип $mbLg$, но также представлена уточненная локальная магнитуда Рихтера, разработанная позже специально для Канарских островов в работе [Rueda, Mezcu, 2022]. Эта магнитуда учитывает, как региональные параметры затухания, так и специальные корректировки для каждой сейсмической станции островов. В [Mezcu, Rueda, 2023] те же авторы указывают, что эта магнитуда наиболее точно представляет энергию событий на Канарских островах. В той же работе они используют эту магнитуду для вычисления высвобождаемой сейсмической энергии. Хотя авторы не приводят формулу для расчета энергии прямо, мы предположим, что они использовали стандартное выражение [Gutenberg, Richter, 1956]:

$$E = 10^{1.5M+4.8}$$

Далее будем использовать её вместе с уточненной локальной магнитудой, поскольку в магнитуде уже учтены все региональные особенности, а также учитывая маленькие магнитуды событий (не более 3), такая оценка энергии, вероятно, будет довольно точной.

Периодом интрузии перед извержением будем считать даты с 08.09.2021 по 20.09.2021. Для рассмотрения выбран прямоугольный участок по широте от 28.5 до 28.7 градусов, по долготе от -17.75 до -17.95 градусов, охватывающий все события под островом за рассматриваемый период (рис. 2). Все события при такой фильтрации происходят на глубинах менее 25 км. После фильтрации в каталоге остается 1413 событий.

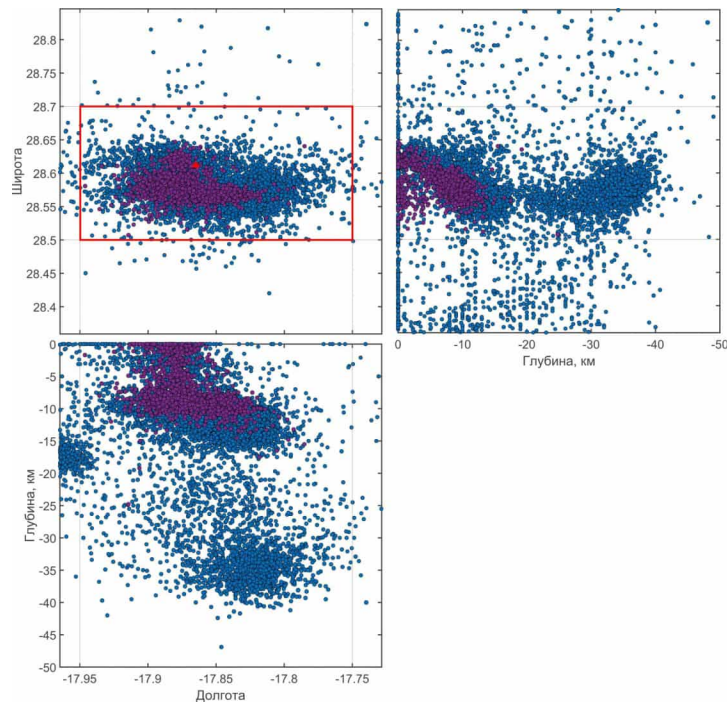


Рисунок 2 – распределение событий каталога в области вулкана в пространстве – синие кружки, фиолетовым выделены события предэруптивной фазы

Рассмотрим подробнее события предэруптивного периода (Рис. 3). Представительная магнитуда была оценена с уровнем значимости 0.05. Получена оценка $M_s = 1.4$. График повторяемости всего периода представлен на рисунке 4, его наклон $b = 1.41 \pm 0.08$. Однако поскольку в вулканической сейсмичности представительная магнитуда часто нестабильна во времени и зависит от активности далее мы будем переоценивать представительную магнитуду локально.

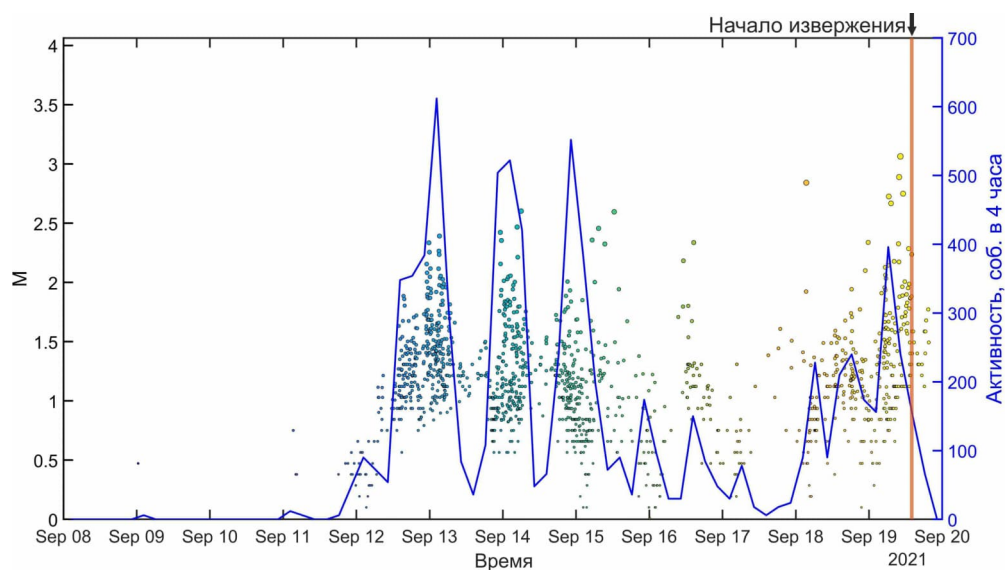
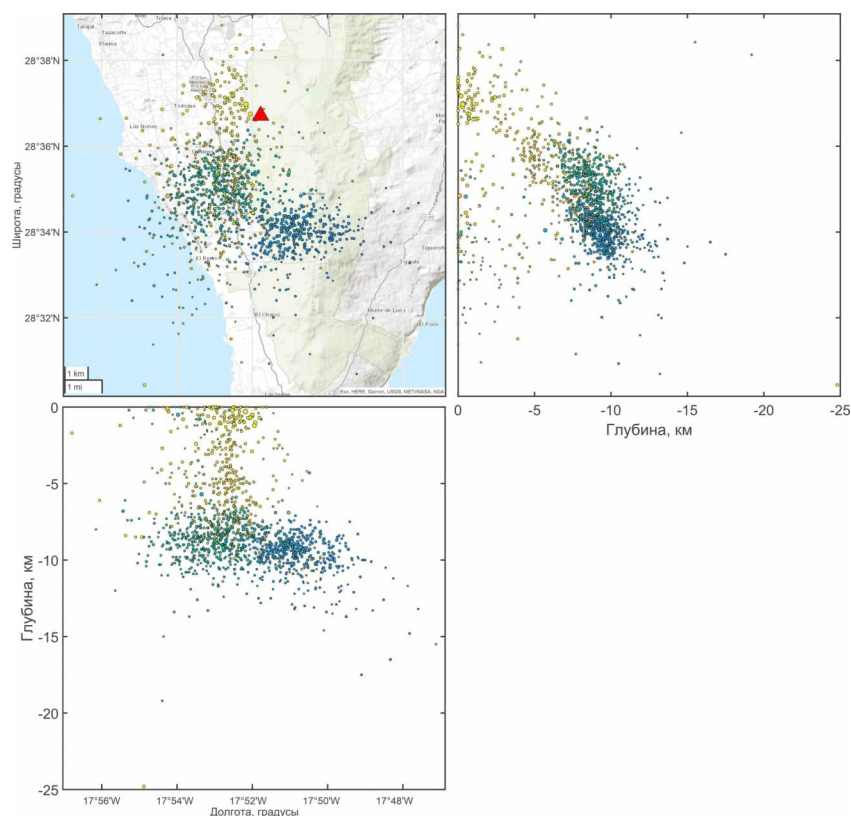


Рисунок 3 – события предэруптивной фазы во времени и пространстве



Продолжение рисунка 3

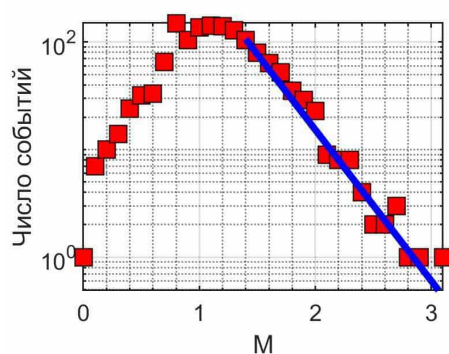


Рисунок 4 – график повторяемости для всего предэруптивного периода

На графике сейсмической активности видно, что характер сейсмичности явно меняется после даты 16 сентября, эта дата как раз соответствует переходу к активной фазе интрузии от активности силлообразного источника (Рис. 5). Однако она разрезает всплеск активности, поэтому сместим порог разделения на две фазы на дату 16.09 08:00. В первой фазе три отдельных массивных всплеска событий, во второй фазе скорее один всплеск вытянутый во времени в конце и имеющий эпизодическую внутреннюю структуру.

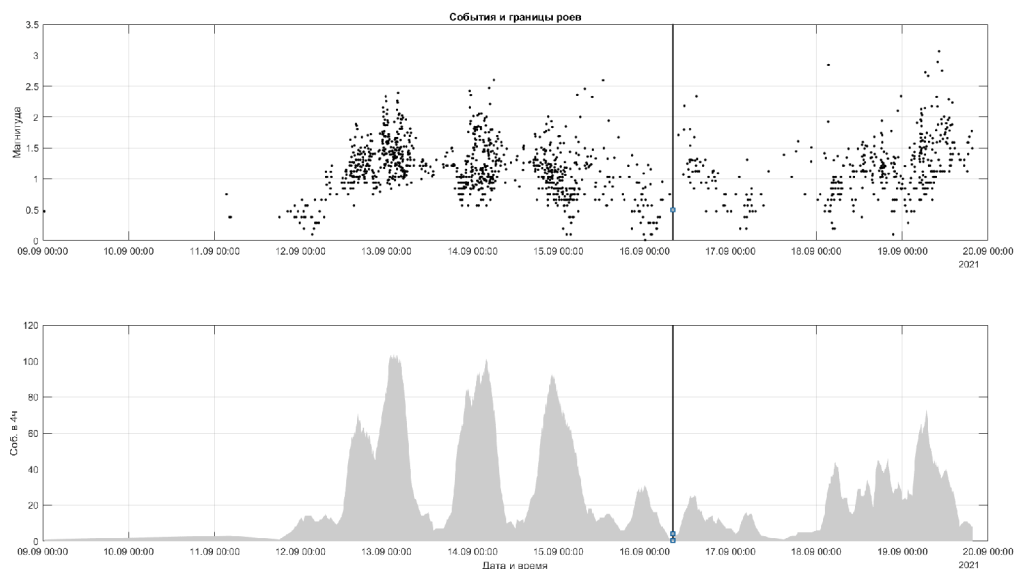


Рисунок 5 – на нижней панели график активности – для каждого события подсчитано число событий в 4 часа вокруг него, то есть за 2 часа до него и через 2 часа после него

Рассмотрим первую фазу подробнее. Для того, чтобы выделить всплески активности введем порог 15 событий в 4 часа, а также ограничение на число событий – их должно быть более 50 во интервале. Порог активности выбран вручную. Это формализует моменты начала и конца роя, то есть таким образом рой начинается и заканчивается на одном и том же уровне активности, что не выполнялось бы при полностью ручном выборе границ роя. В таком случае параметры асимметрии высвобождения энергии имеют более строгий смысл. Таким образом выделяется три крупных всплеска (Рис. 6). Их параметры приведем ниже (табл. 1).

Таблица 1. Рои первой фазы

	N	Длительность	M_c	N_c	$meanM$	$maxM$	b	E_{skew}	N_{skew}
12.09 11:48:05 – 13.09 09:22:03	337	21.6 часов	1.4	148	1.64	2.39	1.51 ± 0.15	-1.00	-0.21
13.09 18:07:45 – 14.09 09:03:42	257	14.9 часов	1.0	168	1.41	2.60	0.96 ± 0.08	-0.29	-0.34
14.09 15:49:14 – 15.09 09:36:51	237	17.8 часов	1.2	81	1.47	2.46	1.55 ± 0.21	-0.27	0.87

N – число событий, M_c – представительная магнитуда, N_c – число представительных событий, b – наклон графика повторяемости, E_{skew} – коэффициент асимметрии высвобождения сейсмической энергии, N_{skew} – коэффициент асимметрии профиля активности

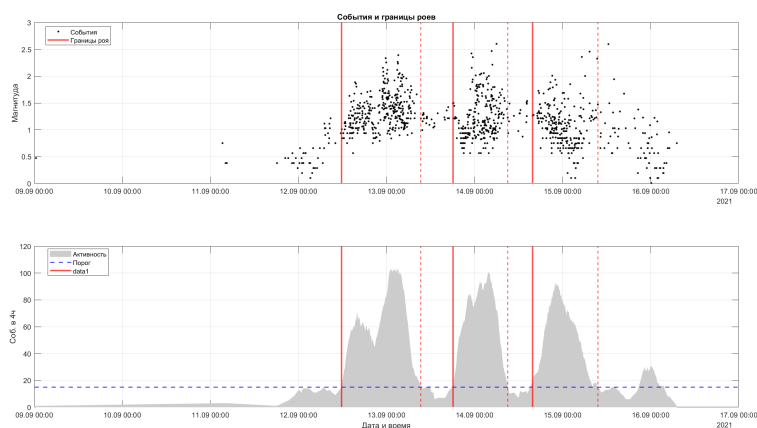


Рисунок 6 – график сейсмической активности первой фазы, вертикальные красные сплошные линии показывают времена начала роев, пунктирные – времена окончания роев, синей линией показан порог, превышение которого знаменует начало роя

Графики повторяемости для трех роев показаны на рисунке 7.

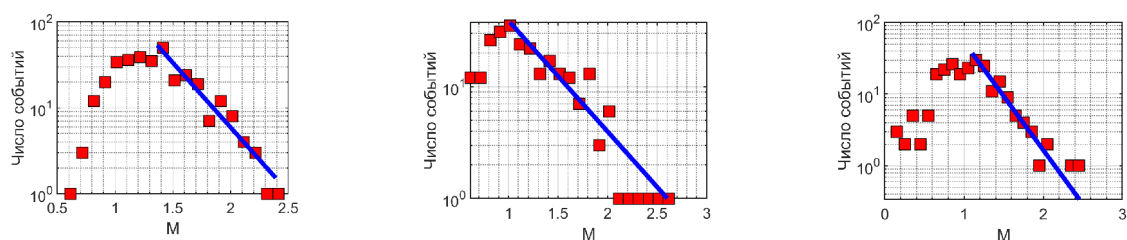


Рисунок 7 – графики повторяемости для трех роев первой фазы

Во второй фазе для выделения роев использован порог 10 событий в 4 часа (Рис. 8).

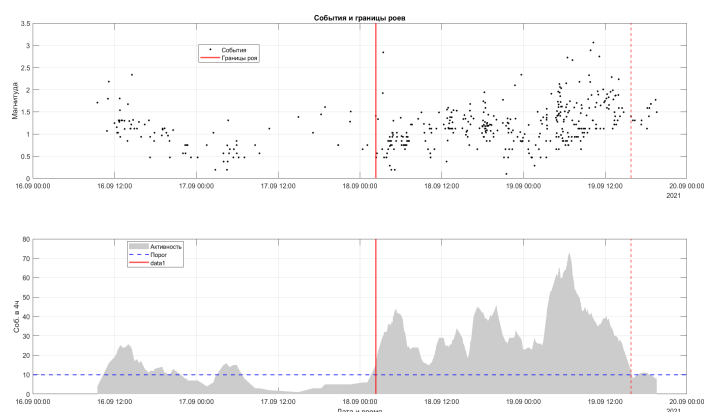


Рисунок 8 – график сейсмической активности второй фазы, вертикальные красные сплошные линии показывают времена начала роев, пунктирные – времена окончания роев, синей линией показан порог, превышение которого знаменует начало роя

Таблица 2. Таблица параметров роя второй фазы

	N	Длительность	M_c	N_c	$meanM$	$maxM$	b	E_{skew}	N_{skew}
18.09 02:20:23 – 19.09 15:48:10	326	37.5 часов	1.3	128	1.67	3.06	1.10 ± 0.24	-1.84	-0.72

Обозначения см. таблицу 1 этого раздела

Выделенные рои соответствуют роям b, c, d и f из работы [Mezcua, Rueda, 2023].

3.3.2 Первый рой

Представительная магнитуда оценивалась с уровнем значимости 0.15. Получены значение $M_c = 1.4$ и $b = 1.51 \pm 0.15$ (Рис. 9). В работе [Mezcua, Rueda, 2023] для этого роя даны схожие значения $M_c = 1.3$ и $b = 1.50 \pm 0.20$. Вариации M_c оценивались во времени в окнах шириной 150 событий со сдвигом 25 с уровнем значимости 0.15. Значение в одной точке доходит до 1.4, в остальных держится на более низком значении. В качестве порога для всего роя выберем значение 1.4.

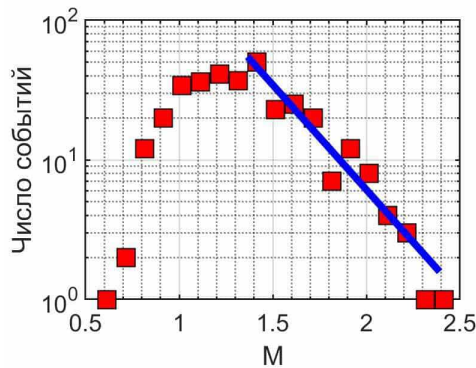


Рисунок 9 – график повторяемости первого роя первой фазы

Первый рой представляет собой малоэнергетический хвост в начале с последующими двумя симметричными всплесками (Рис. 10). На вариациях b видно выраженное падение во время двух всплесков.

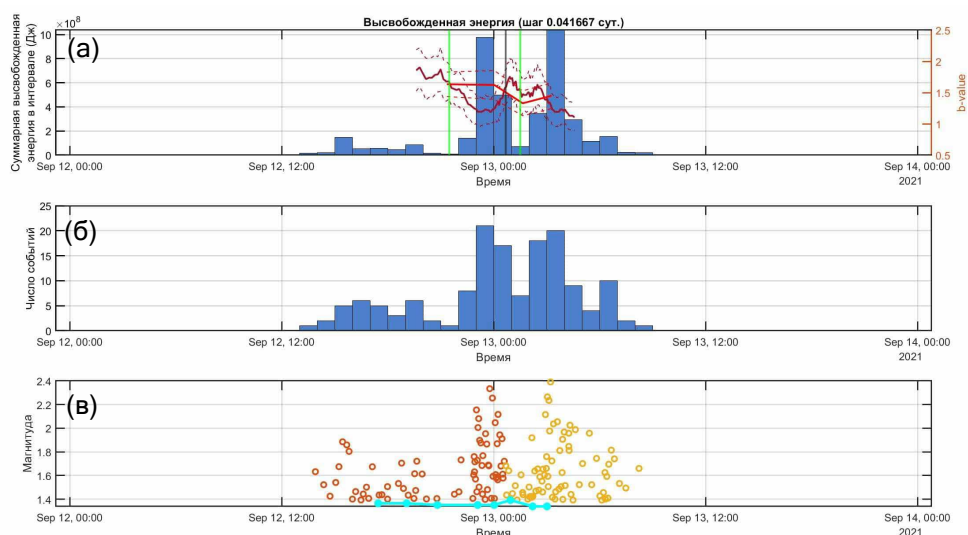


Рисунок 10 – графики для первого роя первой фазы: (а) – график высвобождения суммарной сейсмической энергии во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, оранжевые кружки – события до времени центроида, желтые – события после времени центроида. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 80 событий и сдвигом 22 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу; бордовая линия: окно 50 событий, сдвиг 1. На графике (в) бирюзовой линией показаны вариации M_c во времени

Представим графики повторяемости для окон шириной 80 событий, чтобы проверить их на предмет наличия артефактов (Рис. 11).

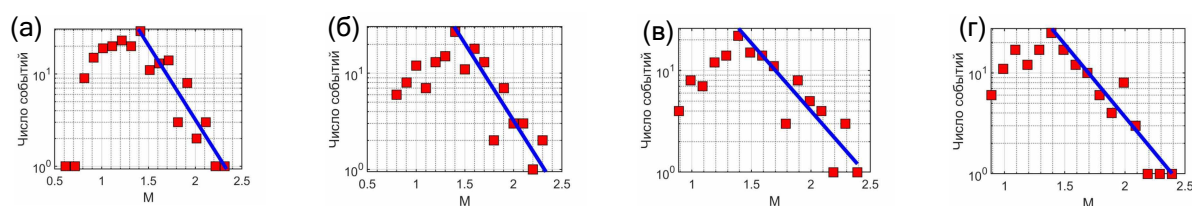


Рисунок 11 – графики повторяемости окон шириной 80 событий и сдвигом 22 с $M_c = 1.4$. Значения в окнах: (а) – $b = 1.61 \pm 0.20$; (б) – $b = 1.60 \pm 0.23$; (в) – $b = 1.33 \pm 0.20$; (г) – $b = 1.44 \pm 0.21$

Ниже также представлены графики повторяемости для трех интервалов (Рис. 12): в «хвосте» (от начала роя до первой зеленой линии), во время первого всплеска (от первой зеленой линии до второй зеленой линии), во время второго всплеска (от второй зеленой линии до конца роя) (см. рисунок 10). Даты зеленых линий: 12.09 21:29:59 и 13.09 01:30:00.

Полученные значения b соответственно: 2.47 ± 0.62 по 30 событиям, 1.19 ± 0.24 по 50 событиям, 1.42 ± 0.23 по 68 событиям. Хотя событий в первом интервале мало, эти примеры призваны показать, что линейность графиков сохраняется на протяжении роя и значения наклона действительно меняются даже в среднем.

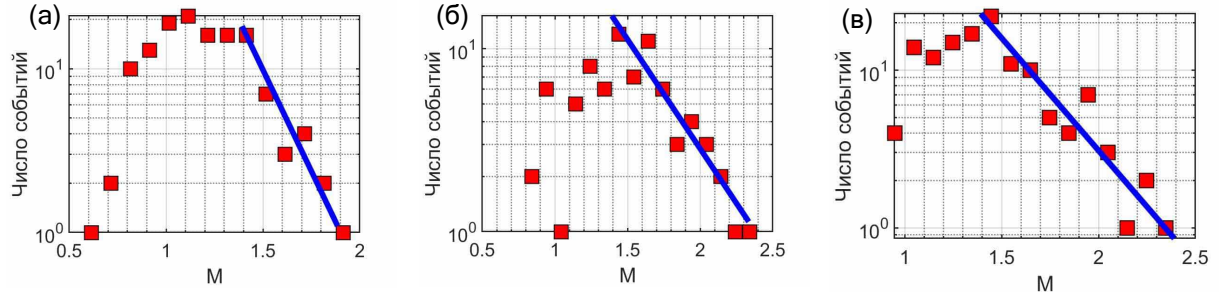


Рисунок 12 – графики повторяемости для трех частей роя с $M_c = 1.4$

Наблюдается anomalously высокое значение в хвосте и два «бухтообразных» падения во время двух всплесков, примерно, до значения 1.1. Однако с учетом погрешности они статистически незначимы. В вариациях значение меняется от 1.90 до 1.10 в окнах шириной 50 событий и от 1.63 до 1.33 в окнах шириной 80 событий.

В работе [Suarez et al., 2023] наблюдается схожий сценарий в этом периоде: в начале роя значение держится около 1.5, затем падает в момент первого всплеска до, примерно, 0.8, после чего вырастает в промежутке между всплесками и снова падает во время второго всплеска. Видимо, использование расширенного каталога [Suarez et al., 2023] позволяет более строго выделить эти закономерности, но в нашей работе их подтвердить не удастся.

Также стоит отметить, что, если разделить кульминации активности этого роя на два всплеска, то первый из них в отдельности совершенно симметричен во времени имеет значение асимметрии по высвобождению энергии -0.15, по профилю активности -0.13. Второй всплеск имеет правую асимметрию: по энергии 1.04, по активности 0.61.

3.3.3 Второй рой

Представительная магнитуда рассчитана с уровнем значимости 0.15. Получены значения $M_c = 1.0$ и $b = 0.96 \pm 0.08$ (Рис. 13). В работе [Mezcua, Rueda, 2023] для этого роя даны схожие значения $M_c = 0.9$ и $b = 1.00 \pm 0.10$. Вариации M_c во времени в окнах шириной 150 событий со сдвигом 25 с уровнем значимости 0.15 (Рис.14(в)). Значение доходит до 1.6 к концу роя.

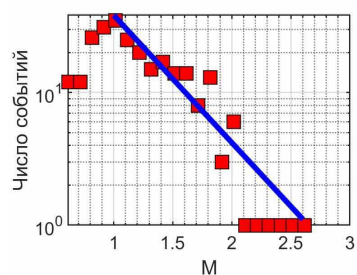


Рисунок 13 – график повторяемости второго роя первой фазы

На рисунке 14 представлен временно профиль этого роя.

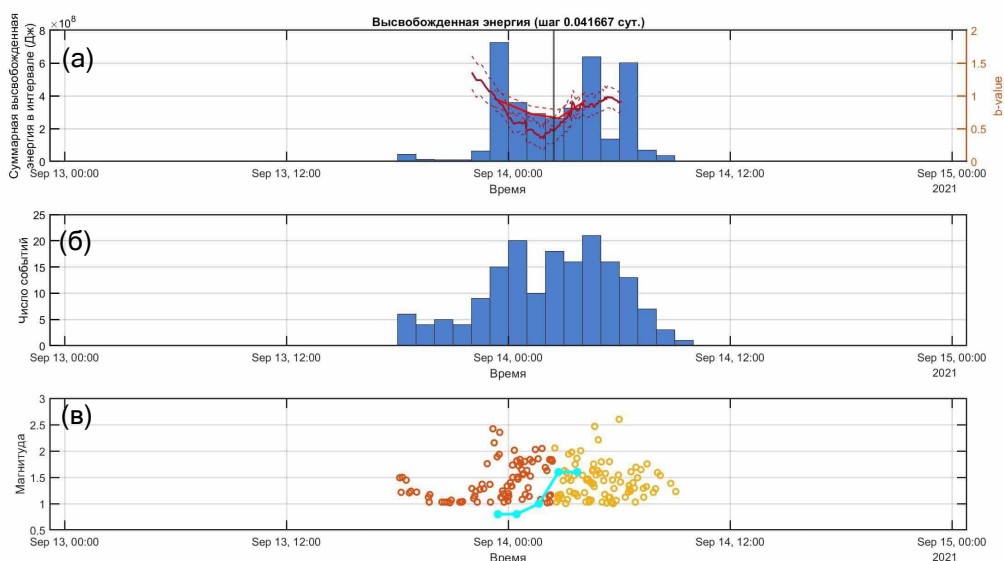


Рисунок 14 – графики для второго роя первой фазы с представительной магнитудой $M_c = 1.0$: (а) – график высвобождения суммарной сейсмической энергии во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, оранжевые кружки – события до времени центроида, желтые – события после времени центроида. На графике (а) красной линией показаны вариации $b-value$ в скользящем по времени окне шириной 80 событий и сдвигом 22 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу; бордовая линия: окно 50 событий, сдвиг 1. На графике (в) бирюзовой линией показаны вариации M_c во времени

На графике вариаций $b-value$ видна «бухтообразная» аномалия, но график повторяемости показывает, что падение в центре вызвано отклонением от линейной формы и наличия аномально большого числа событий с магнитудами около 1.8 (Рис. 15).

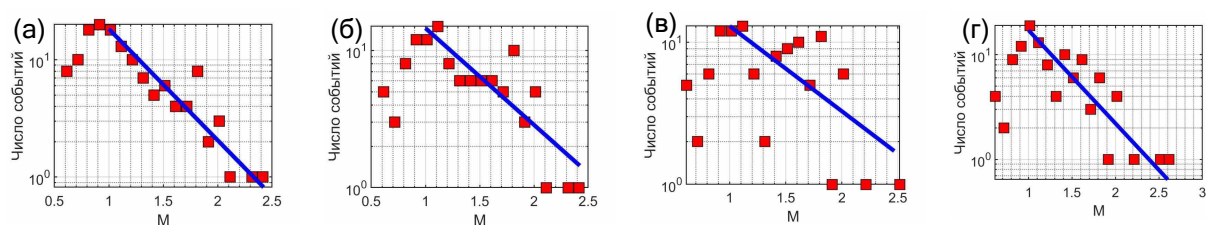


Рисунок 15 – графики повторяемости окон шириной 80 событий и сдвигом 22 с $M_c = 1.0$.

(а) – $b = 0.95 \pm 0.13$; (б) – $b = 0.70 \pm 0.11$; (в) – $b = 0.60 \pm 0.13$; (г) – $b = 0.89 \pm 0.12$;

Второй рой более симметричен по энергиям и числу событий, но у него также есть малоэнергетический «хвост» в начале. Значения в центре роя нельзя считать в полной мере достоверными, так как график повторяемости в этой зоне значительно отклоняется от линейной формы, эта зона отмечена красным на рисунке 16.

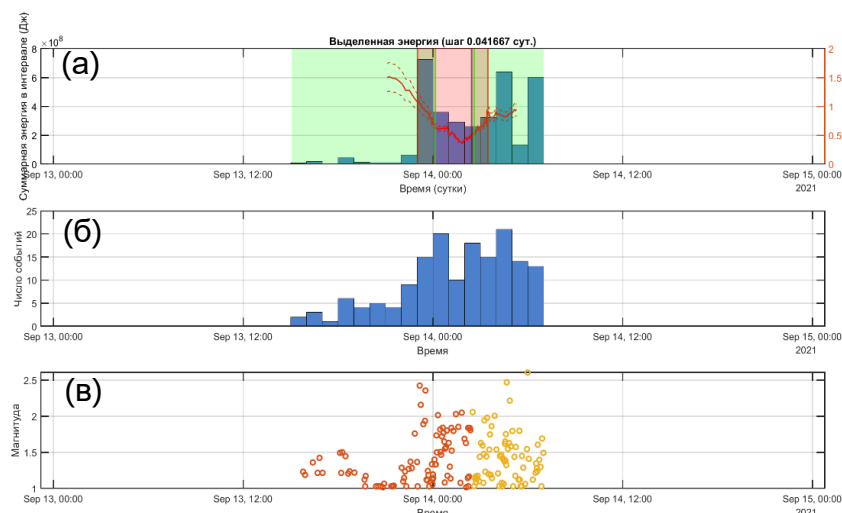


Рисунок 16 – графики для второго роя с представительной магнитудой $M_c = 1.0$: (а) – график высвобождения суммарной сейсмической энергии во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, оранжевые кружки – события до времени центроида, желтые – события после времени центроида.

На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 50 событий и сдвигом 1 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу. Черной вертикальной линией показано время центроида по энергии. Зеленые зоны – первые и последние 100 событий, красная зона – 100 событий в центре роя

Рассмотрим первые 100 событий, 100 событий из середины и последние 100 событий. Их графики повторяемости представлены на рисунке 17. Полученные значения b соответственно: 1.50 ± 0.23 , 0.71 ± 0.05 , 0.98 ± 0.09 .

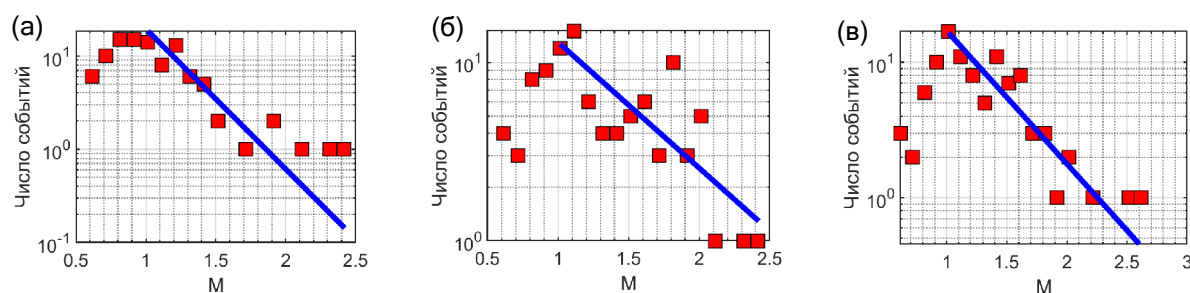


Рисунок 17 – графики повторяемости (а) – для первых 100 событий, (б) – для 100 событий в центре роя и (в) – для 100 последних событий роя

В центре роя график повторяемости также отклоняется от линейной формы из-за наличия аномально большого числа событий с магнитудами около 1.8. Однако можно по крайней мере сказать, что значения в начале роя выше, чем в конце (Рис. 18), в вариациях значение меняется в диапазоне от 0.82 до 1.5. В работе [Suarez et al., 2023] для этого роя также наблюдается «бухтообразное» падение от 1.5 до значений около 0.8.

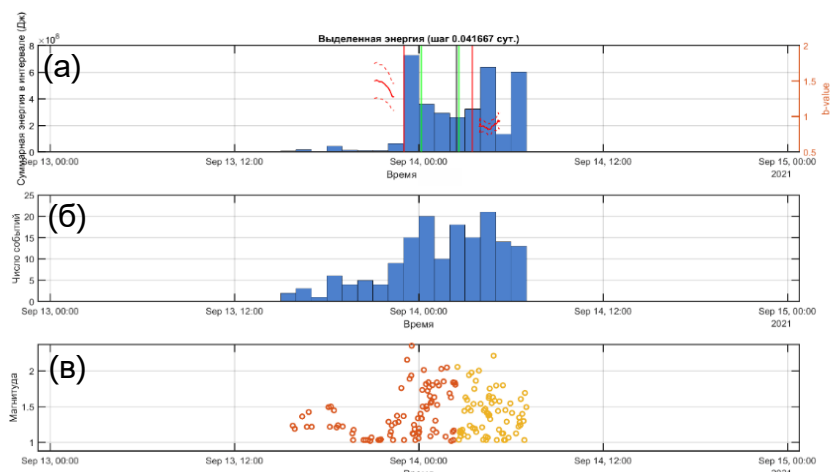


Рисунок 18 – графики для второго роя с представительной магнитудой $M_s = 1.0$: (а) – график высвобождения суммарной сейсмической энергии во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, оранжевые кружки – события до времени центроида, желтые – события после времени центроида.

На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 50 событий и сдвигом 1 событий с удаленной из расчета серединой роя, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу. Черной вертикальной линией показано время центроида по энергии. Период выделенный

красными линиями – 100 событий в центре роя

3.3.4 Третий рой

Представительная магнитуда оценивалась с уровнем значимости 0.15. Получены значения $M_c = 1.2$ и $b = 1.55 \pm 0.21$ (Рис. 19). В работе [Mezcua, Rueda, 2023] для этого роя даны значения $M_c = 0.9$ и $b = 1.10 \pm 0.20$. Вариации M_c во времени в окнах шириной 150 событий со сдвигом 25 с уровнем значимости 0.15 (Рис. 20(в)). Значение в вариациях не превышает 1.0. В качестве порога для всего роя выберем значение 1.2.

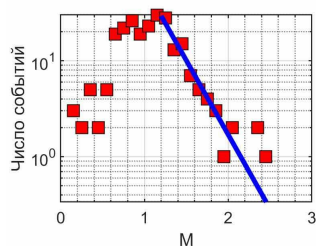


Рисунок 19 – график повторяемости третьего роя первой фазы

Третий рой симметричен по энергии и слабо положительно асимметричен по активности. Есть паттерн роста максимальных магнитуд от начала к концу, но не числа событий и энергии. Параметр b имеет слабый тренд спада от начала роя к концу, но ярко выраженных значимых аномалий нет.

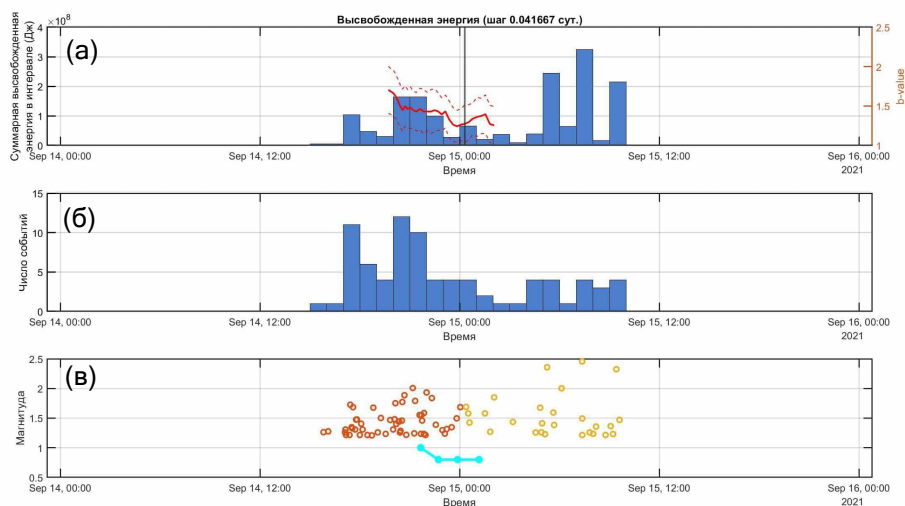


Рисунок 20 – графики для третьего роя первой фазы: (а) – график высвобождения суммарной сейсмической энергии во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, оранжевые кружки – события до времени центроида, желтые – события после времени центроида. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 50 событий и сдвигом 1 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу. На графике (в) бирюзовой линией показаны вариации M_c во времени

Значение b -value в вариациях меняется в диапазоне от 1.24 до 1.70. В работе [Suarez et al., 2023] для этого роя наблюдается слабо выраженное падение от 1.5 до значений около 1.0.

3.3.5 Четвертый рой

Перейдем к рассмотрению роя, наблюдавшегося во второй фазе предэруптивного периода. Представительная магнитуда оценена с уровнем значимости 0.05. Получены значения $M_c = 1.1$ и оценка $b = 0.94 \pm 0.07$. В работе [Mezcua, Rueda, 2023] для этого роя даны схожие значения $M_c = 0.9$ и $b = 0.9 \pm 0.10$. Вариации M_c оценивались в окне 150 событий со сдвигом 25 на уровне значимости 0.15 (Рис.22(в)). Максимальное значение в вариациях 1.5 в конце роя, но в среднем держится на 1.3. Его и будем использовать при исследовании вариаций b .

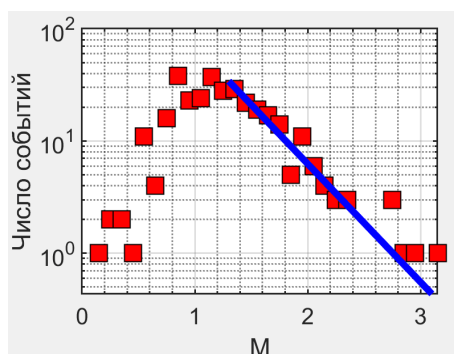


Рисунок 21 – график повторяемости для роя из второй фазы (четвертый рой)

Рой в этой фазе явно отличается по форме от роев в первой фазе, он больше растянут во времени и в нем есть паттерн роста максимальных магнитуд и энергии от начала к концу (Рис. 22). Рой имеет сильную отрицательную асимметрию по энергиям и небольшую по числу событий. Основной толчок не ярко выражен, но значительно превышает среднюю магнитуду роя. Присутствует длинная малоэнергетическая фаза активизации, затем всплеск энергии и активности незадолго до сильнейшего события, затем затишье прямо перед сильнейшим событием и снова резкий рост по мере приближения к нему, после сильнейшего события более короткий спад интенсивности роя. В начале роя присутствует довольно сильное событие, выбивающееся из общей закономерности, но оно не меняет общей картины.

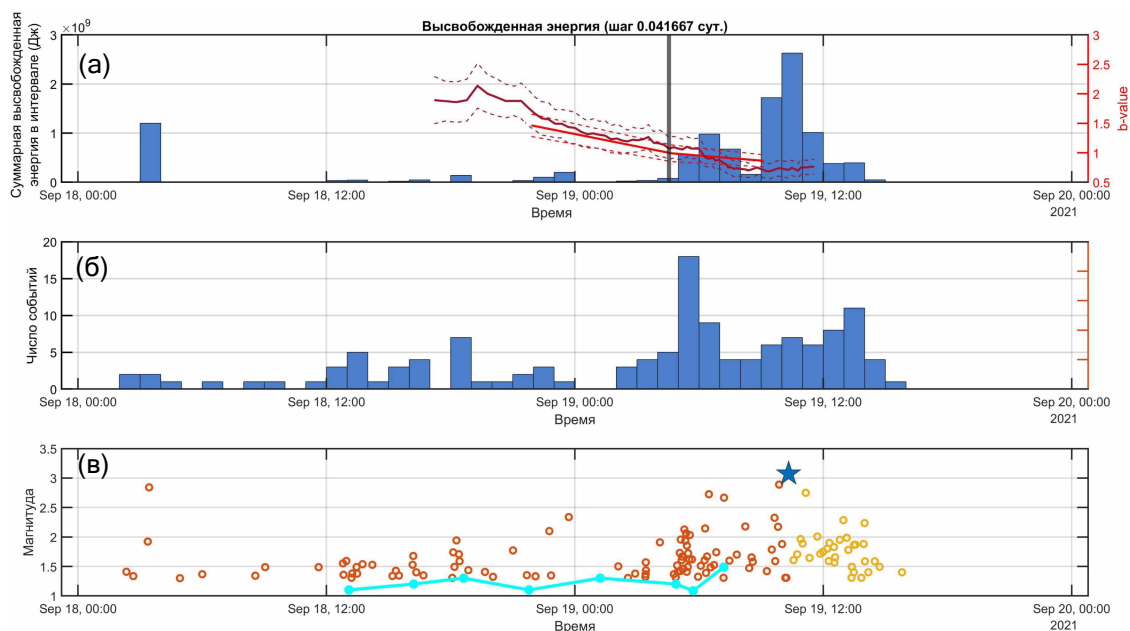


Рисунок 22 – графики для роя второй фазы: (а) – график высвобождения суммарной сейсмической энергии во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, синяя звезда – сильнейшее событие роя, оранжевые кружки – события до сильнейшего события, желтые – события после сильнейшего события. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 80 событий и сдвигом 24 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу; бордовая линия – окно шириной 50 событий и сдвиг 1 событие. На графике (в) бирюзовой линией показаны вариации M_c во времени

В вариациях b -value прослеживается стабильный тренд падения значения от начала к концу роя с разными ширинами окон.

Построим графики повторяемости для окон шириной 80 событий (Рис. 23). Они имеют выраженную линейную часть, падение от 1.44 до 0.98 между первым и вторым окном можно считать достоверным, в третьем окне значение M_c может быть занижено. Экстремально высокое значение, наблюдаемая в окнах шириной 50 событий, не выделяется, вероятно, из-за слишком большого усреднения в окнах шириной 80 событий.

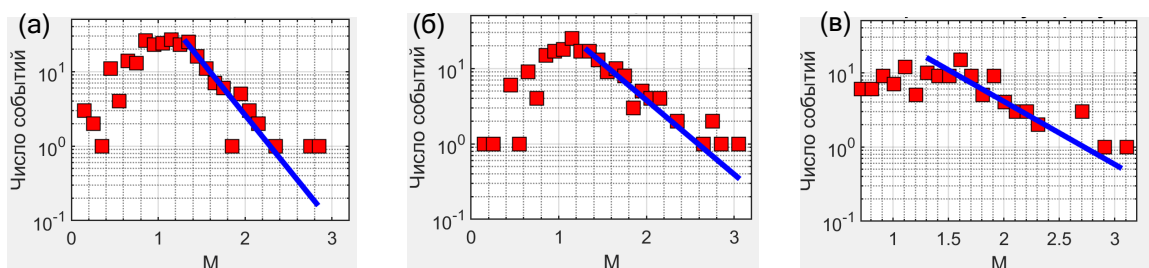


Рисунок 23 – графики повторяемости (а) – в начале, (б) – в центре и (в) – в конце роя в окне шириной 80 событий с $M_c = 1.3$: $b = 1.44 \pm 0.19$; $b = 0.98 \pm 0.14$; $b = 0.85 \pm 0.10$. В последнем случае рассчитаем значение также с $M_c = 1.6$, тогда $b = 1.12 \pm 0.21$

Рассмотрим графики повторяемости для первого и последнего окна шириной 50 событий (Рис. 24). График в последнем окне сильно зашумлен и имеет дефицит событий на магнитудах около 1.4-1.5. Предположим, что оценка представительной магнитуды в этом случае занижена, повысим порог до 1.6, тогда получим оценку $b = 0.96 \pm 0.23$. Даже повышение порога представительности до $M_c = 1.6$ не позволяет значению b достигнуть экстремально высоких цифр, которые наблюдаются в самом начале роя.

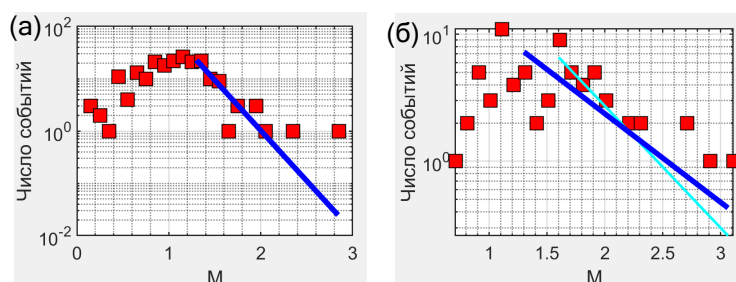


Рисунок 24 – (а) – график повторяемости для окна соответствующего первым 50 событиям с магнитудами выше 1.3: $b = 1.92 \pm 0.36$. (б) – график повторяемости для окна, соответствующего последним 50 событиям с магнитудами выше 1.3. Синяя линия с $M_c = 1.3$: $b = 0.64 \pm 0.10$; бирюзовая линия с $M_c = 1.6$: $b = 0.96 \pm 0.23$

Проверим статистическую значимость этих различий с помощью Z-теста: $Z = \frac{|1.92 - 0.96|}{\sqrt{0.36^2 + 0.23^2}} = 2.25 > 1.96$, различие значимо на уровне $p < 0.05$.

Рассмотрим теперь отдельно графики повторяемости для разных частей роя: в начале роя до даты 18.09 20:00 – $b = 1.71 \pm 0.22$ с $M_c = 1.1$ по 69 представительным событиям, либо $b = 1.82 \pm 0.28$ с $M_c = 1.2$ по 48 представительным событиям; перед сильнейшим событием – с 19.09 00:00 до момента сильнейшего события (не включая) – $b = 0.81 \pm 0.11$ с $M_c = 1.1$ по 72 представительным событиям либо $b = 1.02 \pm 0.16$ с $M_c = 1.3$ по

56 событиям (Рис. 25). Эти значения также подтверждают описанный ранее тренд. Даже если сравнивать нижнюю оценку в начале роя 1.71 ± 0.22 с верхней оценкой в период перед сильнейшим событием 1.02 ± 0.16 , различие статистически значимо, $Z = 2.54 > 1.96$ на уровне $p < 0.05$.

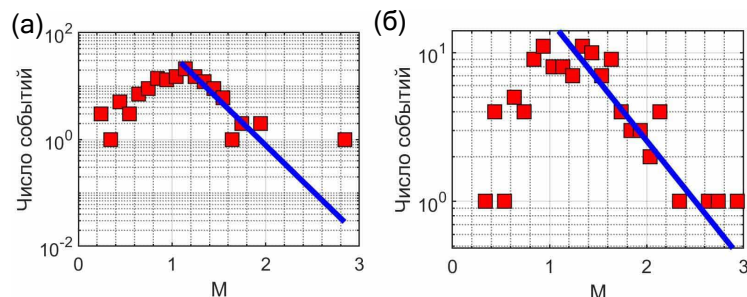


Рисунок 25 – графики повторяемости для разных частей роя: (а) – в начале роя, (б) – перед сильнейшим событием

По нашим расчетам в вариациях *b-value* меняется в диапазоне от 0.70 до 2.14 в окнах шириной 50 событий. В работе [Suarez et al., 2023] для этого роя прослеживается тренд спада значения от экстремально высоких (более 2) к значениям около 1 с некоторыми короткими короткими флуктуациями.

График изменения числа событий в единицу времени по мере приближения к сильнейшему событию представлен на рисунке 26.

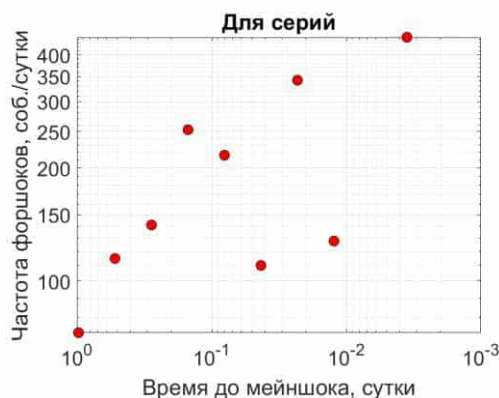


Рисунок 26 – график изменения числа событий в единицу времени по мере приближения к сильнейшему событию с $M_s = 1.1$

Аппроксимировать это распределение степенной функцией вида модифицированного закона Омори не удастся, так как оценка значения стремится к бесконечности $p\text{-value} > 10$.

Анализ степени временной кластеризации для этого роя не проводился, так как на стадии его активизации для этого слишком мало событий: в период с 18.09.2021 02:20:23 по 18.09.2021 20:00:00 после фильтрации по порогу представительности ($M_c = 1.3$) остается всего 33 события.

Резюме

Вулкан Кумбре-Вьеха находится на острове Канарского архипелага, где, предположительно, вулканизм вызван плюмовой активностью в мантии. Перед извержением магма поднималась с глубин около 10-12 км через слой плотной океанической коры с 8 по 19 сентября, когда началось извержение. Считается, что последний этап на пути к поверхности магма прошла по границе коры и геотермальной области под вулканом, которая была обнаружена с помощью сейсмической томографии.

Всего в предэруптивную фазу было выделено четыре роя аналогичные роям b, c, d и f, выделенных в работе [Mezcua, Rueda, 2023]. Их параметры продублированы в таблице 3.

Таблица 3. Параметры роев предэруптивной фазы вулкана Кумбре-Вьеха

№	Период	N	Длительность	M_c	N_c	$meanM$	$maxM$	b	E_{skew}	N_{skew}
1	12.09 11:48:05 – 13.09 09:22:03	337	21.6 часов	1.4	148	1.65	2.39	1.51 ± 0.15	-1.00	-0.21
2	13.09 18:07:45 – 14.09 09:03:42	257	14.9 часов	1.0	168	1.41	2.60	0.96 ± 0.08	-0.29	-0.34
3	14.09 15:49:14 – 15.09 09:36:51	237	17.8 часов	1.2	81	1.47	2.46	1.55 ± 0.21	-0.27	0.87
4	18.09 02:20:23 – 19.09 15:48:10	326	37.5 часов	1.3	128	1.67	3.06	1.10 ± 0.24	-1.84	-0.72

Обозначения см. таблицу 1 этого раздела

Первый рой имеет бимодальный профиль с двумя равноценным всплесками событий, а также небольшой малоэнергетический всплеск в начале, это приводит к большому отрицательному значению коэффициента энергетической асимметрии. Второй рой также имеет слабо выраженную бимодальную форму, но более симметричен во времени. Третий рой имеет кульминацию в начале, но несколько наиболее сильных событий ближе к концу, то есть несовпадающее поведение профиля активности и энергии. Четвертый рой явно отличается по форме от трех предыдущих, он больше растянут во времени и в нем есть паттерн роста максимальных магнитуд и высвобождаемой энергии от начала к концу. Рой имеет более сильную отрицательную асимметрию по высвобождению

энергии и по активности. Сильнейшее событие не ярко выражено, но значительно превышает среднюю магнитуду роя. Наблюдается длинная малоэнергетическая фаза активизации, затем всплеск энергии незадолго до сильнейшего события, затем затишье прямо перед сильнейшим событием и снова резкий рост по мере приближения к нему, после сильнейшего события более короткий спад интенсивности роя.

Хотя в работе [Suarez et al., 2023] уже проведен анализ временных вариаций этого периода, их метод имеет некоторые минусы: авторы пересчитывают представительную магнитуду в каждом окне по 200 событий и используют метод Аки для расчета *b-value*, это может привести к появлению ложных флуктуаций в вариациях, что не позволяет однозначно выявить истинные аномалии. К тому же из текста статьи не в полной мере ясно, каким методом оценивалась представительная магнитуда. Авторы не показывают графиков повторяемости, что не позволяет проверить насколько достоверны аномалии. Поэтому провести дополнительный анализ методом, принятым в нашей работе, все еще необходимо, во-первых, для верификации результатов, во-вторых, для унификации методов с целью иметь возможность сопоставлять результаты между различными вулканами. Отметим, что работа [Suarez et al., 2023] более направлена на предъявление преимуществ расширенного с помощью машинного обучения каталога, поэтому в ней мало внимания уделяется физическим интерпретациям.

Мы обнаруживаемые те же тренды поведения *b-value* для первых двух роев и последнего четвертого, что и [Suarez et al., 2023]. Однако по нашим данным достоверно подтвердить тренд можно только в последнем рое. В первом рое падение *b-value* в момент кульминаций происходит в пределах погрешностей, во втором рое падение значения к центру роя можно объяснить локальным отклонением графика повторяемости от линейной формы.

В таком случае можно зафиксировать отсутствие устойчивых аномалий для первых трех более глубоких роев (их глубины 9.5 ± 1.3 км, 9.0 ± 1.2 км и 7.6 ± 3.0 км соответственно по [Mezcua, Rueda, 2023]) и падение от экстремально высокого (2.14) до пониженного (0.70) в последнем рое на глубине 4.0 ± 3.0 по [Mezcua, Rueda, 2023].

Первые три роя похожи по временным профилям, поведению и диапазону значений *b-value*, они схожи и длительности, а также по средней глубине. Четвертый рой самый длинный и произошел ближе к поверхности. На ряду со вторым роем вулкана Редаут этот рой является еще одним примером реализации тех же паттернов на малых временных масштабах (порядка 1.5 суток). К тому же он показывает, что среди четырех роев

предэруптивной фазы закономерность падения значения наклона графика повторяемости от экстремально высоких значений характерна именно для него, при этом он же обладает и наибольшей отрицательной асимметрией и именно после его кульминации началось извержение. Эта картина полностью аналогична предэруптивной фазе вулкана Редаут.

3.4 Вулкан Иерро

3.4.1 Обзор

Иерро – это островной вулкан, самый молодой из вулканов Канарского архипелага [Carracedo et al., 2012]. Остров находится в центре системы из трех рифтовых разломов, формирующих структуру в виде звезды [Carracedo et al., 2012]. Отметим, что в данном случае под рифтовыми разломами понимается не региональная тектоническая зона, а хребты, образующиеся локально, в результате вулканизма. На острове множество вулканических конусов, расположенных вдоль этих рифтовых зон [Becerril et al., 2016]. Сейсмичность, представленная относительно слабыми событиями, стала нарастать с июля 2011-го года на глубинах 8-14 км, постепенно смещаясь с севера на юг [Carracedo et al., 2012]. Одновременно с этим наблюдалась вертикальная поверхностная деформация. Далее магма, предположительно, быстро прорвалась к поверхности, о чем, по мнению авторов, говорит появление первых поверхностных событий (глубина меньше 3 км) 9 октября 2011 [Carracedo et al., 2012]. После чего 10 октября началось подводное извержение в южной рифтовой зоне острова, формируя на дне три новых вулканических конуса [Carracedo et al., 2012].

Для Канарских островов характерны гавайский и стромболианский типы извержений [Martí et al., 2013]. Канарские острова находятся около пассивной границы Африканской плиты. Предполагается, что вулканизм островов связан с остатками древнего плюма [Martí et al., 2013]. Вулкан Иерро щитовой и сформирован потоками лавы [Martí et al., 2013].

В работе [González et al., 2013] исследовалась структура вулкана по данным поверхностных деформаций. Авторам удалось восстановить наличие двух магматических очагов: один центральный, под вулканом, на глубине 9.5 ± 4.0 км; второй в стороне южного рифта на глубине 4.5 ± 2.0 км (Рис. 1).

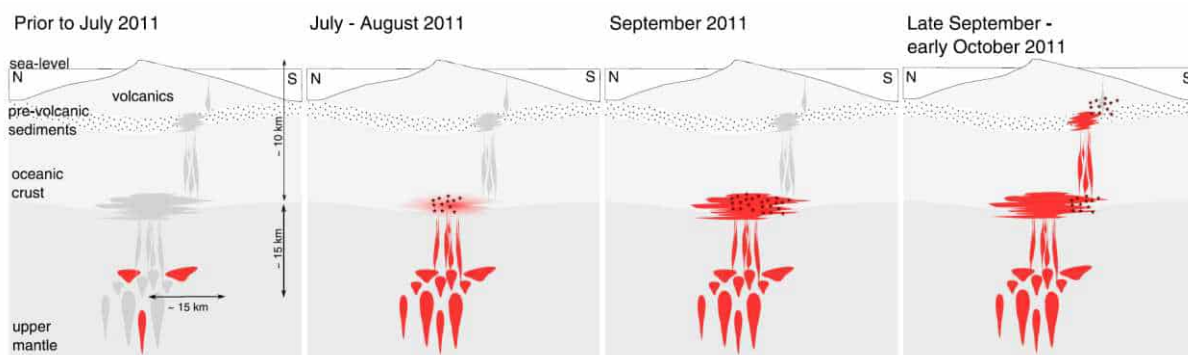


Рисунок 1 – модель процессов в магматической системе в предэруптивную фазу, предложенная в [González et al., 2013], показан срез вулкана вдоль направления север-юг

Для исследования сейсмичности предэруптивной фазы будем использовать каталог Национального Географического Института Испании [National Geographic Institute (IGN), Spanish Seismic Catalogue. <https://doi.org/10.7419/162.03.2022>]. Регистрация сейсмических событий была значительно улучшена с началом активизации вулкана [Marti et al., 2013]. Будем рассматривать сейсмичность региона вокруг вулкана: от 27.5 до 28.1 градусов по широте и от -17.8 до -18.5 градусов по долготе, в период предэруптивной фазы 07.07.2011 – 10.10.2011 (Рис. 2). Далее в работе используется локальная магнитуда (M_L) каталога.

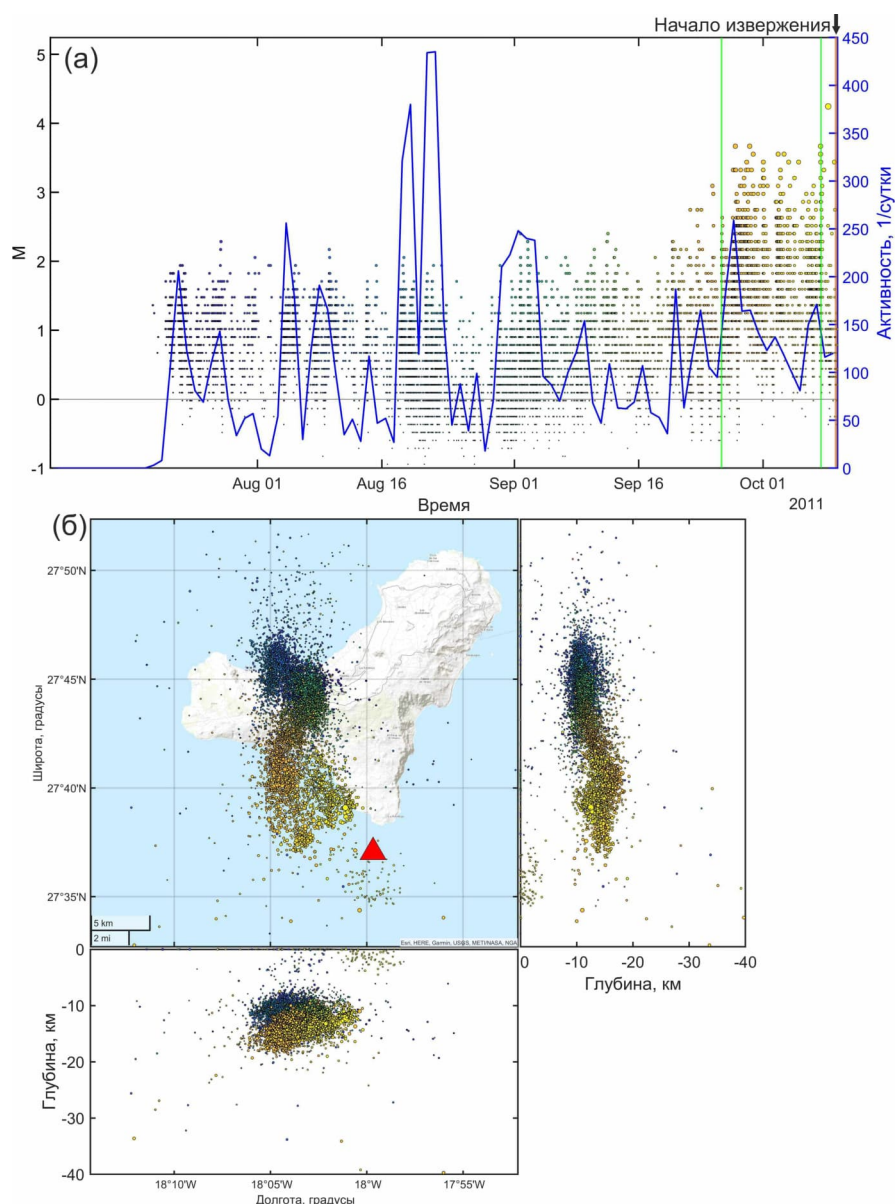


Рисунок 2 – (а) – распределение магнитуд событий во времени для предэруптивного периода в исследуемой области вокруг вулкана, зеленые линии соответствуют датам 26 сентября – начало прорыва из глубинной камеры в приповерхностную, 8 октября – прорыв от неглубокой камеры к поверхности. (б) – распределение событий в пространстве, красный треугольник – примерное место извержения

В первые два месяца активизации сейсмичность концентрировалась на севере острова на глубинах 10-15 км [Marti et al., 2013]. Этот период связывают с притоком магмы из мантии и ее накоплением на глубине 10-15 км, преобладающий тип землетрясений был вулканотектоническим [Marti et al., 2013]. В течение второй недели сентября наблюдалась миграция сейсмичности на юг, что связывают с горизонтальным движением магмы [Marti et al., 2013]. В этот же период наблюдалось сильное ускорение в росте поверхностных деформаций [Marti et al., 2013]. С 27 сентября до начала извержения 10 октября сейсмическая активность резко выросла, извержение началось через 33 часа после землетрясения магнитудой 4.3 [Marti et al., 2013]. Первые фазы извержения были эксплозивными [Marti et al., 2013].

Предполагается, что первая фаза (до середины сентября) связана с накоплением магмы в камере и «надуванием» вулканической постройки с соответствующими упругими деформациями, а вторая (миграция сейсмичности) с хрупким разрушением пород, когда магма раздвигала стенки дайки [Marti et al., 2013].

Для формирования общего представления о сейсмическом режиме для начала разобьем период активизации на временные интервалы, выделяемые в работе [Lopez et al., 2012]. Интервал 7-18 июля 2011 года – фиксируются первые слабые деформации и повышение сейсмической активности, в этом интервале в каталоге почти нет событий, поэтому пропустим его в нумерации, и далее он не будет рассматриваться. Первый интервал, с 19 июля по 3 сентября – сильный рост сейсмической активности, продолжение деформаций. Максимальная магнитуда землетрясений 2.7, глубины 10-15 км, события локализуются на севере острова. Вторым интервал, с 3 сентября по 26 сентября – значительный рост деформаций, миграция сейсмичности на юг, рост высвобождаемой сейсмической энергии. Максимальная магнитуда 3.3, появились более глубокие события. Третий интервал, 26 сентября по 7 октября – значительный рост сейсмической активности, максимальная магнитуда 3.8, в этом интервале выделилось 69.7% сейсмической энергии за весь период. Миграция на юг продолжилась, глубины 14-17 км. В течение 5 дней с 1 октября наблюдалось резкое сдувание и надувание постройки. Четвертый интервал, с 7 по 10 октября – событие с магнитудой 4.3 на глубине 12 км, рой поверхностных событий, за этот интервал выделилось 14.5% сейсмической энергии.

Рассчитаем значения b для 4 выделенных периодов. Для расчета M_c и b значения магнитуд округлялись до одного знака после запятой. Погрешность b оценивалась по 200 итерациям бутстрэпа с фиксированной M_c . Их графики повторяемости показаны на рисунке 3.

Таблица 1 – Параметры временных интервалов предэруптивной фазы

Номер периода	Интервал	M_c	N_c	b
-	7–18 июля 2011	-	-	-
1	18 июля – 3 сентября 2011	1.6	189	2.49 ± 0.21
2	3–26 сентября 2011	2.1/1.5	47/241	$2.13 \pm 0.33 / 1.41 \pm 0.09$
3	26 сентября – 7 октября 2011	2.9	58	1.13 ± 0.24
4	7–10 октября 2011	2.1	61	0.91 ± 0.14

M_c – представительная магнитуда, N_c – число представительных событий, b – наклон графика повторяемости

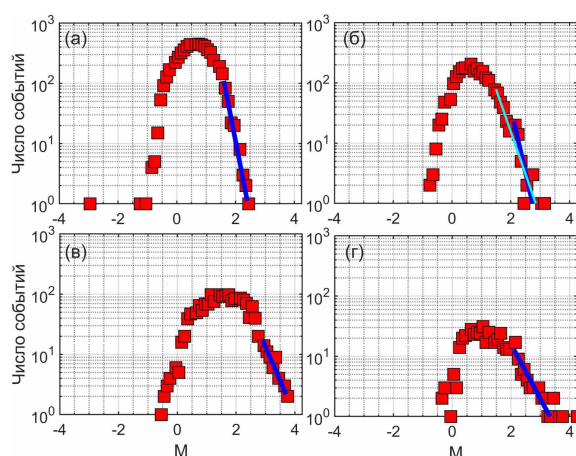


Рисунок 3 – графики повторяемости для четырех временных интервалов из [Lopez et al., 2012], (а) – период 1 из таблицы 1, (б) – период 2 из таблицы 1, (в) – период 3 из таблицы 1, (г) – период 4 из таблицы 1. На графике (в) синяя линия аппроксимация с представительной магнитудой 2.1, бирюзовая линия – с представительной магнитудой 1.5

3.4.2 Анализ сейсмичности

Определим среднюю представительную магнитуду для всего предэруптивного периода с уровнем значимости 0.05. Всего событий в участке 9981. Получены значения $M_c = 2.9$ и $b = 1.11 \pm 0.22$ (Рис. 4), однако визуальное значение M_c сильно завышено, это может быть вызвано искривлением графика из-за высокой неустойчивости M_c и b в этом периоде.

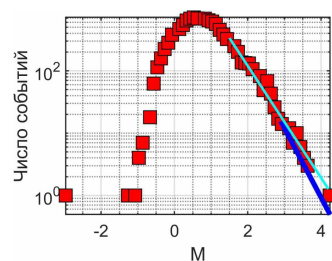


Рисунок 4 – график повторяемости для всего предэруптивного периода. Синяя линия – аппроксимация с порогом $M_c = 2.9$, бирюзовая линия – с порогом $M_c = 1.5$

Сейсмические события в предэруптивной фазе идут плотным, относительно равномерным потоком, без длительных периодов затишья (Рис. 5). Примерно, с 13 сентября прослеживается тренд роста максимальных магнитуд событий к 27 сентября. Хотя в районе 18 августа и 2 сентября наблюдаются выдающиеся всплески активности, учитывая общую плотность потока в остальной части периода, вероятно, имеет смысл рассматривать его как единое целое. Отметим, что сценарий предварительной инфляции вулканической постройки с последующими деформациями, говорящими об интрузии, очень похож на тот, что наблюдался в период длинного роя вулкана Августина.

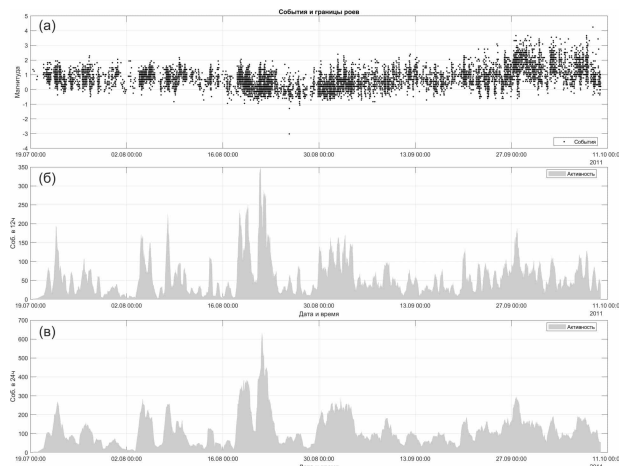


Рисунок 5 – графики активности предэруптивного периода с разными ширинами временного окна, (а) – распределение событий во времени, (б) – график активности с шириной окна 12 часов, (в) – график активности с шириной окна 24 часа

Параметры режима для всего периода представлены в таблице 2.

Таблица 2 – параметры для всего предэруптивного периода

	N	Длительность	M_c	N_c	$meanM$	$maxM$	b	E_{skew}	N_{skew}
18.07.2011 – 10.10.2011	9981	83 дня	1.5/2.9	1620	1.92	4.2	$0.90 \pm 0.03 /$ 1.11 ± 0.22	-4.68	-1.28

Обозначения см. таблицу 1 раздел 3.3

Проанализируем временные вариации M_c в окнах по 500 событий и сдвигом по 250 с уровнем значимости 0.05. В начале периода значение не превышает 1.5, но в конце поднимается до среднего 2.1 со скачком до 2.9 (Рис. 6). Поскольку в данном случае установление порога на максимальном уровне в вариациях (2.1) удалит практически все события из начала периода, построим графики с двумя порогами 1.5 и 2.1 (рис. 6). После отсеечения событий по порогу представительности профиль активности этого предэруптивного периода вулкана Иерро становится схож с профилем длинного роя вулкана Августина, но с удлинненной фазой кульминации. На основе этих сходств мы будем рассматривать всю сейсмичность этого периода как единый длинный рой подобно длинному рою вулкана Августина.

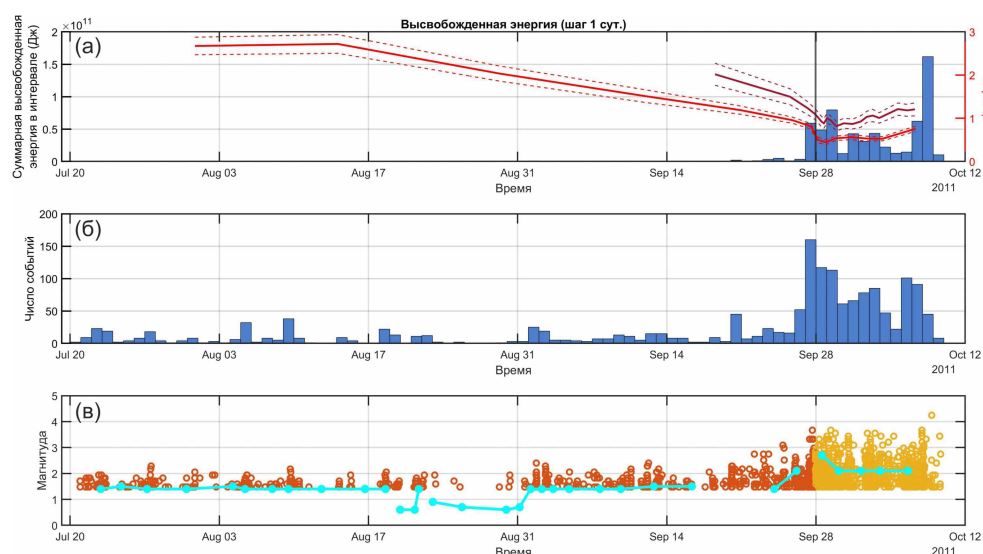


Рисунок 6 – графики для предэруптивного периода: (а) – график высвобождения суммарной сейсмической энергии во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, оранжевые кружки – события до времени центроида, желтые – события после времени центроида. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 200 событий и сдвигом 100 событий с порогом $M_c = 1.5$, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу; бордовой линией – вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 100 событий и сдвигом 25 событий с порогом $M_c = 2.1$. На графике (в) бирюзовой линией показана M_c округленная до первого знака после запятой, магнитуды событий показаны в исходном формате без округления, поэтому некоторые значения лежат ниже порога 1.5

На рисунке 6(а) видно экстремально высокие значения до 2.72 в начале мая, представим график повторяемости для этой фазы, чтобы убедиться, что это не результат искусственного методологического артефакта (Рис. 7).

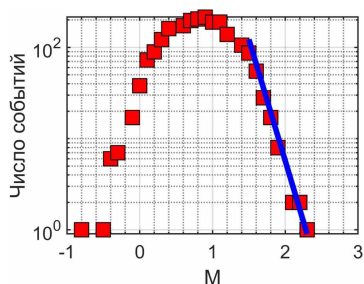


Рисунок 7 – график повторяемости первых 200 событий периода с порогом $M_c = 1.5$

Общие тренды поведения b -value сохраняются при обоих порогах – падение от экстремально высоких значений до аномально низких (0.82).

Ясно, что значения в период кульминации с порогом 1.5 будут занижены, а с порогом 2.1 событий на стадии активизации мая почти не останется. Поэтому представим общий график вариаций для двух фаз с использованием разных порогов представительности для этих периодов (рис. 8).

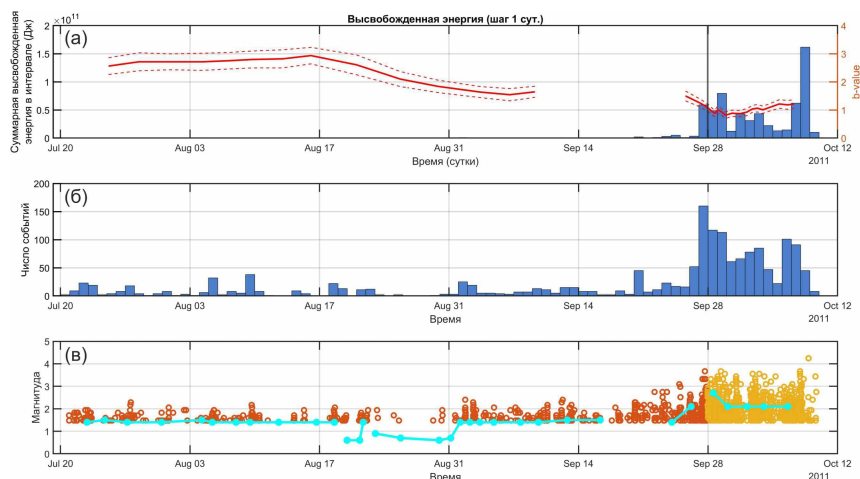


Рисунок 8 – графики для предэруптивного периода с порогом $M_c = 1.5$: (а) – график высвобождения суммарной сейсмической энергии во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, оранжевые кружки – события до времени центра, желтые – события после времени центра. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 100 событий и сдвигом 25 событий, первая часть с порогом $M_c = 1.5$, вторая с $M_c = 2.1$, дата разделения 18 сентября, пунктирные линии – погрешность оценки. На графике (в) бирюзовой линией показана M_c округленная до первого знака после запятой

Для контроля продемонстрируем несколько графиков повторяемости из первой и второй фаз (рис. 9).

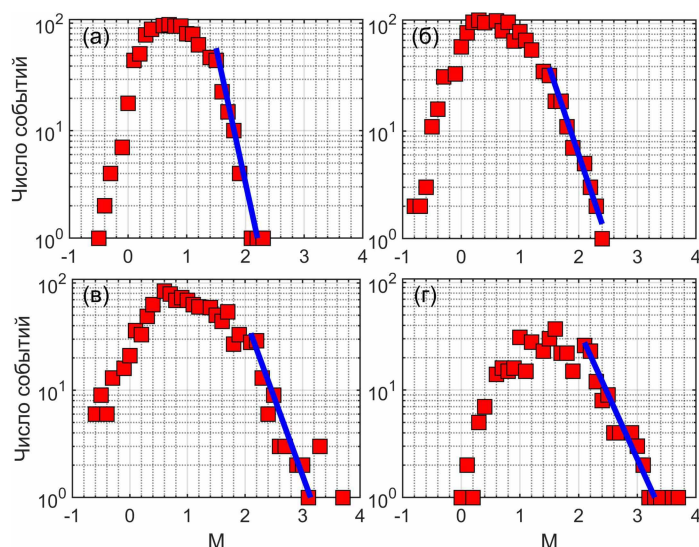


Рисунок 9 – выборочные графики повторяемости для двух фаз роя: (а) – соответствует первой точке первой фазы вариаций *b-value* на рисунке 8а, (б) – соответствует последней точке первой фазы вариаций *b-value* на рисунке 8а, (в) – соответствует первой точке второй фазы вариаций *b-value* на рисунке 8а, (г) – соответствует последней точке второй фазы вариаций *b-value* на рисунке 8а

Проверим статистическую значимость различий максимального и минимального значений с помощью Z-теста: $Z = \frac{|2.93 - 0.82|}{\sqrt{0.29^2 + 0.11^2}} = 6.80 > 1.96$, различие значимо на уровне $p < 0.05$.

Для рассматриваемого случая уже исследовались временные вариации *b-value* в ряде работ [Ibáñez et al., 2012], [Martí et al., 2013]. Авторы разделили сейсмичность приуроченную к этому извержению на три фазы: с 1 июля по 20 сентября, с 20 сентября по 15 октября, с 15 октября 2011 года до 1 января 2012 года, обозначим их цифрами (1, 2, 3). Дополнительно они также разделяют рой землетрясений на две фазы по высвобождению сейсмической энергии: фаза А совпадает с первой фазой из предыдущего деления и отвечает периоду с повышенной активностью и малыми магнитудами, фаза В с 20 сентября 2011 по январь 2012 включает сильнейшие события роя.

Для оценки представительной магнитуды *M_c* авторы в [Ibáñez et al., 2012] использовали метод максимальной кривизны и метод GFT90, а для оценки *b-value* использовался метод наименьших квадратов. Для расчета вариаций *b* во времени использовалось окно шириной 200

событий с 10% перекрытием. При этом не совсем ясно, с какой представительной магнитудой проводились расчеты вариаций. Также не описано, каким образом оценивалась погрешность значений b .

Авторы получают значение $b = 1.18 \pm 0.03$ для всего периода. В фазы А и В они сообщают о значениях 2.25 ± 0.05 и 1.24 ± 0.03 соответственно. В фазах 1, 2 и 3 получены значения: 2.25 ± 0.05 , 1.34 ± 0.04 и 1.12 ± 0.01 , соответственно. Далее также приводятся оценки для тех же периодов, рассчитанные методом взвешенных наименьших квадратов и методом максимального правдоподобия (MLM). Они отмечают, что результаты по методу MLM получаются очень низкими (менее 1 и близкие к 0.5) и отдают предпочтение результатам по методу наименьших квадратов. По нашему мнению, это является результатом заниженных оценок представительной магнитуды: для всего предэруптивного периода они дают значение $M_c = 1.3$, для фаз А и В значения 1.3 и 1.8 соответственно. Методы максимальной кривизны и GFT90 склонны занижать оценку представительной магнитуды на распределениях с сильно «скругленным» пиком, это можно пронаблюдать почти на всех графиках повторяемости, приведенных в работе [Ibáñez et al., 2012]. При этом они получили более адекватные оценки методом наименьших квадратов, потому что он не учитывает статистический вес точек гистограммы и оказался не чувствителен к «загибу» графика на малых магнитудах, в отличие от метода взвешенных наименьших квадратов и метода максимального правдоподобия. Также авторами рассчитаны значения b -value в 13 временных интервалах по 10 суток с 19 июля по 25 ноября, в каждом интервале рассчитывалась индивидуальная представительная магнитуда. Авторы получают значение $b = 3.01 \pm 0.21$ в период с 19 июля по 28 июля, далее значение в среднем держится на экстремально высоких цифрах до 28 августа, потом падает до 1.44 ± 0.09 , после чего почти постоянно снижается с некоторыми флуктуациями до значения 0.86 ± 0.05 к 16 октября.

Аналогичный результат получают авторы в [Marti et al., 2013] с расчетами по методу максимального правдоподобия и использованием магнитуды M_{bLg} , размеры окна и способы оценки погрешности не уточняются.

В статье [Roberts et al., 2016] для той же задачи предложен новый подход – метод итеративного сэмплирования: сперва используется стохастическое разделение каталога на подкаталоги со случайными размерами от 50 до 1000 событий, для каждого подкаталога рассчитывается представительная магнитуда, b -value и его погрешность. Это процесс повторяется много раз и затем строится распределение вероятности b -value во времени. Такой подход позволяет избежать субъективного выбора размеров окон и их расположения.

С помощью этого метода в [Roberts et al., 2016] были построены вариации b -value во времени для всего периода активности вулкана Иерро в 2011-ом году. Тут опишем только результаты, касающиеся предэруптивной фазы. Авторы показывают, что значение меняется не плавно, а периодически перескакивает между различными модами: в период с 19 июля по 20 сентября наблюдаются моды 1.0, 2.3, 3.2; в период с 20 сентября по 18 октября мода 1.5.

Наши результаты в среднем подтверждают результаты этих работ, по нашим расчетам в вариациях значение меняется в диапазоне от 2.93 до 0.82. Более детально гипотезы, предложенные в работе [Roberts et al., 2016] будут обсуждены в главе 4.

На рисунке 10 представлены распределения логарифма расстояний по времени между последовательными событиями и их декомпозиция гауссовым законом на два распределения для четырех периодов: для фазы активизации, для периода задолго до кульминации события, для периода прямо перед кульминацией и для периода кульминации. Положение распределения по горизонтальной оси практически не меняется в течение роя, но перед кульминацией увеличивается доля левой моды по сравнению с периодом активизации. Положения левой моды по горизонтали в четырех периодах: -2.35, -2.30, -2.32, -2.62, соответственно. Отметим, что аппроксимация бимодальным распределением предпочтительна в первом, втором и четвертом периодах. В третьем периоде распределение лучше описывается унимодальной формой, но, учитывая форму остальных распределений, можно заключить, что это является результатом подавляющего преобладания левой моды. Из этого можно заключить, что в период кульминации увеличивается временная кластеризация событий по сравнению с фазой активизации.

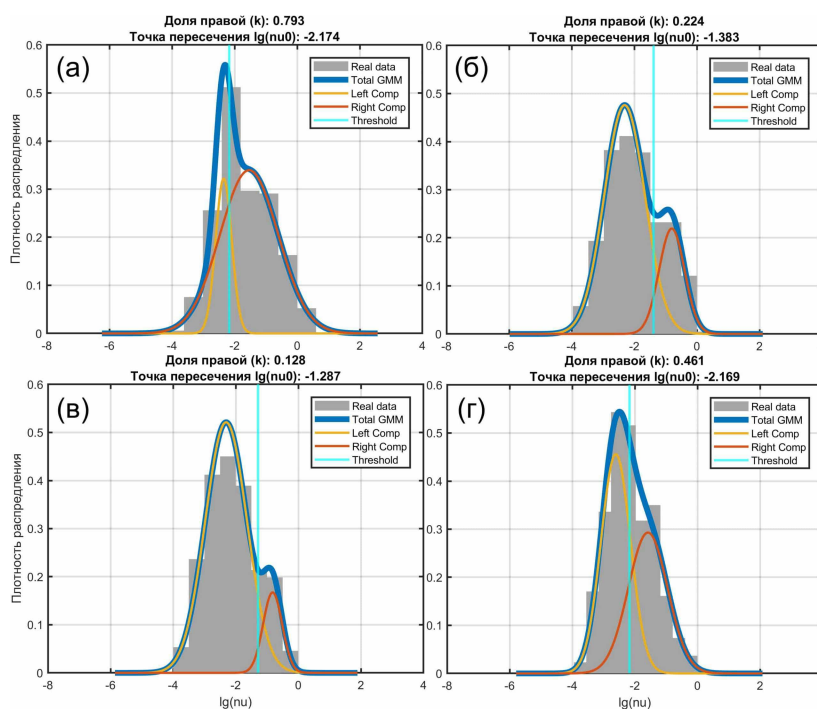


Рисунок 10 – распределения логарифма времен между последовательными событиями для 4 интервалов: (а) – период активизации с 18.07.2011 по 31.08.2011, (б) – с 31.08.2011 по 27.09.2011 – за длительный период перед кульминацией, (в) – с 17.09.2011 по 27.09.2011 – за короткий период перед кульминацией, (г) – с 18.09.2011 по 10.10.2011 в период кульминации. Для первых трех периодов порог представительности 1.5, для последнего 2.1

На рисунке 11 представлены графики изменения числа событий в единицу времени по мере приближения к времени центроида и отдаления от центроида. При аппроксимации модифицированным законом Омори получены оценки параметров: $c\text{-value} = 0.068$ суток, $p\text{-value} = 0.63$ по мере приближения к центроиду; и $c\text{-value} = 0.313$ суток, $p\text{-value} = 0.315$ по мере удаления от центроида.

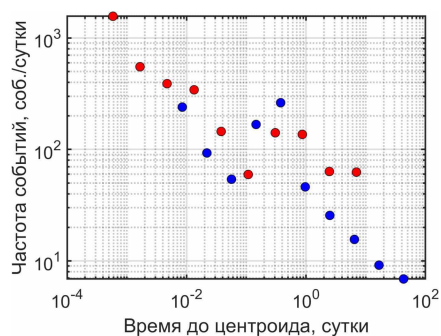


Рисунок 11 – изменения числа событий в единицу времени по мере приближения к времени центроида (синие кружки) и отдаления от центроида (красные кружки) с порогом $M_c = 1.5$

Резюме

Иерро – самый молодой вулкан в «горячей точке» Канарских островов. Извержение началось под водой 10 октября 2011 года, а первые признаки активизации проявились в июле 2011-го года. В предэруптивную фазу магма сперва накапливалась в более глубоком очаге 10-15 км, затем мигрировала на юг, после чего поднялась вверх во вторую камеру на глубине около 4.5 км, после чего прорвалась к поверхности. Первый очаг, предположительно, находится на границе мантии и коры, а второй в слое осадочных пород, накопленных до образования вулкана

Весь предэруптивный период рассматривался как единый во времени рой событий. Это было сделано на основе сходств сейсмических режимов и сценариев поверхностных деформаций с предэруптивной фазой извержения вулкана Августина 2006-го года, где вся сейсмичность этой фазы представлена в виде длинного роя. Кульминация роя Иерро была довольно затянутой в

отличие от длинного роя Августина, она началась около 28 сентября и длилась до 10 октября. С момента начала кульминации начался и подъем магмы от глубинного очага к поверхностному через толщу океанической коры, а от него к поверхности через слой изверженных пород вулканической постройки. Всего эта фаза длилась порядка 20 суток, а фаза от начала активизации до 26 сентября порядка 140 суток. Затянутость кульминации можно объяснить тем, что на самом деле во времени наложился процесс преодоления двух барьеров, первый – океаническая кора, прорыв которой начался 28 сентября после длительной фазы подготовки, второй – прорыв от неглубокого очага к поверхности. Это в некоторой степени можно увидеть на графике активности роя: с 6 по 10 октября наблюдается еще один всплеск высвобождения энергии и активности. Фазу прорыва к поверхности от верхнего очага как раз связывают с периодом с 8 по 12 октября.

Экстремально высокие значения *b-value* (до 2.93) наблюдаются в начальной фазе подготовки извержения, примерно, до 17 августа, после чего значение начинает спадать, в момент кульминации достигается минимальное значение: 0.82. Такой паттерн, как и экстремально высокое значение, подтверждаются рядом исследований с использованием различных типов магнитуд и методов. Такой паттерн удачно укладывается в модель Хилла: можно предположить, что 140 суток магма пыталась преодолеть барьер – толща коры, внедряясь в мелкие разрозненные дайки, не в состоянии продуцировать крупные землетрясения. Плотность этих внедрений постепенно росла и достигла некоторой критической величины к 26 сентября, после чего дайки стали объединяться в более крупные и одновременно с этим началось движение магмы вверх. В эту картину частично не укладывается миграция сейсмичности на юг и вглубь в начале сентября, однако в [González et al., 2013] указано, что продвижение интрузии при этом не подтверждается по деформациям, то есть облако сейсмичности сместилось, но магма при этом, возможно, не двигалась. Тогда это можно объяснить активацией другой зоны разломов, после того как прочие зоны уже «разрядились».

3.5 Вулкан Баурдарбунга

3.5.1 Обзор

Вулкан Баурдарбунга расположен на границе Евразийской и Северо-Американской плит в Исландии, он накрыт ледником Ватнайёкудль [Gudmundsson et al., 2016]. У вулкана есть система трещин, вытянутая на 115 км на юго-запад и на 55 км на север-северо-восток. Под центральной кальдерой расположена магматическая камера на глубине, примерно, 12 км [Gudmundsson et al., 2016].

На данный момент горячая точка Исландии расположена под ледником Ватнайёкудль [Panzera et al., 2015; Hudson et al., 2017; Einarsson et al., 1997; Martin et al., 2011], как раз, где расположен вулкан.

Повышенный уровень сейсмичности под центральной вулканической постройкой зафиксировали 16 августа 2014-го года. Затем облако сейсмичности, сопровождая магматическую дайку, продвинулось, примерно, на 41 км на северо-восток от центральной кальдеры [Gudmundsson et al., 2016]. После чего на дальнем конце дайки началось основное извержение, примерно, 29-го августа. Одновременно с активизацией сейсмичности фиксировали «сдувание» магматической камеры под центральным вулканом, а 20 августа сейсмическая активность под ним резко выросла и начался обвал (коллапс) кальдеры, сопровождающийся большим числом землетрясений с магнитудами от 4 до 5.8 [Gudmundsson et al., 2016].

Согласно отчету [Venzke, 2017] первые деформации и сейсмичность перед извержением были вызваны притоком магмы с глубин 10-15 км в область, откуда затем магма изверглась. То есть извержение было инициировано притоком магмы из глубин, а не запущено тектоникой. В пользу этого также говорит исследование [Hudson et al., 2017]. Авторы обнаружили четко выраженное скопление глубоких землетрясений на глубинах от 7 до 22 км, оно образует почти вертикальную колонну, а сейсмичность в ней наблюдалась еще более чем за два года до извержения 2014-го года. Авторы предполагают, что это сигнализирует о процессе накопления магмы в камере под вулканом, а колонна землетрясений отражает канал, по которому магма поступает из мантийного плюма в кору. Авторы считают, что сперва магматический расплав генерировался в ядре плюма на глубинах более 40 км, затем магма поднималась в кору под действием собственной плавучести или под давлением газа, выделяемого из магмы [Hudson et al., 2017]. К аналогичному выводу приходят авторы статьи [Geiger et al., 2016] на основе геохимического анализа лав.

Далее мы будем рассматривать сейсмичность, связанную именно с процессом интрузии в сторону плато Холухрейн, то есть за период с 18 августа 2014-го года по 29 августа 2014-го (Рис. 1).

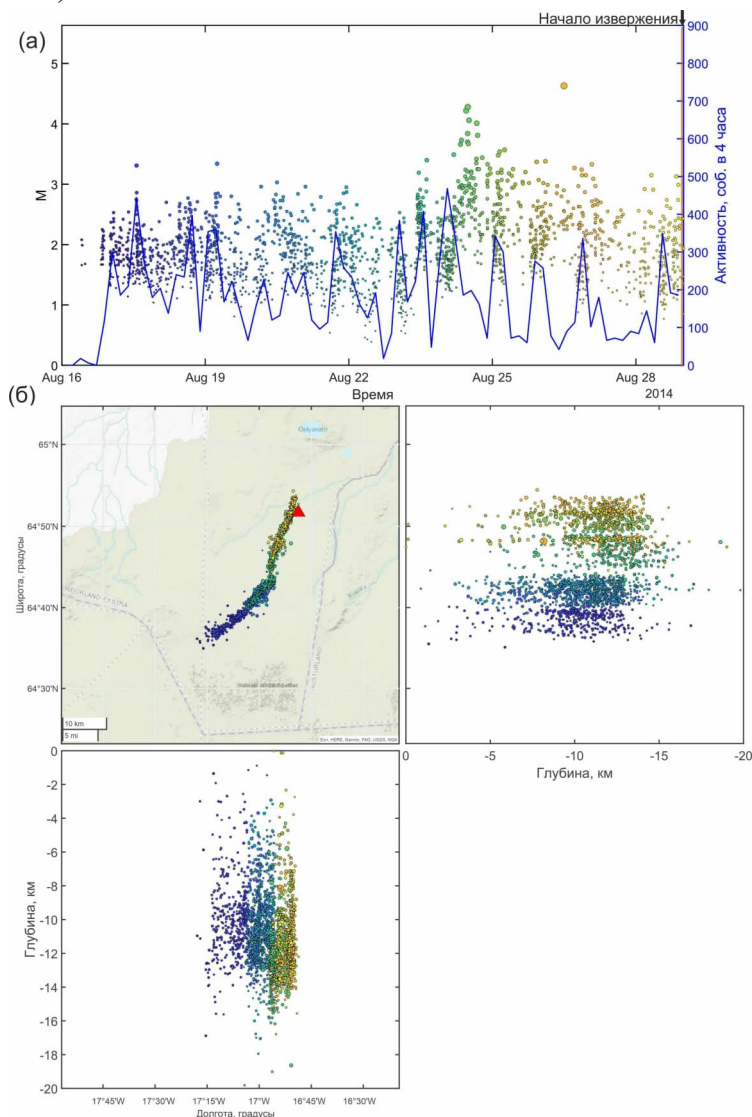


Рисунок 1 – события интрузии вулкана Баурдарбунга во время извержения 2014 года:

(а) – во времени, (б) – на карте, красный треугольник – примерное место извержения

В этом разделе используется каталог локальной сейсмической сети Исландии (SIL) (каталог доступен на сайте метеорологической службы Исландии hraun.vedur.is/ja/viku/). В оригинальном каталоге представлено два типа магнитуд: локальная магнитуда ML и второй, обозначенный буквой M . Официальную документацию к этим данным, где было бы указано, какой именно тип магнитуды обозначен как M , найти не удалось. Поэтому эта информация была восстановлена по публикациям, где используются те же данные. Например, работа [Panzera et al., 2015] посвящена как раз ревизии этого каталога. Там указано, что SIL – это новая сейсмическая сеть мониторинга, основанная в 1991 году,

которая изначально была создана для мониторинга сейсмичности в южной исландской сейсмической зоне (SISZ), но затем была расширена и стала национальной сейсмической сетью Исландии, включая 68 станций к 2013-ому году. Авторы исследовали оригинальный каталог сети с 1991 по 2013 год в районе SISZ и полуострова Рейкьянес. Они указывают, что SIL система использует два метода оценки магнитуды: первый локальная магнитуда (ML), второй – «локальная» моментная магнитуда (M_{LW}):

$$M_{LW} = m, m \leq 2.00$$

$$M_{LW} = 2.0 + (m - 2.00) * 0.9, 2.00 < m \leq 3.11$$

$$M_{LW} = 3.0 + (m - 0.89) * 0.8, 3.11 < m \leq 5.11$$

где $m = \log_{10} m_0 - 10$, а m_0 – сейсмический момент в Н*м. Соотношения для больших магнитуд тут не приводятся, поскольку в рассматриваемом участке каталога нет событий с магнитудами более 4.63. Из этого можно предположить, что вторая магнитуда в каталоге (обозначенная M) и есть локальная моментная магнитуда.

В этом разделе далее мы будем использовать формулы, приведенные в [Panzera et al., 2015], для вычисления сейсмического момента из M_{LW} , и магнитуду M_{LW} для расчета b -value.

Оценка представительной магнитуды для всего участка по магнитуде ML дает значение 2.1 с уровнем значимости 0.05, а $b = 1.18 \pm 0.18$ (Рис. 2). Рассмотрим вариации Mc во времени в окне шириной 500 событий, сдвигом 50 событий и уровнем значимости 0.05. Значение не превышает порога 2.0.

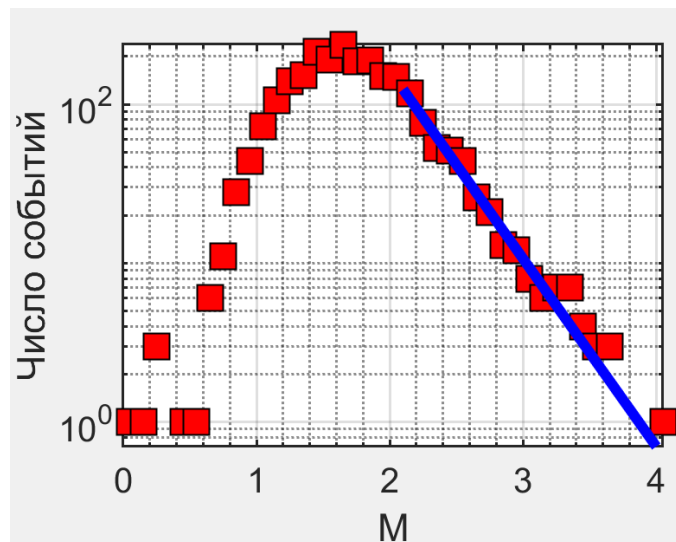


Рисунок 2 – график повторяемости для всего периода интрузии по магнитуде ML

Оценка представительной магнитуды для всего участка по магнитуде M_{LW} дает значение 2.7 с уровнем значимости 0.05, а $b = 1.26 \pm 0.21$ (Рис.3). В вариациях значение M_c не превышает порога 2.4.

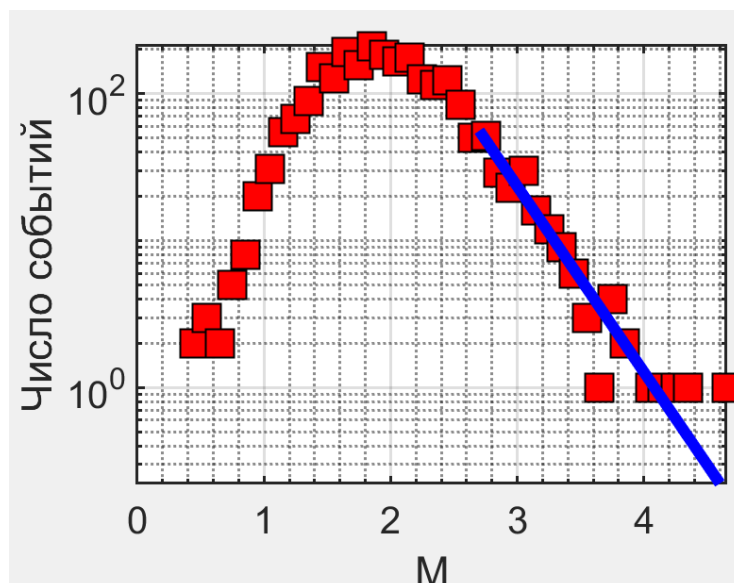


Рисунок 3 – график повторяемости для всего периода интрузии по магнитуде M_{LW}

В [Sigmundsson et al., 2015] эту интрузию описывают, как латеральное продвижение магмы по дайкам. В 2014 году реактивировалась система трещин на плато Холухрейн (Holuhraun) к северо-востоку от вулкана [Sigmundsson et al., 2015]. Интенсивный рой сейсмичности начался 16 августа 2014-го года у центрального вулкана. Одновременно по смещениям поверхности начали регистрировать сдувание центральной кальдеры и формирование дайки. Латеральный рост дайки сопровождался миграцией облака сейсмичности. Процесс интрузии происходил по сегментам и остановился, примерно, 27 августа. А первое истечение лавы произошло 29 августа на конце дайки.

Авторы в [Sigmundsson et al., 2015] подробно анализируют развитие интрузии. По деформациям авторы приходят к выводу, что дайка должна быть, примерно, вертикальной. Они моделируют дайку как набор прямоугольных сегментов, направление каждого сегмента находилось из соображения минимизации полной потенциальной энергии, которая складывалась из гравитационной энергии и энергии напряжений. То есть показано, что дайка будет расти в том направлении, где она сможет максимально эффективно сбросить напряжения и совершить наименьшую работу против силы тяжести. Интересно, что внедряющаяся магма, как оказалось в результате моделирования, скорее находится ближе к поверхности, чем сейсмичность, которую она инициирует.

Авторы обнаруживают, что пространственное распределение высвобожденного сейсмического момента и объема внедрившейся магмы вдоль дайки неоднородно. Максимальные значения этих параметров сосредоточены на тех участках (сегментах), где латеральное продвижение фронта дайки временно останавливалось. Самая длинная пауза наблюдается с 19 по 23 августа и коррелирует с моментом, когда дайка натолкнулась на повышение литостатического давления. Хотя [Sigmundsson et al., 2015] классифицируют эту интрузию как "rifting event", анализ текста показывает, что непосредственным драйвером процесса выступало активное внедрение магмы под избыточным давлением («excess pressure»). Именно преодоление барьеров за счет роста давления магмы определяло латеральный рост дайки. Таким образом, в данном эпизоде активная интрузия являлась механизмом, реализующим рифтинг, а не просто пассивным заполнением трещин, вызванных растяжением коры.

Рассмотрим активность периода интрузии (Рис. 4). Сейсмичность представлена эпизодами повышенной активности, которые идут практически равномерно во времени без выраженных периодов затиший. Поэтому весь период, вероятно, стоит рассматривать как единый роевой процесс.

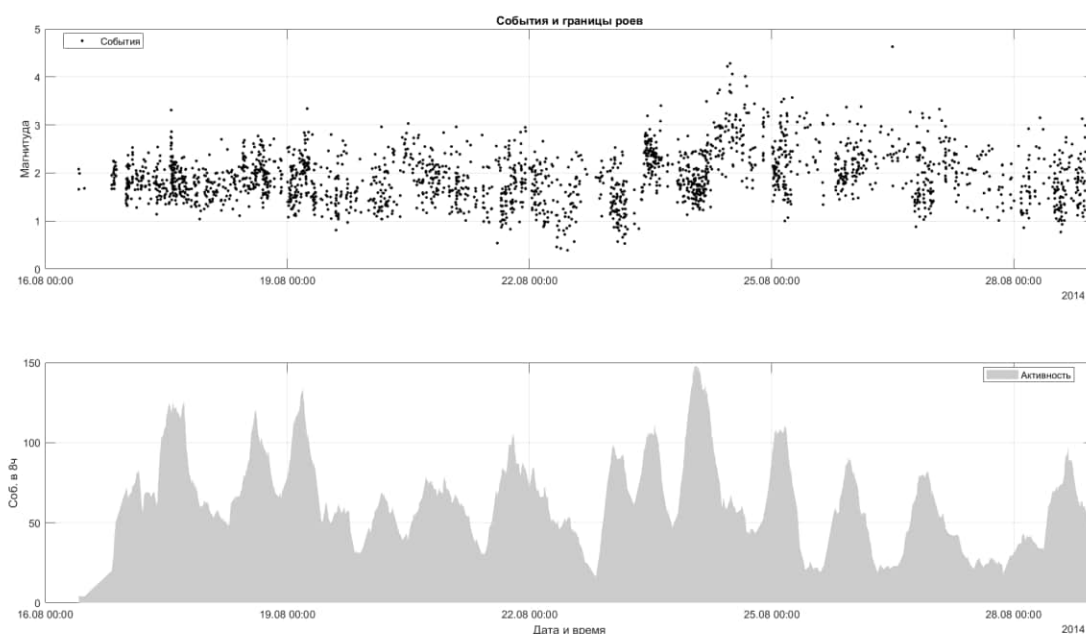
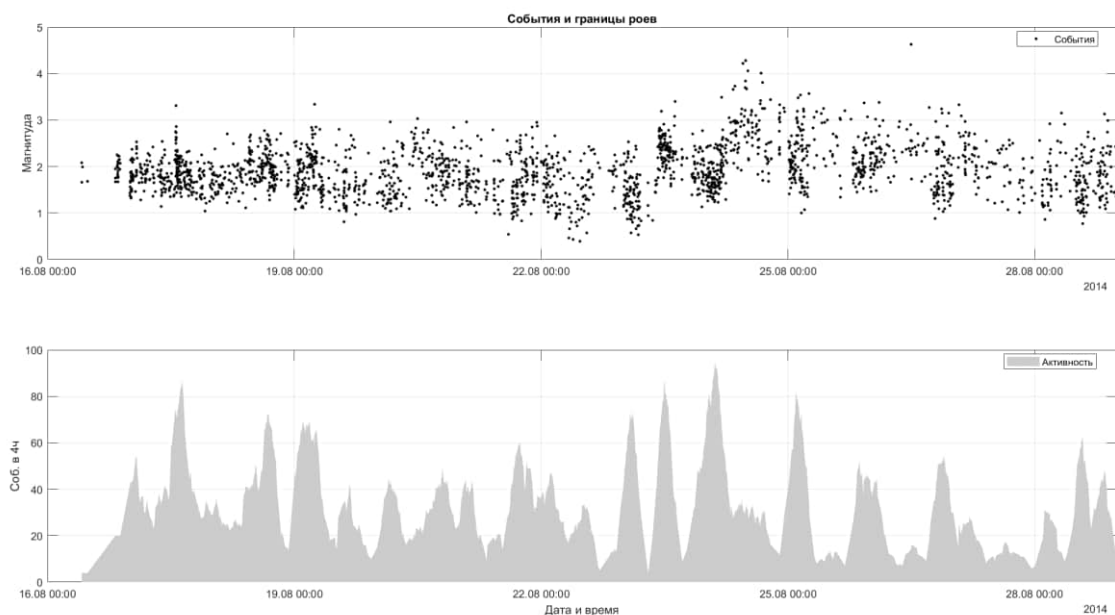


Рисунок 4 – сейсмическая активность в период интрузии вулкана Баурдарбунга 2014 года с разными ширинами временных окон



Продолжение рисунка 4

Сперва разобьем период на три крупных интервала для создания общего представления о сейсмическом режиме (табл. 1). Графики повторяемости для трех последовательных интервалов представлены на рисунке 5. В начале периода наблюдается повышенное значение b -value, которое затем снижается до «классических». Представительность резко ухудшается в конце интрузии, что может говорить о забивании сети из-за роста активности либо о смещении нескольких различных режимов сейсмичности, то есть нестационарности режима во времени.

Таблица 1. Параметры трех интервалов периода интрузии вулкана Баурдарбунга 2014-г года

Номер периода	Период	N	M_c	N_c	b
1	с 16 августа	629	2.1	183	1.69 ± 0.22
2	19.08.2014 07:46:32 - 23 августа	609	2.0	185	1.10 ± 0.35
3	до 29 августа	1099	2.8	120	1.11 ± 0.25

N – число событий, M_c – представительная магнитуда, N_c – число представительных событий, b – наклон графика повторяемости

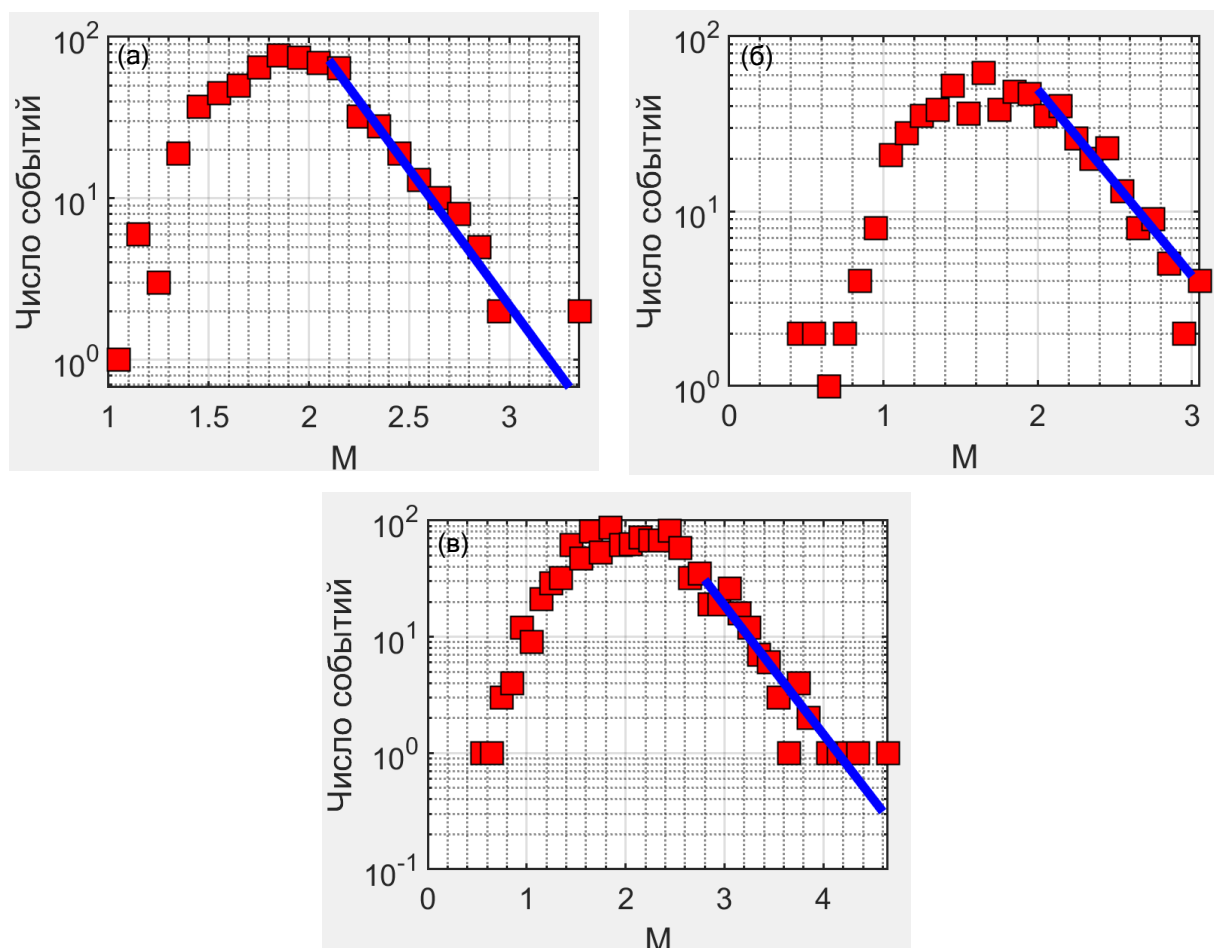


Рисунок 5 – графики повторяемости для трех интервалов периода интрузии, буквы (а, б, в) соответствуют строкам таблицы 1 в порядке сверху вниз

3.5.2 Анализ сейсмичности

На основе локальных временных вариаций представительной магнитуды во времени в качестве порога для всего периода выберем значение 2.4 (Рис. 6(в)), так как значение по большим периодам может быть завышено из-за смещения режимов сейсмичности с различными магнитудно-частотными распределениями.

Таблица 2. Параметры роя периода интрузии вулкана Баурдарбунга

Период	N	M_c	N_c	b -value	M_{max}	$\bar{M}$	M_{0skew}	N_{skew}
2014.08.16 – 2014.08.29	2337	2.4	379	1.27 ± 0.07	4.63	2.75	-0.69	-0.70

N – число событий, M_c – представительная магнитуда, N_c – число представительных событий, b – наклон графика повторяемости, M_{0skew} – коэффициент асимметрии высвобождения сейсмической энергии, N_{skew} – коэффициент асимметрии профиля активности

Временные вариации b -value и профили роя представлены на рисунке 6.

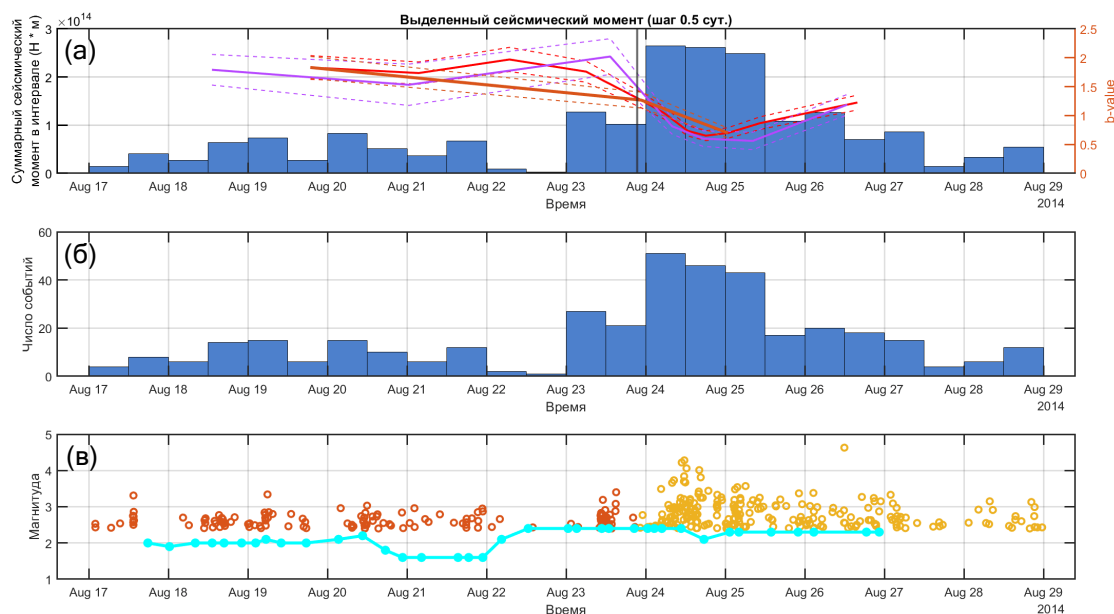


Рисунок 6 – графики для роя интрузии вулкана Баурдарбунга: (а) – график высвобождения суммарного сейсмического момента во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, оранжевые кружки – события до времени центроида, желтые – события после времени центроида. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 100 событий и сдвигом 25 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу; фиолетовая линия – окно 50 и сдвигом 50; оранжевая линия – окно 100 событий, сдвиг 100 событий. На графике (в) бирюзовой линией показаны вариации M_s во времени

На всех трех вариантах вариаций b -value сохраняется общий тренд падения значения к моменту кульминации роя. Параметр держится на экстремально высоких значениях (максимальное 2.02 с окнами шириной 50 событий) на протяжении периода, примерно, до 23 августа, затем спадает в районе 24-25 августа до низких значений (минимальное 0.56 с окнами шириной 50 событий), именно когда наблюдается пик высвобождения энергии и активности.

Приведем графики повторяемости, соответствующие окнам шириной 100 событий с максимальным и минимальным значениями при сдвиге 25 событий (Рис. 7). Во втором случае такое низкое значение может быть обусловлено заниженной представительной магнитудой.

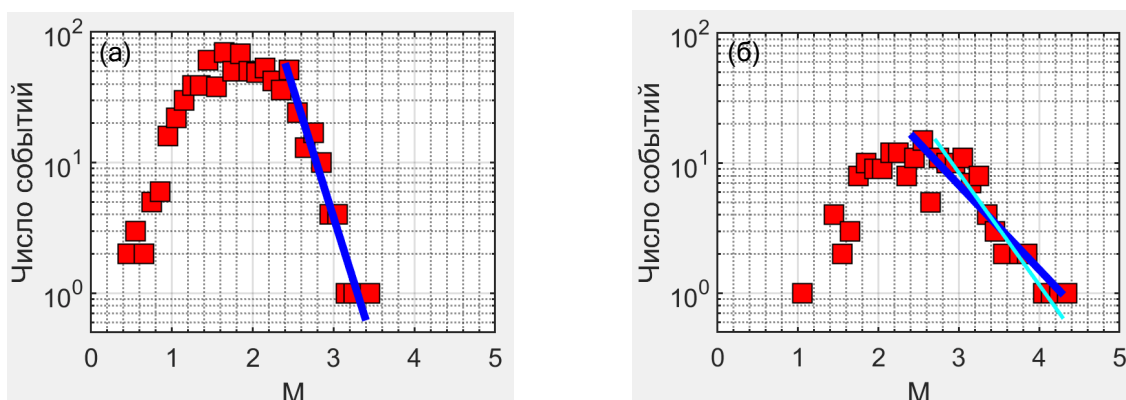


Рисунок 7 – графики повторяемости для окон шириной 100 представительных событий, соответствующих максимальному и минимальному значениям. (а) – в первом окне значение $b = 1.97 \pm 0.21$, (б) – $b = 0.65 \pm 0.08$ с порогом $M_c = 2.4$ (синяя линия) и $b = 0.86 \pm 0.12$ с порогом $M_c = 2.7$ (бирюзовая линия)

Проверим можно ли объяснить падение значения во втором окне только занижением порога представительности, искусственно повысив его. Локальная переоценка в этом окне дает $M_c = 2.7$. Оценим значение b с таким порогом, хотя это и уменьшит число представительных событий в этом окне. Переоценка M_c немного повышает результат, но различие b -value между частями роя все еще остается значимым. Проверим это с помощью Z-теста: $Z = \frac{|1.97 - 0.82|}{\sqrt{0.21^2 + 0.12^2}} = 4.75 > 1.96$, различие значимо на уровне $p < 0.05$.

Также приведем графики повторяемости в трех неперекрывающихся окнах шириной 100 событий (Рис. 8).

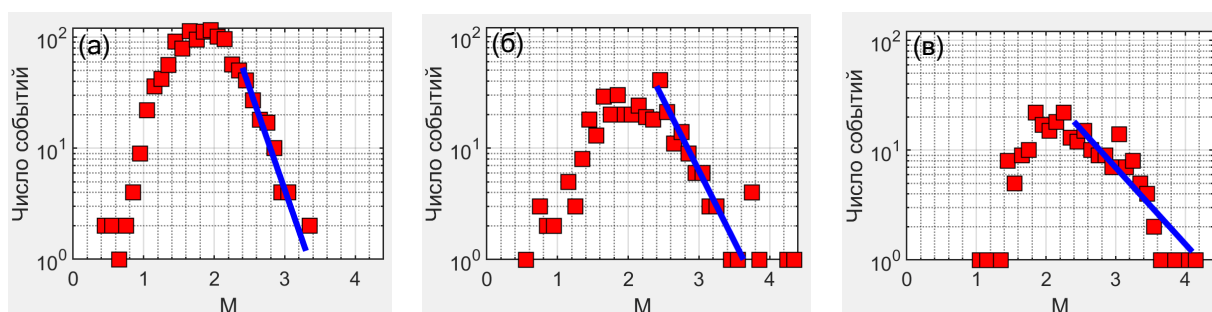


Рисунок 8 – графики повторяемости для трех последовательных неперекрывающихся окон шириной 100 представительных событий. В первом окне значение $b = 1.83 \pm 0.19$, во втором $b = 1.27 \pm 0.14$, в третьем $b = 0.70 \pm 0.08$

Несмотря на отмеченную [Sigmundsson et al., 2015] сегментированность интрузии, вариации b -value отражают макромасштаб процесса. Выявленный нами максимум b -value (до 2.02) в период 20–23 августа соотносится с периодом самой длинной остановки фронта

интрузии перед крупным структурным барьером. В это время, предположительно, происходило разрушение барьера на микро-уровне. Отметим, что фазы стагнаций и продвижений интрузии определялись в основном по миграции облака сейсмичности, что в общем случае не совсем корректно, так как, исходя из моделей инициации вулканических роев, ясно, что сейсмические события могут происходить и в стороне от области самой интрузии, а также могут как отставать от её фронта, так и обгонять его. Последующий спад *b-value* до 0.6–0.7 (24–25 августа), сопровождавшийся ростом сейсмического момента, маркирует момент преодоления барьера и переход системы к магистральному разрушению и консолидации канала. Более мелкие аномалии *b-value*, связанные с другими сегментами, вероятно, слишком коротки, чтобы их можно было обнаружить в нашем анализе. К тому же нам пришлось выставить достаточно большой порог представительности для всего роя, который удалил большое число событий из начальной фазы интрузии, уменьшив разрешающую способность. Обнаруженная аномалия, видимо, соответствует прорыву самого крупного барьера после 23 августа. Ясно, что сейсмичность после кульминации, связанной с этим прорывом, вероятно, вызвана последующим продвижением дайки. Поскольку по сейсмическому режиму мы не можем установить четкие границы завершения сейсмического отклика только на прохождение крупнейшего барьера, далее будем считать весь этот период в целом будем считать одним роем. Отметим, что удаление последующих событий из конца периода только усилит отрицательную асимметрию временных профилей этого периода.

Анализ вариаций *b-value* для этого случая также проводился в [Greenfield et al., 2020]. Авторы использовали новый каталог, записанный локальной сетью станций Кембриджского университета в центральном районе Исландии. Ими была разработана локальная магнитуда конкретно для этого региона, она сходна с локальной магнитудой сети SIL, но недооценивает силу крупных событий по сравнению с магнитудой M_{LW} . Для оценки представительной магнитуды авторы использовали метод MBS, для расчета *b-value* метод Аки [Aki, 1965; Utsu, 1965], для оценки погрешности *b* метод Ши и Болта [Shi, Bolt, 1982]. Для оценки вариаций *b-value* во времени они используют вероятностный подход с окнами случайных размеров из работы [Roberts et al., 2016].

В среднем для событий интрузии вулкана Баурдарбунга они получают значение $b = 1.43 \pm 0.03$. Представленная ими картина вариаций оказывается подробней, чем полученная в данной работе. Авторы отмечают высокое значение в самом начале интрузии (~ 3), которое затем падает до более низкого (~ 2) в конце интрузии. Очень высокое значение в начале роя (16-17 августа) авторы связывают с тем, что сперва магма поднималась по глубинному

узкому каналу, содержащему расплав пород, что не позволяло происходить крупным событиям. Авторы отмечают, что можно было ожидать, что в паузах между периодами продвижения дайки b -value должно было бы падать из-за нарастания напряжений вокруг дайки, а в моменты продвижения наоборот расти, так как напряжения сбрасываются. Однако на деле оказалось, что это не всегда так: некоторые периоды продвижения имеют сниженное значение, а некоторые повышенное, а некоторые не влияют на b -value вовсе. В период самой длинной паузы (20-23 августа) они отмечают постепенный спад значения b , в конце паузы b -value флуктуирует, но минимум значения достигается прямо перед следующей фазой продвижения. Качественно это совпадает с нашим результатом, выявленную нами поведение, вероятно, можно увидеть на их картине при усреднении. В их картине появляются значительные локальные колебания: максимальное значение (~ 3) достигается 23 августа, а минимальное (~ 1) в середине 24 августа. Они указывают, что подобный сценарий можно выявить для 9 из 17 фаз продвижения интрузии. В работе [Greenfield et al., 2020] показано, что на период с 23 по 25 августа приходится серия прорывов с относительно короткими паузами, вероятно, по сравнению с длительной паузой перед этим их можно объединить в единый крупный прорыв.

Значительно более высокие абсолютные значения b -value по сравнению с нашими, вероятно, можно объяснить тем, что в [Greenfield et al., 2020] использовалась локальная магнитуда, которая недооценивает силу крупных событий, что может привести к завышению наклона графика повторяемости.

На рисунке 9 показан график изменения числа событий в единицу времени по мере приближения к кульминации во времени. При аппроксимации степенным законом, подобным модифицированному закону Омори: c -value стремится к 0, p -value = 0.472.

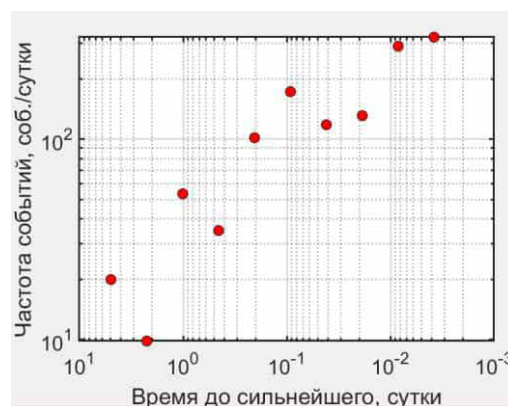


Рисунок 9 – график изменения частоты событий во времени по мере приближения к дате 24.08.2014 11:40:20 – моменту сильнейшего события в момент прорыва после самой долгой паузы 20-23 августа

На рисунке 10 представлены распределения логарифма времен задержек до следующего события для трех интервалов времени: на стадии стагнации интрузии – до 23 августа, на стадии до сильнейшего события кульминации в момент прорыва после этой фазы стагнации, и в период всей кульминации. Во всех случаях распределение лучше аппроксимируется одномодальным распределением, чем бимодальным, что не позволяет сделать выводов о степени кластеризации (на рисунках все равно представлена аппроксимация бимодальным гауссовым распределением, но в данном случае она не удовлетворительна).

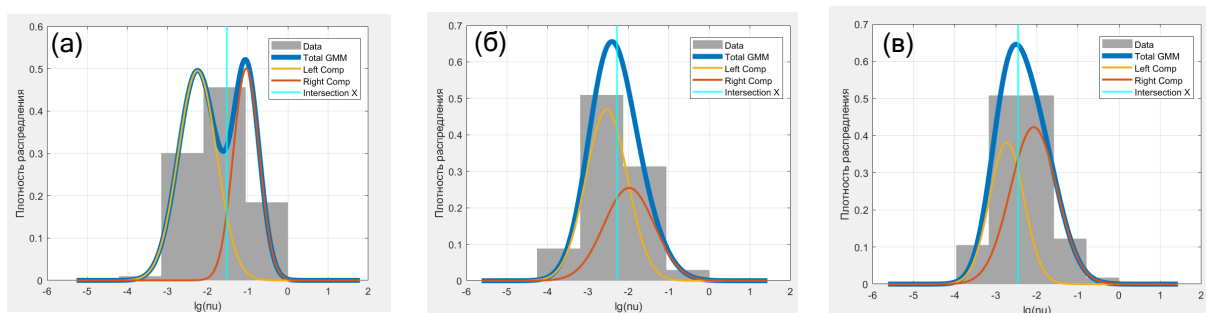


Рисунок 10 – распределения логарифма времен задержек между событиями: (а) – период до 23 августа, (б) – период с 23 августа по 24 августа 11:40:10, (в) – с 23 августа по 25 августа

Резюме

Хотя вулкан Баурдарбунга находится в рифтовой зоне, первопричиной извержения, видимо, является поступление новой порции магмы от мантийного плюма, центр которого на данный момент находится именно под этим вулканом. То есть сперва повысилось давление магмы в системе вулкана, а затем она под его воздействием начала прокладывать путь к поверхности, хотя и, вероятно, по ослабленной тектоническим растяжением зоне.

Интрузия вытянулась на 41 км на северо-восток от центральной кальдеры, и представляла собой плоско-вертикальную трещину, растущую латерально. Ее рост сопровождался мигрирующим облаком сейсмичности, однако землетрясения концентрировались глубже, чем располагалась сама интрузия [Sigmundsson et al., 2015].

Дайка росла на протяжении 15 дней, проходя несколько стадий стагнаций и прорывов, которые авторы в [Sigmundsson et al., 2015] связывают с преодолением энергетических барьеров. Самая длинная пауза пришлась на период с 20 по 23 августа, когда, предположительно, интрузия натолкнулась на крупное повышение литостатического

давления [Sigmundsson et al., 2015]. Именно в этот период мы наблюдаем экстремально высокие значения *b-value* (до 2.02). Дальнейший прорыв магмы приходится на 24-25 августа, в этот период наблюдается кульминация роя – пик высвобождения энергии и активности, это коррелирует с падением *b-value* до низких (0.6-0.7) значений.

Полученный результат в среднем сопоставим с результатами исследования [Greenfield et al., 2020], где описывается тренд падения *b-value* от высоких значений к низким в периоды стагнации продвижения дайки на 9 из 17 случаев. Авторы отмечают, что такой сценарий не удовлетворяет известной гипотезе о том, что *b-value* снижается при повышении напряжений в породах, что наталкивает на мысль, что в данном случае временные вариации *b-value* вызваны другим эффектом.

Инtruзия Баурдарбунга является важным дополнением формирующейся картины, позволяя сопоставить фазы стагнации и продвижения инtruзии с изменениями параметров сейсмического режима. В среднем, фазе стагнации отвечает экстремально высокое значение наклона графика повторяемости, а на фазу прорыва приходится кульминация активности и высвобождения энергии, сопровождающаяся падением параметра *b*.

Сейсмический режим этого инtruзивного эпизода был исследован нами в работе [Греков, 2025], в частности рассматривались вариации наклона графика повторяемости во времени, а также изменения степени кластеризации во времени, и проводились сопоставления с фоновым режимом той же области. Также там выделен рассматриваемый здесь период с отрицательной временной асимметрией высвобождения энергии.

3.6 Вулкан Миякедзима

3.6.1 Обзор

Миякедзима – это активный базальтовый вулкан на севере архипелага островов Изу [Uhira et al., 2005]. Первые признаки аккумуляции магмы под островом Мияке перед извержением проявились 26 июня 2000-го года [Uhira et al., 2005], когда под вулканом начался рой землетрясений. Рой мигрировал в сторону острова Кодзу и продлился, примерно, до сентября, так и не приведя к извержению в области облака сейсмичности.

Цепь островов Изу лежит на Филиппинской плите, под которую погружается Тихоокеанская плита, а Филиппинская плита в свою очередь погружается под Евразийскую плиту [Passarelli et al., 2015]. Область интрузии находилась в условиях регионального растяжения вдоль оси Северо-Восток–Юго-Запад [Passarelli et al., 2015], авторы отмечают, что ни одно из землетрясений в области интрузии не имело чисто надвиговых механизмов, что согласуется с общим тектоническим растяжением области. Это, вероятно, является результатом задугового рифтинга в области островов Изу [Nishimura, 2011], [Taylor, 1992]. На рисунке 1 показаны смещения GPS датчиков в области этой зоны относительно Филиппинской плиты.

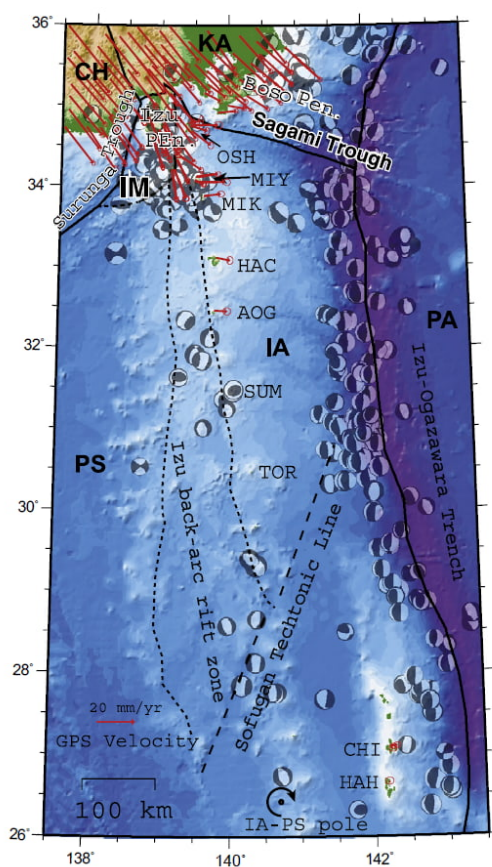


Рисунок 1 – карта смещений GPS датчиков относительно Филиппинской плиты из работы [Nishimura, 2011]

Видно, что в области острова Мияке (MIY) смещения (красные стрелки) направлены в почти противоположные стороны, создавая зону растяжения. Согласно [Taylor, 1992] это зона находится в стадии активного рифтинга, которая началась около 2 млн лет назад. По современным данным авторы говорят о скорости рифтинга 9 мм в год в области Миякедзимы [Nishimura, 2011], эта область является самой активной частью дуги. [Nishimura, 2011] предполагает наличие зоны растягивающих напряжений в этой рифтовой зоне.

В [Toda et al., 2002] исследуется период интрузии с 26.06.2000 по 25.08.2000 во время извержения вулкана Миякедзима. В период интрузии присутствуют относительно крупные события: 5 событий с магнитудами более 6 вплоть до 6.5. В работе [Toda et al., 2002] утверждается, что, не смотря на присутствие вулканических роев, у этих событий есть афтершоковые последовательности, но затухают они, значительно быстрее, чем в тектонической сейсмичности. Авторы объясняют это связью длительностей афтершоковых серий со скоростью накопления напряжений.

В [Yamaoka et al., 2005] периодом интрузии считается интервал с 26 июня до 7 июля. Вулканизм начался со слабого подводного извержения на следующий день после начала сейсмической активизации 27 июня [Nakada et al., 2005], а продолжился взрывами уже на вершине вулкана в июле и августе. В [Nakada et al., 2005] выделяют 4 стадии извержения. Первая также с 26 июня по 7 июля – стадия интрузии, сопровождалась миграцией сейсмичности и деформациями. Сейсмичность в основном концентрировалась в стороне от вулканической постройки под водой на линии между островами Мияке и Кодзу. Два GPS датчика раздвигались в стороны от линии сейсмичности в юго-западном и северо-восточном направлениях [Yamaoka et al., 2005]. Авторы в [Uhira et al., 2005] тоже сообщают об интрузии магмы к западу от Миякедзимы. Всплески сейсмичности и деформации в этой области интрузии продолжались вплоть до середины августа [Yamaoka et al., 2005; Nakada et al., 2005]. Само извержение в кратере вулкана началось 8 июля [Kumagai, 2001], с 11 июля по 18 августа наблюдались только слабые эруптивные эпизоды с выбросами пепла. Сейсмичность между островами Мияке и Кодзу стала затухать с 18 августа, после самого сильного эруптивного эпизода в центральном вулкане. Авторы в [Kumagai, 2001] отмечают, что рой вулкано-тектонических событий между островами мог быть вызван оттоком магмы из магматической камеры под островом Мияке, который носил эпизодический характер.

В работе [Yamaoka et al., 2005] приводится модель источника, объясняющая смещение GPS датчиков. Наилучшим вариантом, по мнению, авторов является модель дайки с глубоким магматическим источником под областью интрузии, то есть интрузия подпитывалась не только очагом под островом Мияке (Рис. 2).

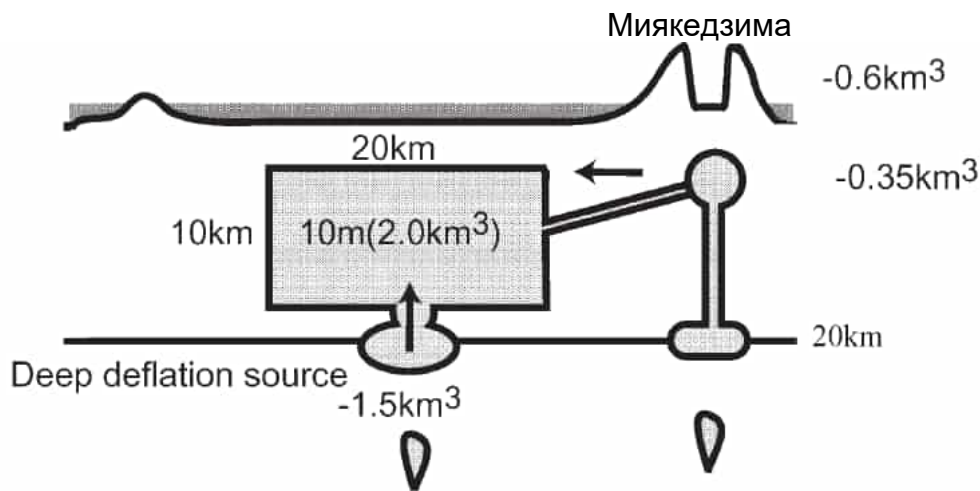


Рисунок 2 – схема модели питания интрузии вулкана Миякедзима в 2000-ом году из работы [Yamaoka et al., 2005]

Поскольку сейсмичность и деформации в области интрузии продолжались до 18 августа, будем рассматривать область интрузии в период с 26.06.2000 по 18.08.2000, как и в [Nakada et al., 2005]. Интрузия продолжалась почти 2 месяца, в течение которых сейсмичность мигрировала туда и обратно вдоль линейной структуры [Yamaoka et al., 2005], инициируя эпизоды повышенной активности, которые мы и будем считать роями (Рис. 3).

В этом разделе рассматривается регион: от 33.9 до 34.5 по широте, от 139 до 139.6 по долготе. Для анализа сейсмичности этой интрузии в данном разделе используется Японского метеорологического агентства (Japan Meteorological Agency, JMA) [JMA, 2023].

В каталоге присутствуют два столбца магнитуд, для каждого из которых указан тип магнитуды. Для всех событий заполнен первый столбец, второй столбец пустой для большинства событий, вероятно, первый столбец – предпочтительная магнитуда. Для исследуемого периода в первом столбце в основном приведены магнитуды типа MV/Mv (Velocity), но для некоторых самых сильных приведены магнитуды MD/Md (Displacement) и MJ (Рис. 4). Хотя в справке к каталогу нет прямого указания, что эти шкалы магнитуд сведены друг к другу, упоминание этого факта можно найти в ряде работ: [Umino, Sacks, 1993], [Uchide, Imanishi, 2018], [Сафонов, 2025].

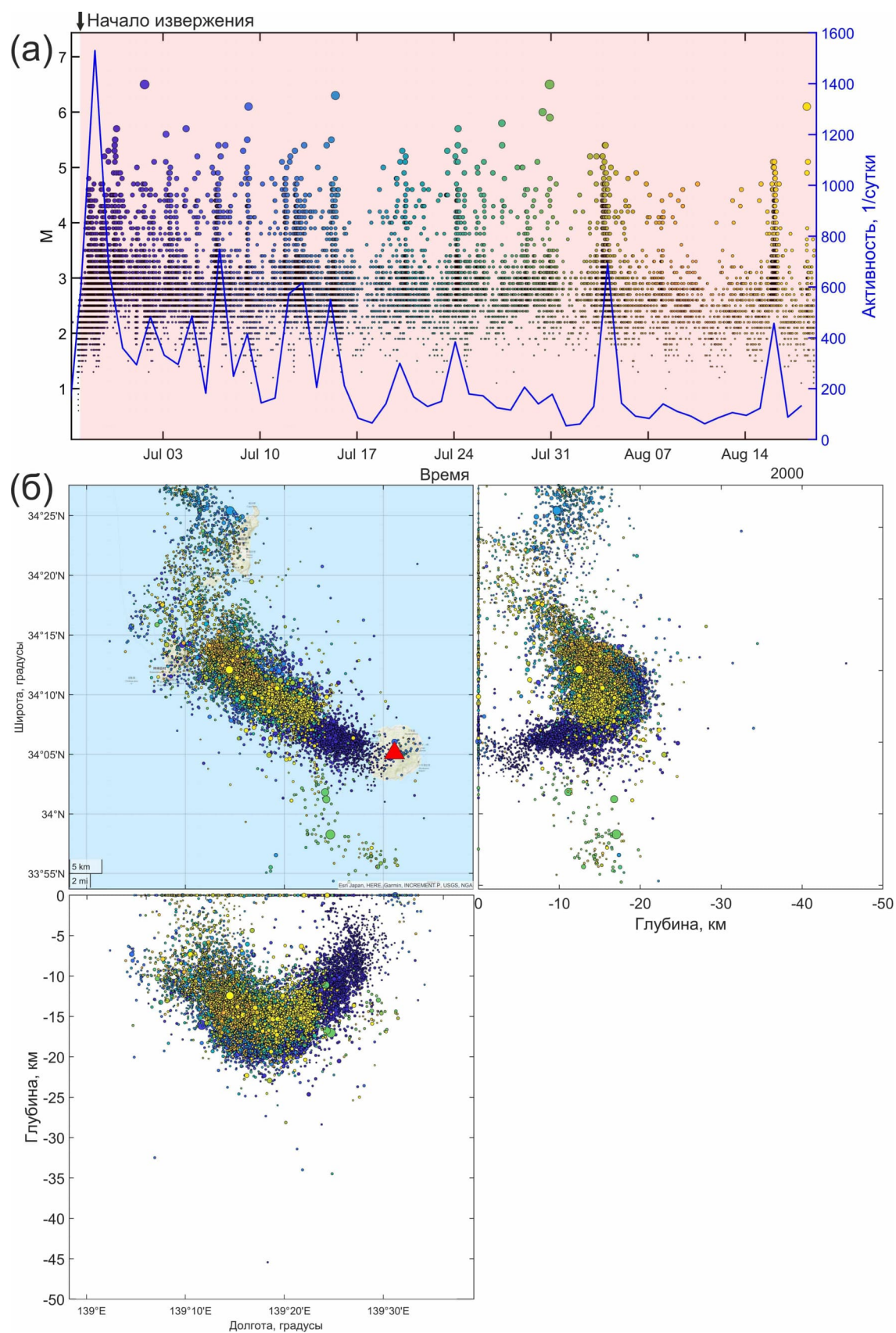


Рисунок 3 – распределение событий периода интрузии в пространстве и времени

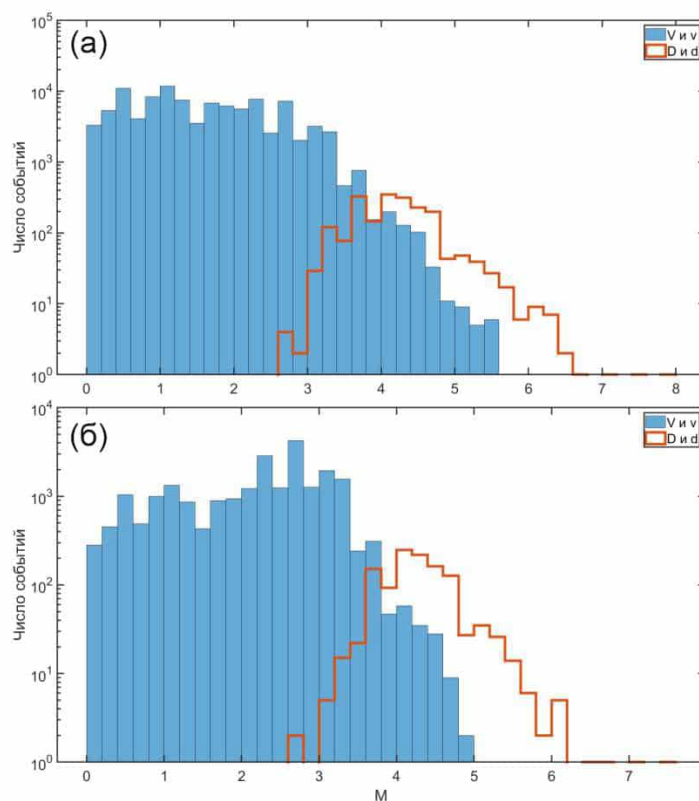


Рисунок 4 – числа событий с типами магнитуд V и v, и D и d: (а) – для всего каталога, (б) – для событий интрузии

В технической заметке агентства [Harada et al., 2004] указано, что был период времени, когда шкалы расходились: MV была занижена для более сильных землетрясений относительно MD, а для слабых MV завышено относительно MD. Чтобы решить эту проблему они ввели новые формулы для оценки MD и MV. Хотя в этой заметке не указано прямо, что магнитуды были пересчитаны также и в прошлое, можно прийти к этому выводу на основе того факта, что даже в 2000 году для многих событий содержится два типа магнитуд и приведено два столбца (3193 события из 109967 имеют второй тип магнитуды в 2000 году), а, согласно заметке, до пересчета в каталоге всегда указывалась одна магнитуда. В заметке указано, что новые формулы давали такой же результат для магнитуд 5 и выше, но более низкий для событий 4 и меньше по сравнению со старой формулой, поэтому в некоторых малых областях пространства закон повторяемости может отклоняться от линейной формы.

Графики повторяемости за период интрузии имеют явную аномалию в области событий с магнитудами 4 (Рис. 5).

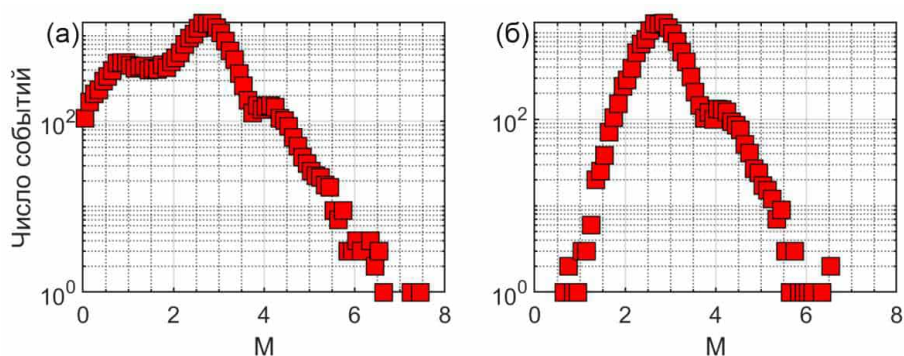


Рисунок 5 – графики повторяемости: (а) – по всему каталогу за период интрузии, (б) – в области интрузии за период интрузии с использованием магнитуд из первого столбца каталога

Однако на графике, построенному по всему каталогу аномалия смещается по магнитудам вправо уже в 2001 году, а к 2012 исчезает полностью (Рис. 6).

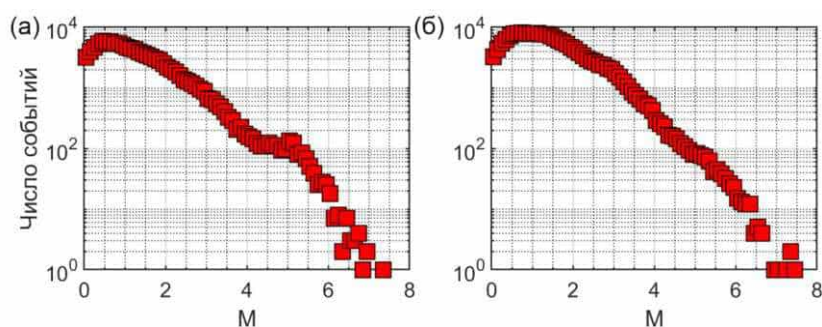


Рисунок 6 – графики повторяемости для всего каталога JMA за 2001 и 2012 года с использованием магнитуд из первого столбца каталога

То есть аномалия в области магнитуд $M = 4$ характерна именно для периода интрузии. Рассмотрим графики повторяемости для участка каталога, не включающего область интрузии, например, события северной части Японии – выше широты 34.5 градусов (Рис. 7).

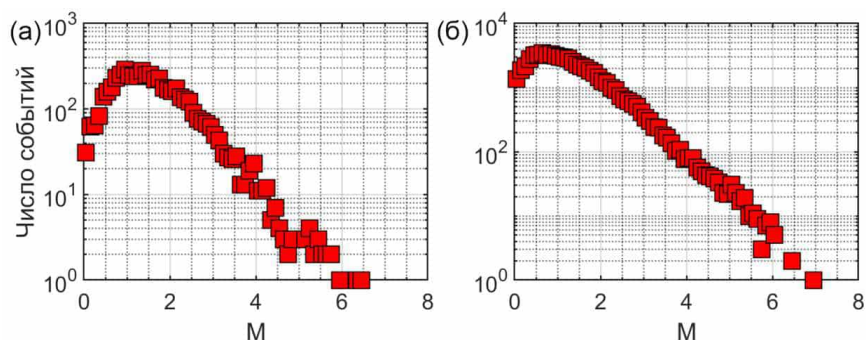


Рисунок 7 – графики повторяемости для событий каталога выше широты 34.5 градусов: (а) – за период интрузии, (б) – за 2001 год

Ярко выраженной аномалии в этом регионе нет. Это может указывать на то, что она характерна именно для событий интрузии. В таком случае её можно объяснить либо физическим наличием характеристических землетрясений, либо особенностями регистрации именно в области интрузии. Второе можно было бы проверить, построив графики повторяемости в той же области за последующие года, однако на них оказывается очень мало событий с магнитудами более 4 (Рис. 8), к тому же по прошествии нескольких лет качество регистрации могло улучшиться.

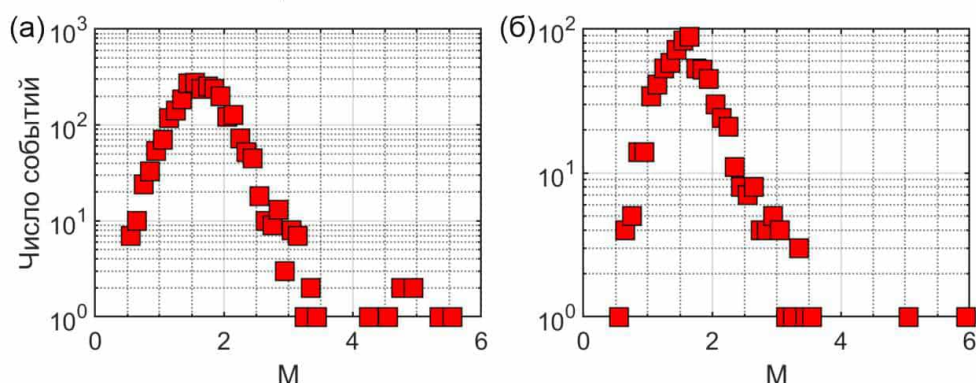


Рисунок 8 – графики повторяемости в области интрузии за 2001 год (а) и за 2020 год (б)

В пользу физической природы говорит ряд исследований. Например, в [Passarelli et al., 2015] для анализа той же сейсмичности использовался каталог NIED (Japan National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention), авторы разделили события по механизмам на сдвиги и сбросы, и показали, что для сбросов график повторяемости отклоняется от линейной формы, для сдвигов же закон Гутенберга-Рихтера по-прежнему выполнялся. Однако в [Passarelli et al., 2015] не рассматривались события с магнитудой меньше 3, поэтому сопоставить их графики с полученными тут в полной мере нельзя. В [Minson et al., 2007] показано, что в период интрузии было аномально много событий с высокой долей недипольной компоненты. Они изучают 18 событий роя и приходят к выводу, что они лучше описываются комплексной моделью, представленной совокупностью компонент трещины отрыва и сдвига. Тем не менее большинство землетрясений все еще хорошо описывались моделью двойной пары сил. Можно предположить, что артефакт на графике повторяемости обеспечен событиями с аномальными механизмами, для которых либо неправильно определена магнитуда, либо они имеют некоторое характеристическое значение ввиду своей природы. Явление характеристических магнитуд известно для вулканической сейсмичности, например, при коллапсе кальдеры вулкана Баударбунга при извержении 2014-го года [Gudmundsson et al., 2016; Riel et al., 2015]. Там этот

процесс генерировал аномально большое число событий с магнитудами более 5, которые обладали значительной недипольной компонентой в механизме очага.

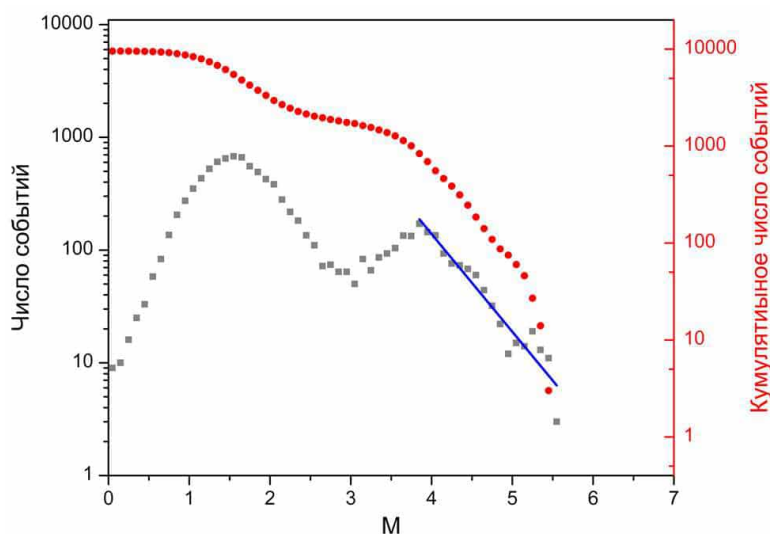


Рисунок 9 – график повторяемости для событий в период извержения вулкана Баударбунга в центральной кальдере, сопровождавшиеся её коллапсом

Не исключено, что в данном случае может происходить подобное – большая часть событий вызваны интрузией, которая ослабляет зону горных пород, косвенно вызывая их обрушение, режим которого имеет характеристические магнитуды и нестандартные механизмы. Либо локальный сброс давления в момент вулканического роя приводит к коллапсу пород, подобно случаю на вулкане Баударбунга. Похожая идея звучала в работе [Hill, 1977], где отмечается, что в роях, происходящих в областях срединно-океанических хребтов (то есть в зонах спрединга), у землетрясений преобладал сбросовый механизм очага. Также есть свидетельства, что интрузии в рифтовых зонах, то есть в зонах растяжения, вызывают события со сбросовым механизмом и образуют грабены [Rubin, 1992].

В данной работе мы отдаем предпочтение физической интерпретации и далее для анализа режима роев на события будет накладываться ограничение по магнитудам сверху, чтобы исключить влияние аномальных событий. Верхний порог выбирался так, чтобы исключить события с заведомо аномальным числом. Будем считать, что сейсмичность представлена двумя режимами. Первый – более слабые, сдвиговые, вероятно, вулкано-тектонические события, представляющие роевую активность и непосредственный отклик среды на интрузию. Второй – более сильные события, обладающие характеристической магнитудой и являющиеся косвенным следствием интрузии. В рамках данной работы нас в первую очередь интересует первый режим. Ясно, что магнитудно-частотные распределения этих двух режимов частично перекрываются, причем степень перекрытия, видимо, меняется от роя к рою, поэтому ограничение выбиралось

для каждого роя индивидуально с целью сохранить наибольшее число событий с минимальными искажениями величины наклона графика повторяемости. Для дополнительного контроля строилась зависимость наклона графика повторяемости от значения верхнего порога по магнитуде. Представительная магнитуда при этом предварительно оценивалась по всему распределению без ограничения сверху. Верхний порог приходится на магнитуду, после которой параметр наклона графика повторяемости начинает падать из-за добавления аномальных событий. После внесения верхнего ограничения представительная магнитуда снова пересчитывалась.

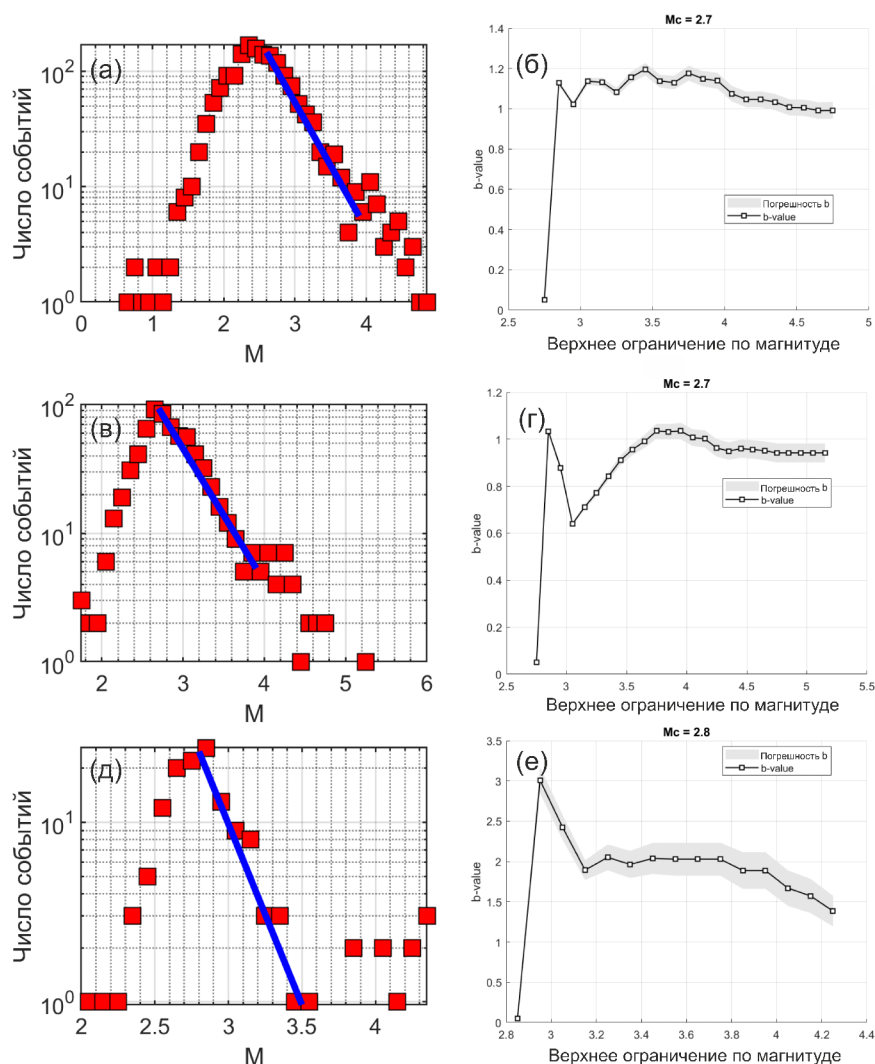


Рисунок 10 – (а, в, д) – примеры графиков повторяемости нескольких роев. (б, г, е) – соответствующие им зависимости наклона графика повторяемости от верхнего порога магнитуд. Введенные ограничения для графиков повторяемости (а, в, д): 3.9, 3.9, 3.5

Ясно, что, вводя верхний порог, мы, вероятно, удаляем часть событий, относящихся к роевому режиму, будем иметь в виду, что к полученным абсолютным значениям стоит относиться с осторожностью, так как они могут быть завышены.

Для оценки сейсмического момента событий необходимы формула пересчета магнитуд в моментную. В [Uchide, Imanishi, 2018] представлена эмпирическая формула для пересчета магнитуды каталога JMA в моментную, учитывающую недооценку для слабых событий:

$$M_w = (0.053 \pm 0.003)M_j^2 + (0.33 \pm 0.02)M_j + (1.68 \pm 0.03)$$

Формула применима в диапазоне $0.5 < M_j < 7$, где M_j – стандартная магнитуда каталога JMA (в основном MV или MD). Мы будем использовать эту формулу для вычисления сейсмического момента и оценки энергетической асимметрии серий событий.

3.6.2 Анализ роев

Для удобства представления период интрузии был разделен на условные три интервала. После выделения всплесков активности по времени проводилась дополнительная фильтрация по пространственному расстоянию: удалялись события, удаленные на расстояния больше порога двух стандартных отклонений от медианного центра роя.

Первый интервал

На рисунке 11 показан график активности событий этого периода и выделенные всплески активности. Показаны только те всплески, в которых более 100 событий. Всего в этом интервале видно 11 таких роев.

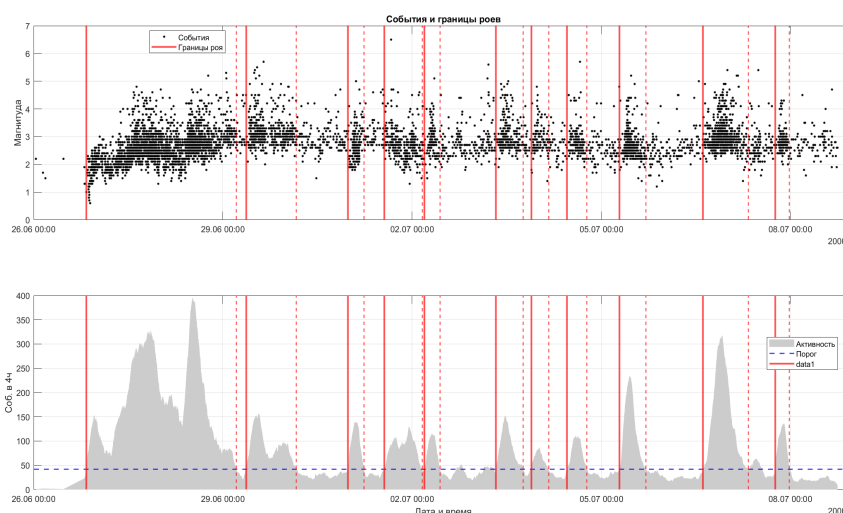


Рисунок 11 – график активности для первого интервала периода интрузии вулкана Миякедзима. Красными сплошными вертикальными линиями отмечены времена начала роев, пунктирными – окончания роев. Горизонтальная синяя линия – порог активности

Рой №1

График повторяемости этого роя имеет незначительный артефакт в области магнитуды 3.9 (Рис. 12). Представительная магнитуда была рассчитана с уровнем значимости 0.05 с ограничением сверху 3.9. Полученное значение $M_c = 2.7$. Вариации M_c можно провести по оставшимся 2451 событиям в окне 500 событий с шагом 100 и уровнем значимости 0.05. Значения в вариациях не превышают среднего: 2.7.

Рассчитаем значения b -value как по всем событиям, так и с ограничением сверху: $b = 0.98 \pm 0.03$ по всем событиям, $b = 1.07 \pm 0.05$ с ограничением сверху равным 3.9.

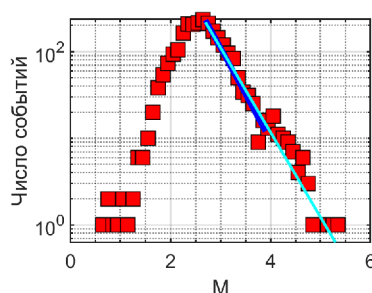


Рисунок 12 – график повторяемости для всего первого роя. Синяя линия – аппроксимация с ограничением сверху по 3.9, бирюзовая линия – без ограничения.

Поскольку отличия незначительны при расчете вариаций b -value во времени не будем вводить ограничение сверху. Полученные вариации показаны на рисунке 13 вместе с профилями роя.

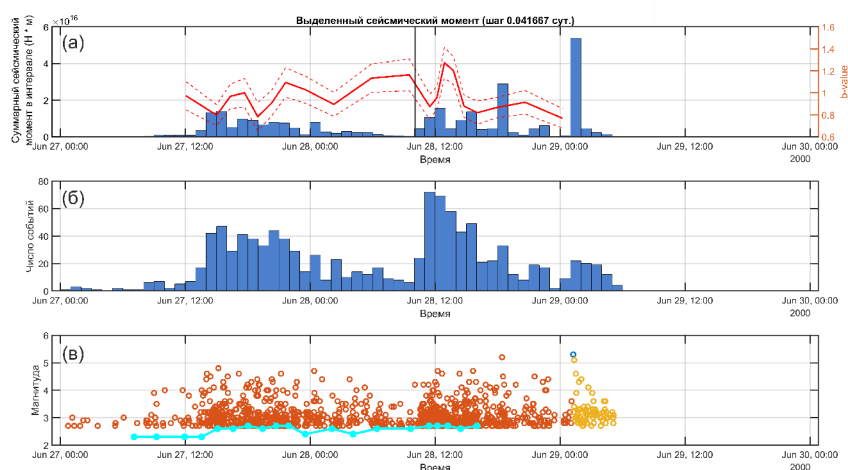


Рисунок 13 – графики для роя 1 интрузии вулкана Миякедзима: (а) – график высвобождения суммарного сейсмического момента во временном окне длиной 1 час; (б) – график числа событий во времени в окне длиной 1 час; (в) – распределение событий во времени, синий кружок – сильнейшее событие роя, оранжевые кружки – события до сильнейшего, желтые – события после сильнейшего. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в

скользящем по времени окне шириной 100 событий и сдвигом 50 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу. На графике (в) бирюзовой линией показаны вариации M_c во времени

Значение b -value меняется в диапазоне от 0.77 до 1.27.

В конце этого интервала хорошо видна афтершоковая серия сильного события, обрежем её по дате 29.06.2000 00:00. Также хорошо выделяются два всплеска событий, разделенные датой 28.06.2000 09:00. Рассмотрим их отдельно, обозначив первый участок как Рой 1.1, а второй как Рой 1.2.

Рой №1.1

График повторяемости имеет небольшую аномалию выше магнитуды 3.9 (Рис. 14).

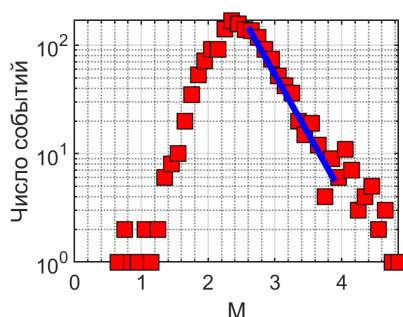


Рисунок 14 – график повторяемости для роя 1.1. Синяя линия – аппроксимация с ограничением сверху по 3.9. Значение $b = 1.09 \pm 0.05$ в диапазоне магнитуд от 2.7 до 3.9

Представительная магнитуда оценена с уровнем значимости 0.05 с ограничением сверху 3.9. Полученное значение $M_c = 2.6$. Вариации M_c проведем по оставшимся 1638 событиям в окне 500 событий с шагом 100 и уровнем значимости 0.05. Значения в вариациях доходят до величины 2.7, примем это значение как пороговое для всего интервала. Представим профили роя с выбранным ограничением по магнитудам сверху (Рис. 15).

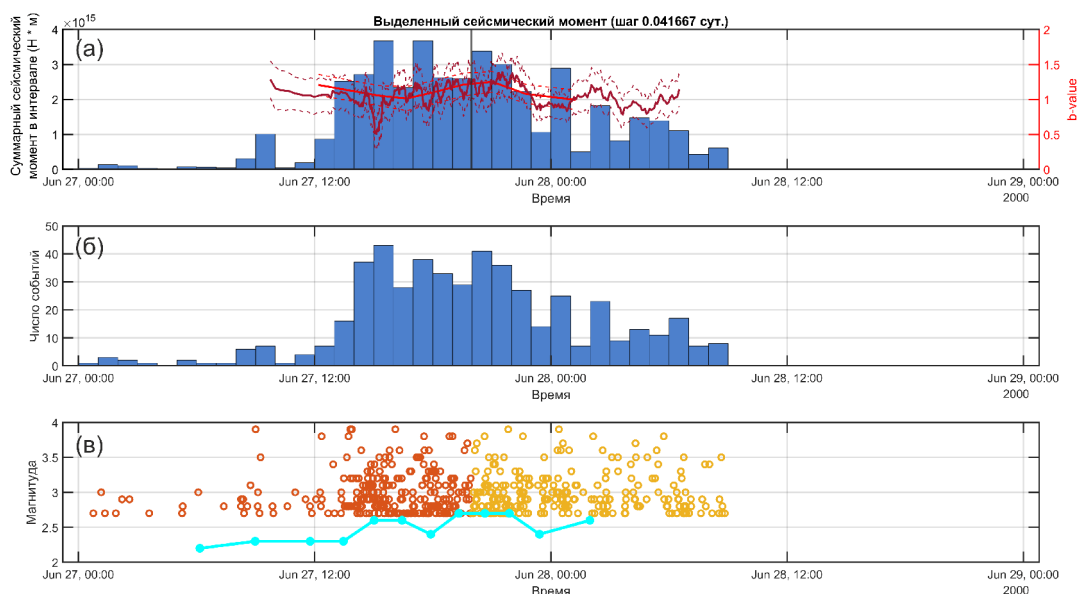


Рисунок 15 – графики для роя 1.1 интрузии вулкана Миякедзима с ограничением по магнитудам сверху 3.9: (а) – график высвобождения суммарного сейсмического момента во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, синий кружок – сильнейшее событие роя, оранжевые кружки – события до времени центроида, желтые – события после времени центроида. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 100 событий и сдвигом 50 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу, бордовая линия: окно 50 событий, сдвиг 1. На графике (в) бирюзовой линией показаны вариации M_c во времени

Значение b варьируется в диапазоне от 0.99 до 1.28 в окнах по 100 событий и от 0.53 до 1.40 в окнах по 50 событий. Ярko выраженных изменений b -value или их связей с профилями роев не прослеживается. Значения держатся на одном уровне на протяжении всего роя.

Рой №1.2

График повторяемости имеет небольшую аномалию после магнитуд 3.9 (Рис. 16).

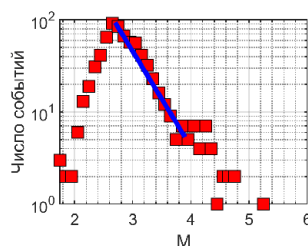


Рисунок 16 – график повторяемости для роя 1.2. Синяя линия – аппроксимация с ограничением сверху по 3.9. Значение $b = 1.04 \pm 0.07$ в диапазоне магнитуд от 2.7 до 3.9

Представительная магнитуда оценена с уровнем значимости 0.05 с ограничением сверху 3.9. Получено значение $M_c = 2.7$. Вариации M_c построим по оставшимся 689 событиям в окне 200 событий с шагом 50 и уровнем значимости 0.15. Значения в вариациях доходят до величины 2.8 в одной точке в конце роя, примем значение 2.7 для всего интервала.

Представим профили роя с выбранным ограничением по магнитудам сверху (Рис. 17).

Значение b варьируется в диапазоне от 0.84 до 1.33 в окнах по 100 событий и от 0.62 до 1.67 в окнах по 50 событий. Значение повышается после кульминации роя, но на протяжении остального роя держится, примерно, на одном уровне, близком к 1.

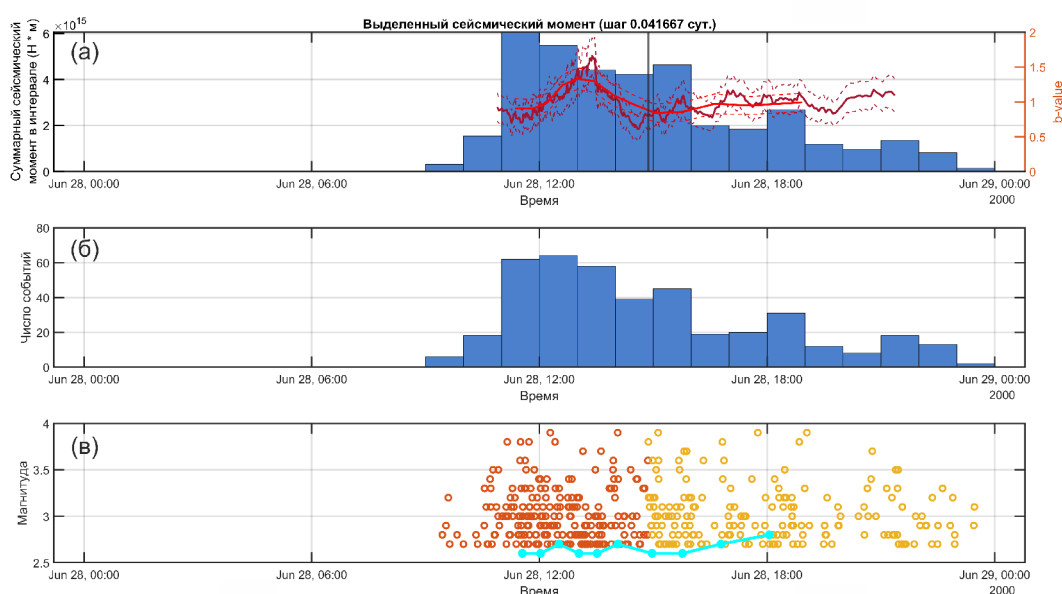


Рисунок 17 – графики для роя 1.2 интрузии вулкана Миякедзима с ограничением по магнитудам сверху 3.9: (а) – график высвобождения суммарного сейсмического момента во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, синий кружок – сильнейшее событие роя, оранжевые кружки – события до времени центроида, желтые – события после времени центроида. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 100 событий и сдвигом 25 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу, бордовая линия: окно 50 событий, сдвиг 1. На графике (в) бирюзовой линией показаны вариации M_c во времени

Рой №2

График повторяемости имеет небольшую аномалию после магнитуд 3.9 (Рис. 18).

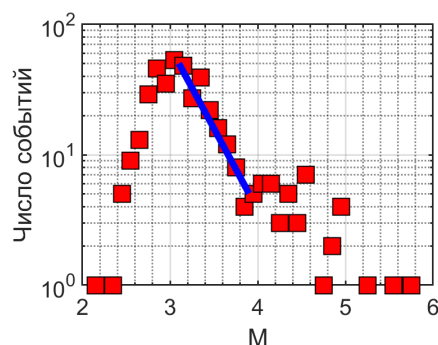


Рисунок 18 – график повторяемости для роя 2. Синяя линия – аппроксимация с ограничением сверху по 3.9. Значение $b = 1.25 \pm 0.15$ в диапазоне магнитуд от 3.1 до 3.9

Представительная магнитуда оценивалась с уровнем значимости 0.15 с ограничением сверху 3.9. Получено значение $M_c = 3.1$. Вариации M_c оценивались в окнах 200 событий со сдвигом 25 с уровнем значимости 0.15. Вариации нигде не превышают значения 3.1, примем его как пороговое для всего роя.

Представим профили роя с выбранным ограничением по магнитудам сверху (Рис. 19).

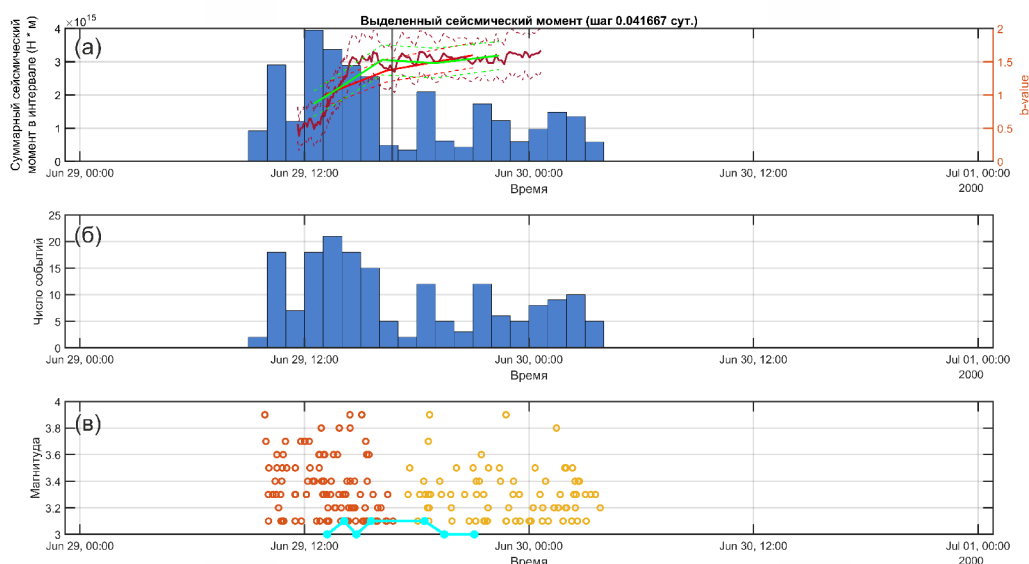


Рисунок 19 – графики для роя 2 интрузии вулкана Миякедзима с ограничением по магнитудам сверху 3.9: (а) – график высвобождения суммарного сейсмического момента во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, синий кружок – сильнейшее событие роя, оранжевые кружки – события до времени центроида, желтые – события после времени центроида. На графике (а) красной линией

показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 100 событий и сдвигом 40 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу; бордовая линия: окно 50 событий, сдвиг 1; зеленая линия – окно 80 событий, сдвиг 25. На графике (в) бирюзовой линией показаны вариации M_c во времени

В вариациях наблюдается падение значения в период кульминации роя относительно конца серии. Чтобы проверить не является ли это падение артефактом, представим графики повторяемости для окон ширинами 100 (рис. 20) и 50 событий (рис. 21).

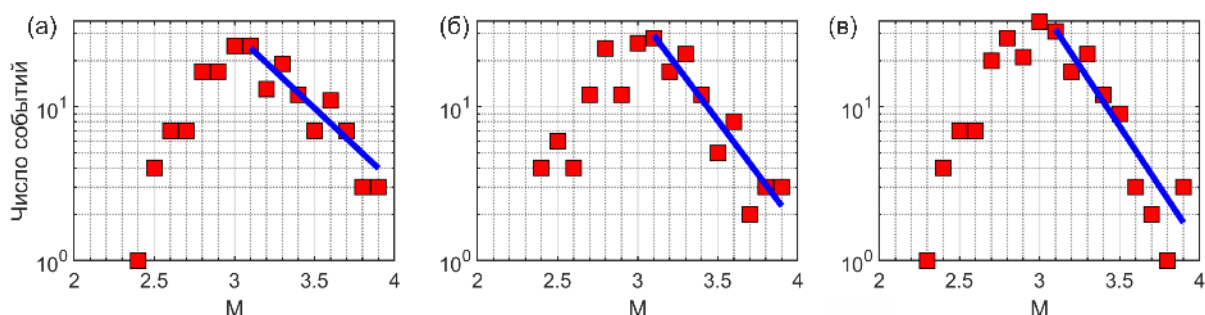


Рисунок 20 – графики повторяемости в трех окнах шириной 100 событий: (а) – в начале: $b = 0.98 \pm 0.18$; (б) – в центре: $b = 1.39 \pm 0.17$; (в) – в конце: $b = 1.58 \pm 0.19$.

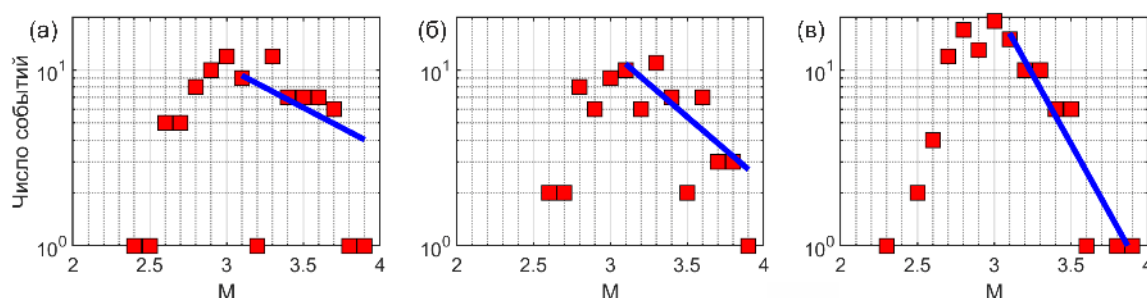


Рисунок 21 – графики повторяемости в трех окнах шириной 50 событий: (а) – в начале: $b = 0.46 \pm 0.24$; (б) – в центре: $b = 0.75 \pm 0.23$; (в) – в конце: $b = 1.58 \pm 0.33$.

График с окнами шириной 100 событий довольно зашумлены, но при этом сохраняют линейную часть, значения в начале роя и в конце отличаются значимо.

Значение b варьируется в диапазоне от 0.98 до 1.58 в окнах по 100 событий и от 0.38 до 1.67 в окнах по 50 событий.

Рой №3

График повторяемости не имеет ярко выраженных артефактов (Рис. 22), поэтому будем использовать весь доступный диапазон магнитуд.

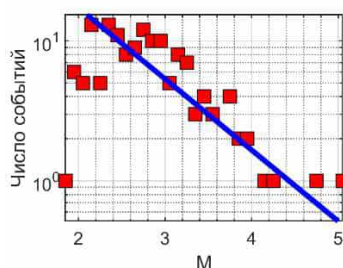


Рисунок 22 – график повторяемости для роя 3. Синяя линия – аппроксимация по всему диапазону. Значение $b = 0.51 \pm 0.06$ в диапазоне магнитуд от 2.1 до 5

Представительная магнитуда оценена с уровнем значимости 0.15 без ограничения сверху: получено значение $M_c = 2.1$. Для оценки вариаций M_c во времени в рое слишком мало событий.

Представим профили роя на рисунке 23. Так как оценка $M_c = 2.1$ может быть заниженной из-за сильного «закругления» пика графика, дополнительно построены вариации b с $M_c = 2.7$. В таком случае получаются более высокие значения b .

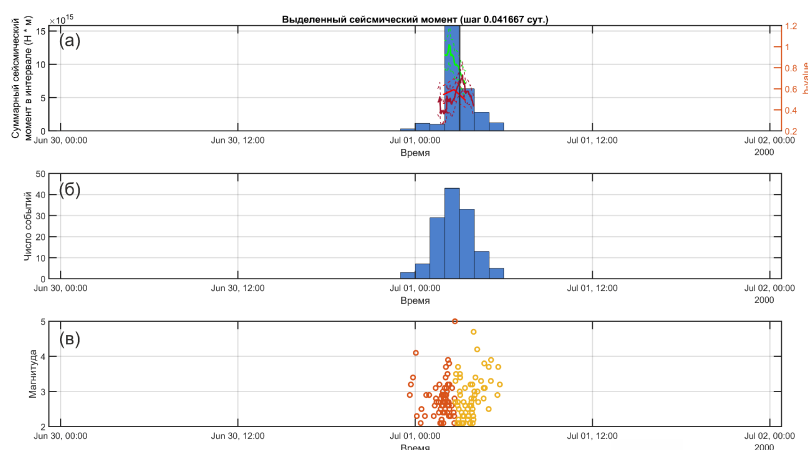


Рисунок 23 – графики для роя 3 интрузии вулкана Миякедзима: (а) – график высвобождения суммарного сейсмического момента во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, синий кружок – сильнейшее событие роя, оранжевые кружки – события до времени центроида, желтые – события после времени центроида. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 80 событий и сдвигом 26 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу; бордовая линия: окно 50 событий, сдвиг 1; зеленая линия – окно 50 событий, сдвиг 1 с представительной магнитудой 2.7

Представим графики повторяемости для разных участков роя (Рис. 24).

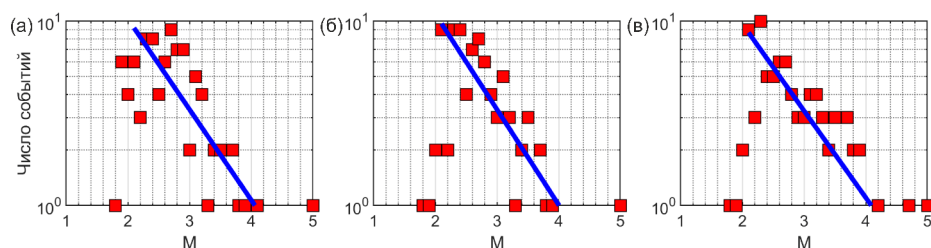


Рисунок 24 – графики повторяемости в трех окнах шириной 80 событий: (а) – в начале: $b = 0.49 \pm 0.08$; (б) – в центре: $b = 0.52 \pm 0.10$; (в) – в конце: $b = 0.47 \pm 0.07$.

В целом значения аномально низкие на протяжении всего роя, в нем мало представительных событий для выделения явных аномалий в вариациях. Значения в вариациях меняются от 0.47 до 0.52 в окнах шириной 80 событий.

Рой №4

На рисунке 25 показано распределение эпицентров роя в пространстве.

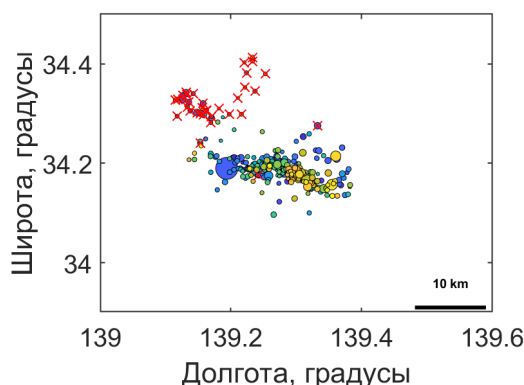


Рисунок 25 – события всплеска 4 в пространстве. Красными крестами отмечены события слишком далекие по расстоянию

Представительная магнитуда оценена с уровнем значимости 0.15 с ограничением сверху 4.0. Получаем $M_c = 2.7$. Вариации M_c в окнах 150 событий со сдвигом 25 с уровнем значимости 0.15. Вариации нигде не превышают значения 2.7. Профиль роя без ограничений представлен на рисунке 26.

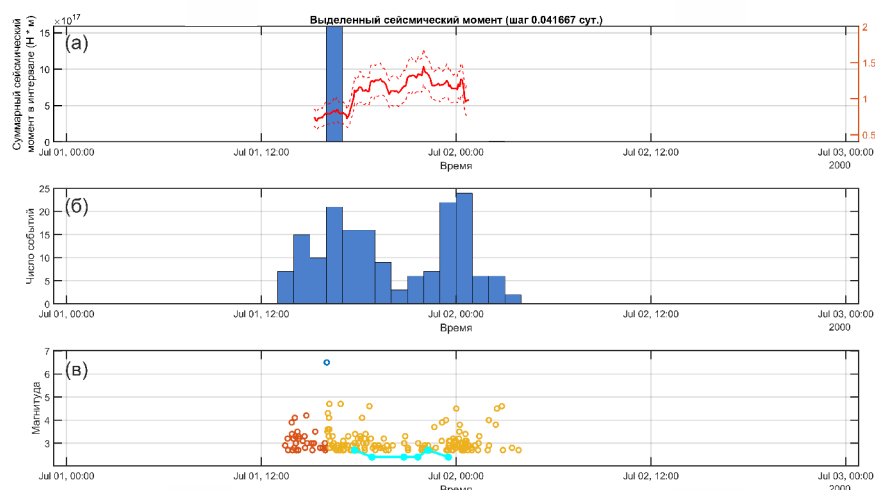


Рисунок 26 – графики для всплеска 4 интрузии вулкана Миякедзима без ограничения по магнитудам сверху: (а) – график высвобождения суммарного сейсмического момента во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, синий кружок – сильнейшее событие роя, оранжевые кружки – события до сильнейшего, желтые – события после сильнейшего. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 50 событий и сдвигом 1 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу

Первая часть роя похожа на форшок-афтершоковую серию сильного события с магнитудой 6.5, её активность падает к середине интервала. Отделим правый всплеск активности и рассмотрим его отдельно в качестве роя.

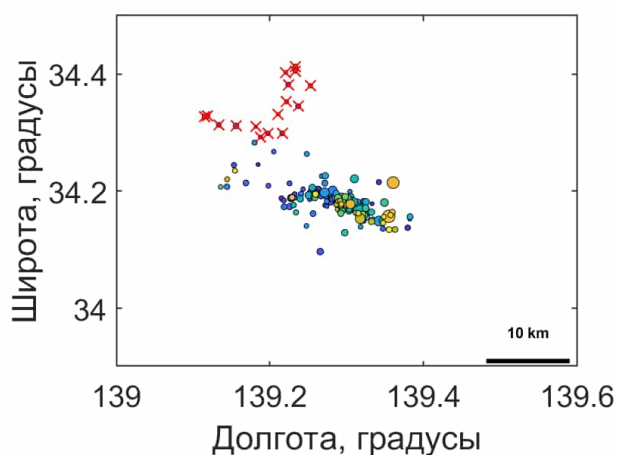


Рисунок 27 – события роевой части всплеска 4 в пространстве. Красными крестами отмечены события слишком далекие по расстоянию

График повторяемости имеет выраженный артефакт на магнитудах более 3.7 (рис. 28).

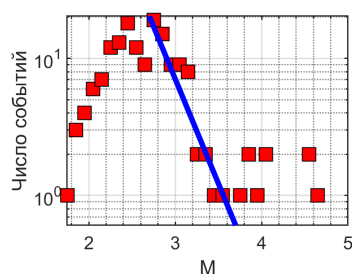


Рисунок 28 – график повторяемости для роевой части всплеска 4. Синяя линия – аппроксимация с ограничением 3.7 по магнитудам сверху. Значение $b = 1.52 \pm 0.22$ в диапазоне магнитуд от 2.7 до 3.7

Представительная магнитуда рассчитана с уровнем значимости 0.15 с ограничением сверху 3.7. Получаем $M_c = 2.7$. Событий слишком мало для оценки временных вариаций M_c . Временной профиль роя представлен на рисунке 29.

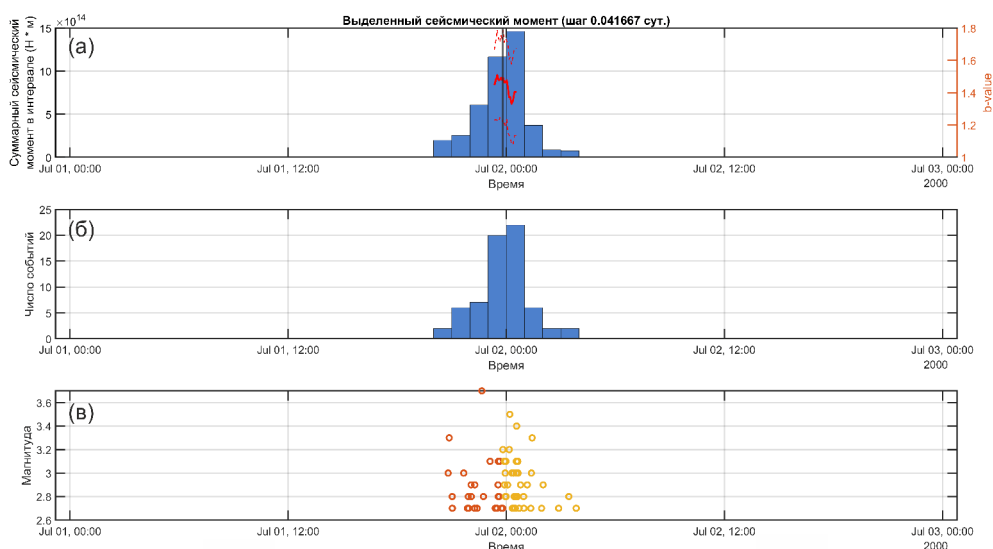


Рисунок 29 – графики для роевой части всплеска 4 интрузии вулкана Миякедзима с ограничением по магнитудам сверху 3.7: (а) – график высвобождения суммарного сейсмического момента во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, оранжевые кружки – события до времени центроида, желтые – события после времени центроида. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 50 событий и сдвигом 1 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу

В рое мало представительных событий для выделения явных аномалий в вариациях. Значения в вариациях меняются от 1.33 до 1.51 в окнах шириной 50 событий.

Рой №5

График повторяемости имеет небольшой артефакт на магнитудах более 3.9 (Рис. 30).

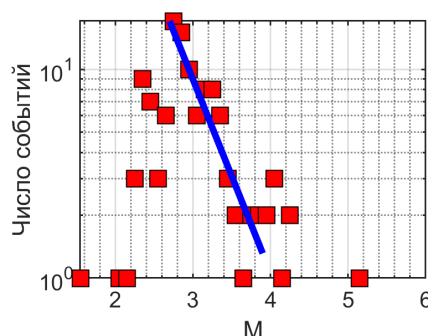


Рисунок 30 – график повторяемости для роя 5. Синяя линия – аппроксимация с ограничением 3.9 по магнитудам сверху. Значение $b = 1.52 \pm 0.22$ в диапазоне магнитуд от 2.7 до 3.9.

Представительная магнитуда оценена с уровнем значимости 0.15 с ограничением сверху 3.9. Получено значение $M_c = 2.7$. Событий слишком мало для оценки временных вариаций M_c . Временной профиль роя представлен на рисунке 31.

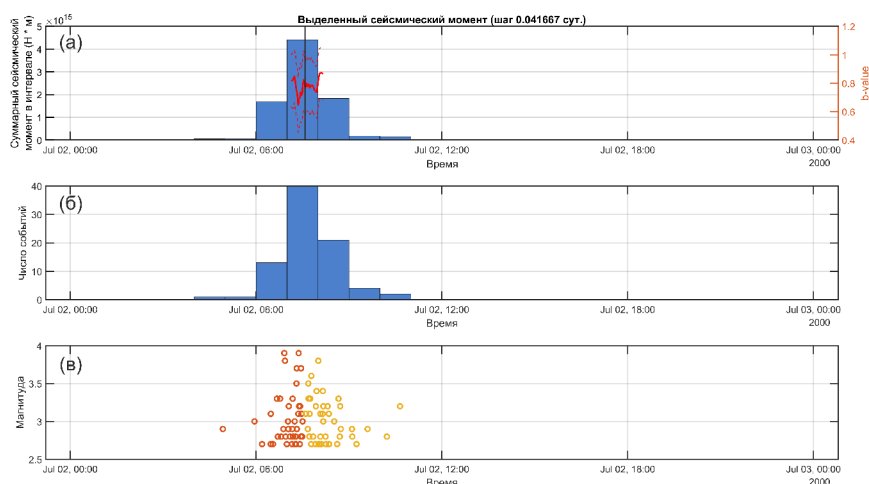


Рисунок 31 – графики для роя 5 интрузии вулкана Миякедзима с ограничением по магнитудам сверху 3.9: (а) – график высвобождения суммарного сейсмического момента во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, оранжевые кружки – события до времени центроида, желтые – события после времени центроида. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 50 событий и сдвигом 1 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу

В рое мало представительных событий для выделения явных аномалий в вариациях. Значения в вариациях меняются от 0.65 до 0.87 в окнах шириной 50 событий.

Рой №6

График повторяемости имеет артефакт на магнитудах более 4.3 (рис. 32).

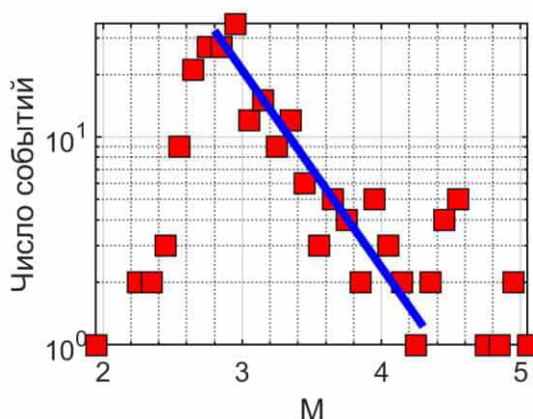


Рисунок 32 – график повторяемости для роя 6. Синяя линия – аппроксимация с ограничением 4.3 по магнитудам сверху. Значение $b = 0.95 \pm 0.11$ в диапазоне магнитуд от 2.8 до 4.3

Представительная магнитуда оценена с уровнем значимости 0.15 с ограничением сверху 4.3. Получено значение $M_c = 2.8$. Событий слишком мало для оценки временных вариаций M_c . Временной профиль роя представлен на рисунке 33.

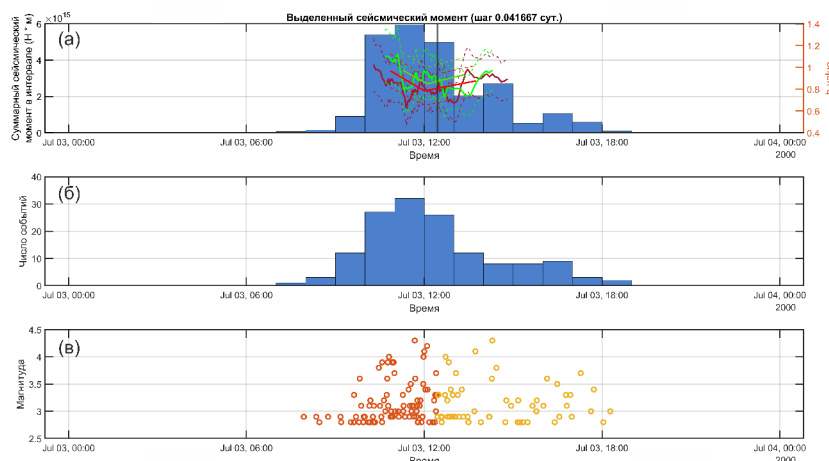


Рисунок 33 – графики для роя 6 интрузии вулкана Миякедзима с ограничением по магнитудам сверху 4.3: (а) – график высвобождения суммарного сейсмического момента во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, оранжевые кружки – события до времени центроида, желтые – события после времени центроида. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем

по времени окне шириной 80 событий и сдвигом 31 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу; бордовая линия: окно 50 событий, сдвиг 1; зеленая линия – окно 50 событий, сдвиг 1 с представительной магнитудой 2.9; болотная линия – окно 80 событий, сдвиг 18, но с $M_c = 2.9$

Представим графики повторяемости для трех частей роя (Рис. 34).

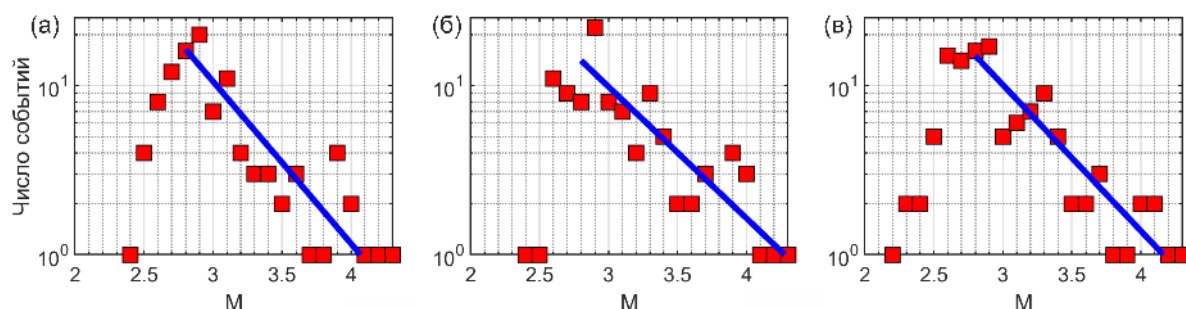


Рисунок 34 – графики повторяемости в трех окнах шириной 80 событий: (а) – в начале: $b = 0.96 \pm 0.15$; (б) – в центре: $b = 0.78 \pm 0.13$; (в) – в конце: $b = 0.86 \pm 0.14$.

В вариациях не наблюдается выраженных аномалий. Значения держатся, примерно, на одном уровне на протяжении всего роя. В вариациях b -value меняется в диапазоне от 0.96 до 0.78 в окнах шириной 80 событий, от 0.62 до 1.03 в окнах шириной 50 событий.

Рой №7

График повторяемости имеет слабо выраженный артефакт на магнитудах более 3.5 (Рис. 35). В этом случае не будем накладывать ограничение сверху на магнитуды при оценке b -value.

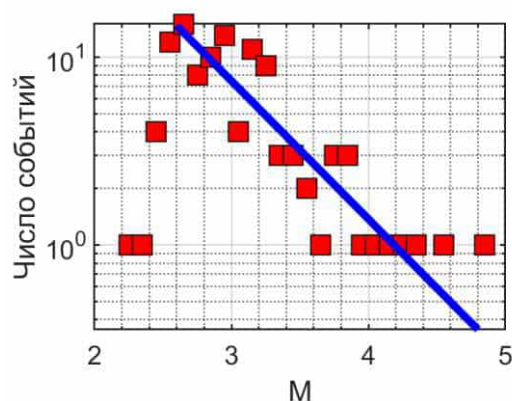


Рисунок 35 – график повторяемости для роя 7. Синяя линия – аппроксимация по всему диапазону магнитуд. Значение $b = 0.73 \pm 0.09$ в диапазоне магнитуд от 2.6 до 4.8

Представительная магнитуда оценена с уровнем значимости 0.15 без ограничения сверху. Получено значение $M_c = 2.6$. Событий слишком мало для оценки временных вариаций M_c . Временной профиль роя представлен на рисунке 36.

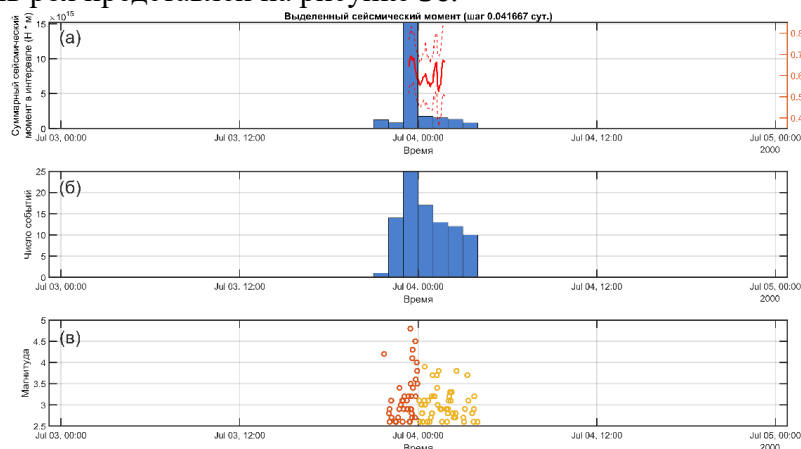


Рисунок 36 – графики для роя 7 интрузии вулкана Миякедзима без ограничения по магнитудам сверху: (а) – график высвобождения суммарного сейсмического момента во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, синий кружок – сильнейшее событие роя, оранжевые кружки – события до сильнейшего, желтые – события после сильнейшего. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 50 событий и сдвигом 1 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу

Для дополнительной оценки асимметрии введем ограничение на магнитуды сверху по 3.5, поскольку аномальные события могут оказать сильное влияние на асимметрию (Рис. 37).

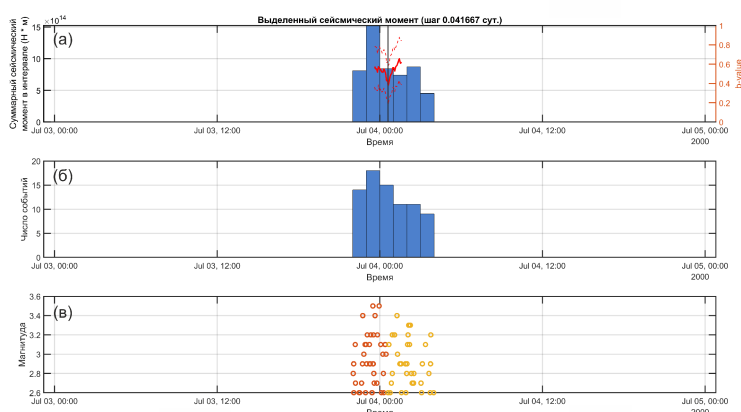


Рисунок 37 – графики для роя 7 интрузии вулкана Миякедзима с ограничением по магнитудам сверху 3.5: (а) – график высвобождения суммарного сейсмического момента во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, оранжевые кружки – события до времени центроида, желтые – события после

времени центроида. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 50 событий и сдвигом 1 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу

Как и ожидалось, введение ограничения сверху не оказало значительно влияния на оценку вариаций b -value. Без ограничения значения меняются в диапазоне от 0.53 до 0.69, с ограничением – от 0.38 до 0.66. Значение не меняется в пределах погрешности на протяжении всего роя.

Рой №8

График повторяемости имеет аномальное число событий с магнитудами более 3.8 (рис. 38).

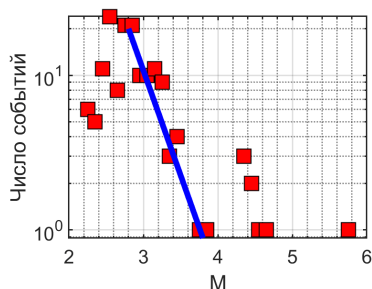


Рисунок 38 – график повторяемости для роя 8. Синяя линия – аппроксимация с ограничением 3.8 по магнитудам сверху. Значение $b = 1.36 \pm 0.21$ в диапазоне магнитуд от 2.8 до 3.8

Представительная магнитуда рассчитана с уровнем значимости 0.15 с ограничением сверху 3.8. Получено значение $M_c = 2.8$. Событий слишком мало для оценки временных вариаций M_c . Временной профиль роя без ограничения сверху по магнитудам представлен на рисунке 39.

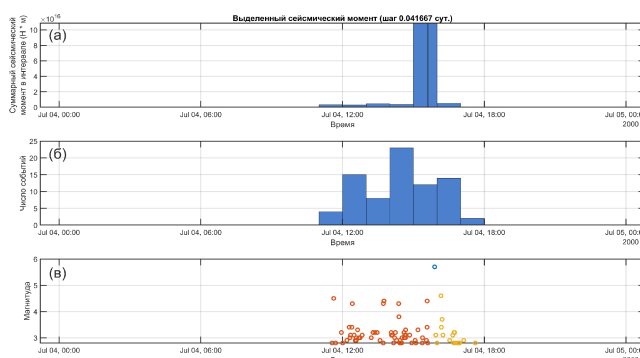


Рисунок 39 – графики для роя 8 интрузии вулкана Миякедзима без ограничения по магнитудам сверху: (а) – график высвобождения суммарного сейсмического момента во

временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, синий кружок – сильнейшее событие роя, оранжевые кружки – события до сильнейшего, желтые – события после сильнейшего

Временной профиль роя с ограничением сверху по магнитудам представлен на рисунке 40.

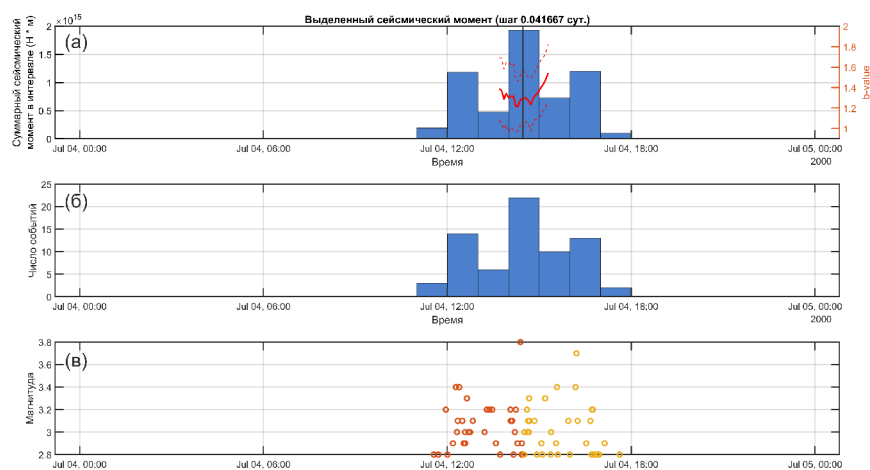


Рисунок 40 – графики для роя 8 интрузии вулкана Миякедзима с ограничением по магнитудам сверху 3.8: (а) – график высвобождения суммарного сейсмического момента во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, оранжевые кружки – события до времени центроида, желтые – события после времени центроида. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 50 событий и сдвигом 1 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу

В вариациях не наблюдается выраженных аномалий. Значения держатся, примерно, на одном уровне на протяжении всего роя. В вариациях b -value меняется в диапазоне от 1.22 до 1.52 в окнах шириной 50 событий.

Рой №9

График повторяемости имеет аномальное число событий с магнитудами более 3.9 (рис. 41).

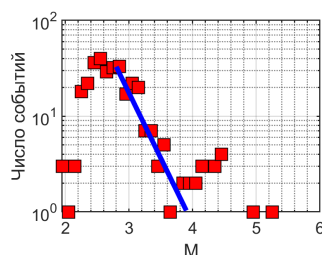


Рисунок 41 – График повторяемости для роя 9. Синяя линия – аппроксимация с ограничением 3.9 по магнитудам сверху. Значение $b = 1.37 \pm 0.17$ в диапазоне магнитуд от 2.8 до 3.9

Представительная магнитуда оценена с уровнем значимости 0.15 с ограничением сверху 3.9. Получено значение $M_c = 2.8$. Вариации M_c оценивались по оставшимся 303 событиям в окне 150 событий с шагом 25 и уровнем значимости 0.15. Значения в вариациях не превышают среднего: 2.8. Временной профиль роя представлен на рисунке 42.

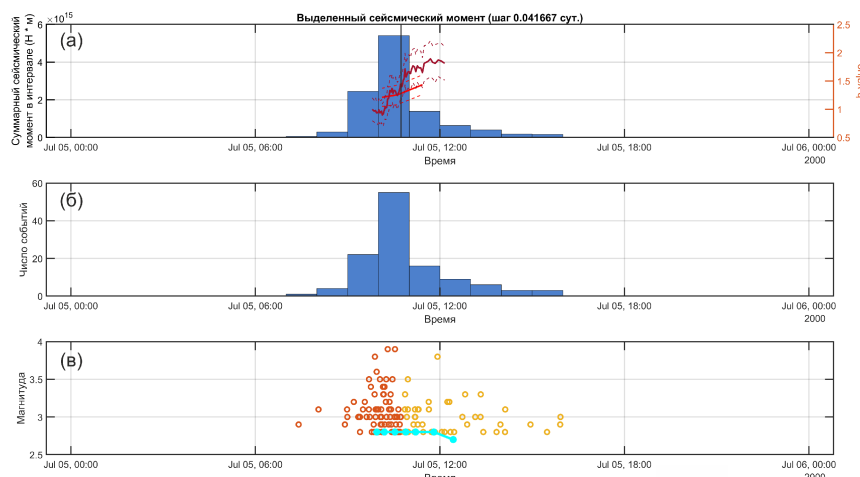


Рисунок 42 – графики для роя 9 интрузии вулкана Миякедзима с ограничением по магнитудам сверху 3.9: (а) – график высвобождения суммарного сейсмического момента во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, оранжевые кружки – события до времени центроида, желтые – события после времени центроида. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 80 событий и сдвигом 19 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу; бордовая линия: окно 50 событий, сдвиг 1

В вариациях с окнами шириной 50 событий прослеживается рост b -value от момента кульминации роя в начале к концу роя. Построим графики повторяемости для разных частей роя (Рис. 43 и 44).

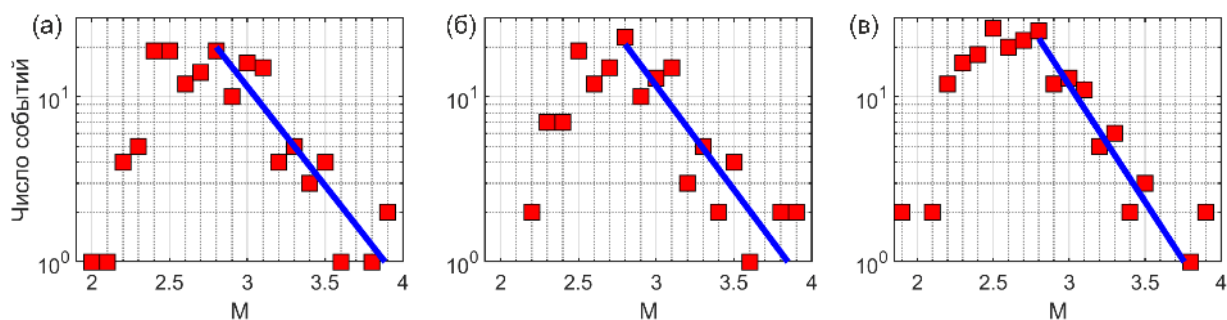


Рисунок 43 – графики повторяемости в трех окнах шириной 80 событий: (а) – в начале: $b = 1.20 \pm 0.16$; (б) – в центре: $b = 1.26 \pm 0.17$; (в) – в конце: $b = 1.41 \pm 0.17$

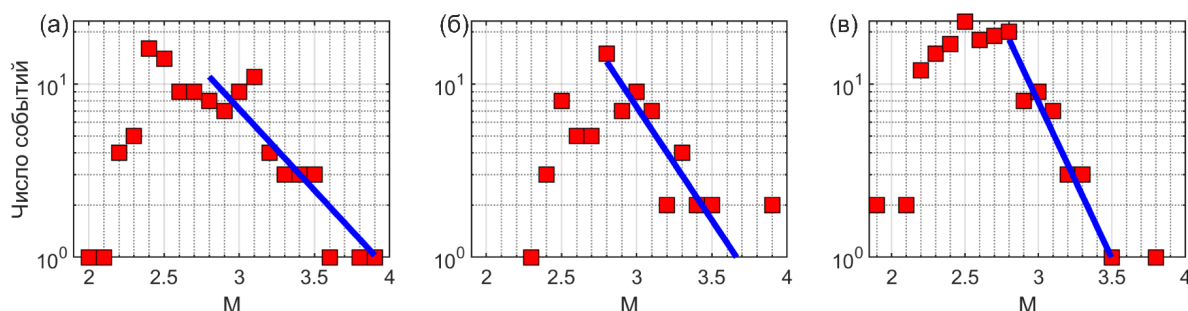


Рисунок 44 – графики повторяемости в трех окнах шириной 50 событий: (а) – в начале: $b = 0.94 \pm 0.20$; (б) – в центре: $b = 1.31 \pm 0.24$; (в) – в конце: $b = 1.81 \pm 0.31$.

Полученную аномалию сложно достоверно подтвердить из-за малого числа событий в рое, падение значения в начале может быть вызвано отклонением графика повторяемости от линейной формы, вариации в окнах шириной 50 событий нельзя считать достаточно надежными без возможности подтвердить их по большим выборкам. Значения b варьируются в диапазоне от 1.21 до 1.44 в окнах шириной 80 событий и от 0.90 до 1.89 в окнах шириной 50 событий.

Рой №10

График повторяемости имеет аномальное число событий с магнитудами более 3.9 (рис. 45).

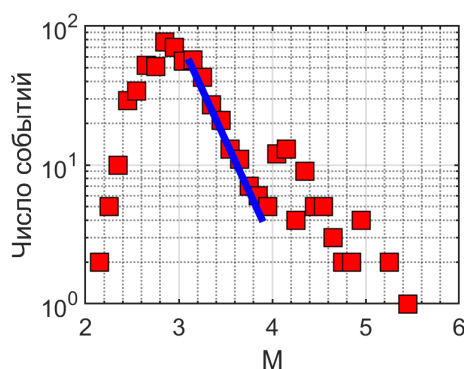


Рисунок 45 – график повторяемости для роя 10. Синяя линия – аппроксимация с ограничением 3.9 по магнитудам сверху. Значение $b = 1.46 \pm 0.15$ в диапазоне магнитуд от 3.1 до 3.9

Представительная магнитуда оценена с уровнем значимости 0.15 с ограничением сверху 3.9. Получено значение $M_c = 3.1$. Вариации M_c оценим по оставшимся 576 событиям в окне 200 событий с шагом 50 и уровнем значимости 0.15. Значения в вариациях не превышают среднего: 3.1. Временной профиль роя представлен на рисунке 46.

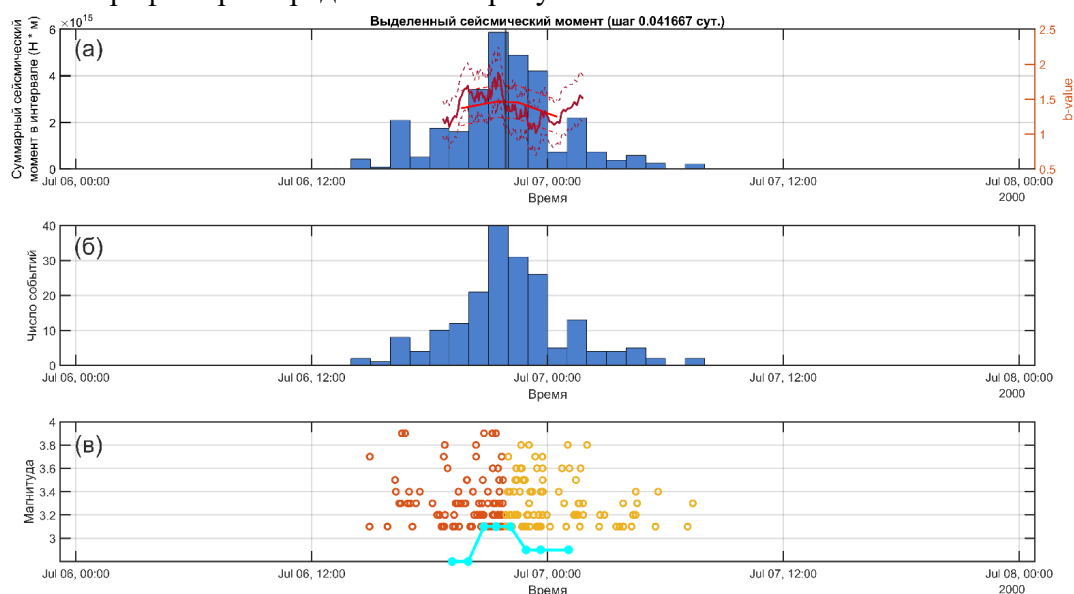


Рисунок 46 – графики для роя 10 интрузии вулкана Миякедзима с ограничением по магнитудам сверху 3.9: (а) – график высвобождения суммарного сейсмического момента во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, оранжевые кружки – события до времени центроида, желтые – события после времени центроида. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 80 событий и сдвигом 36 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу; бордовая линия: окно 50 событий, сдвиг 1

Построим графики повторяемости для разных частей роя (Рис. 47).

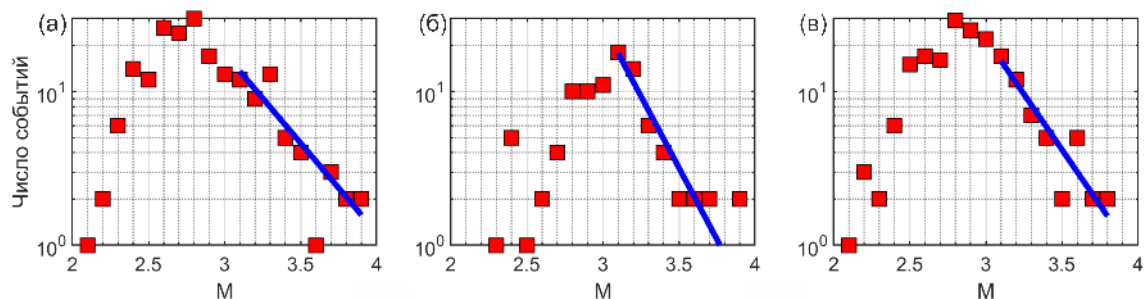


Рисунок 47 – графики повторяемости в трех окнах шириной 50 событий: (а) – в начале: $b = 1.17 \pm 0.26$; (б) – в центре: $b = 1.87 \pm 0.37$; (в) – в конце: $b = 1.45 \pm 0.33$.

Устойчивых аномалий в вариациях b не наблюдается. Значения b варьируют в диапазоне от 1.25 до 1.48 в окнах шириной 80 событий и от 1.02 до 1.88 в окнах шириной 50 событий.

Рой №11

График повторяемости имеет аномальное число событий с магнитудами более 3.5 (рис. 48).

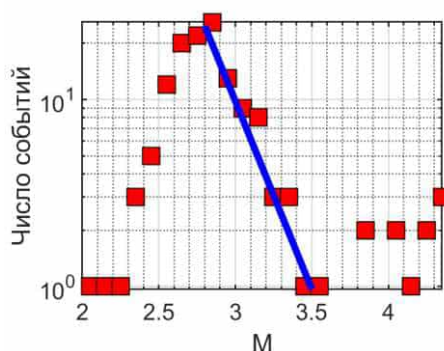


Рисунок 48 – график повторяемости для роя 11. Синяя линия – аппроксимация с ограничением 3.5 по магнитудам сверху. Значение $b = 2.02 \pm 0.34$ в диапазоне магнитуд от 2.8 до 3.5

Представительная магнитуда оценена с уровнем значимости 0.15 с ограничением сверху 3.5. Получено значение $M_c = 2.8$. Событий недостаточно, чтобы оценить вариации M_c . Временной профиль роя представлен на рисунке 49.

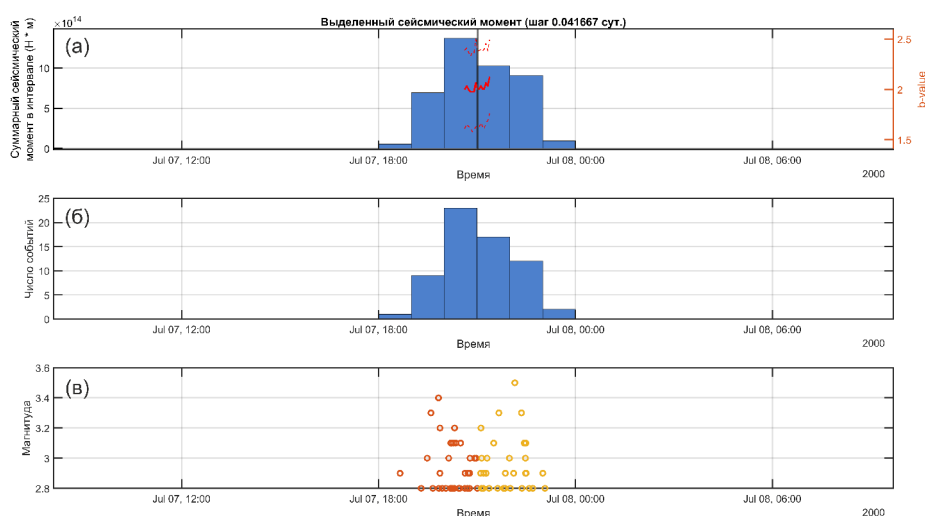


Рисунок 49 – графики для роя 11 интрузии вулкана Миякедзима с ограничением по магнитудам сверху 3.5: (а) – график высвобождения суммарного сейсмического момента во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во

времени, оранжевые кружки – события до времени центроида, желтые – события после времени центроида. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 50 событий и сдвигом 1 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу

Аномалий в вариациях b не наблюдается, значение, примерно, постоянно на протяжении всего роя. Значения b варьируются в диапазоне от 1.98 до 2.13 в окнах шириной 50 событий.

Второй интервал

Для выделения всплесков активности построим график числа событий в окнах длительностью 4 часа с временами событий в качестве центров (Рис. 50).

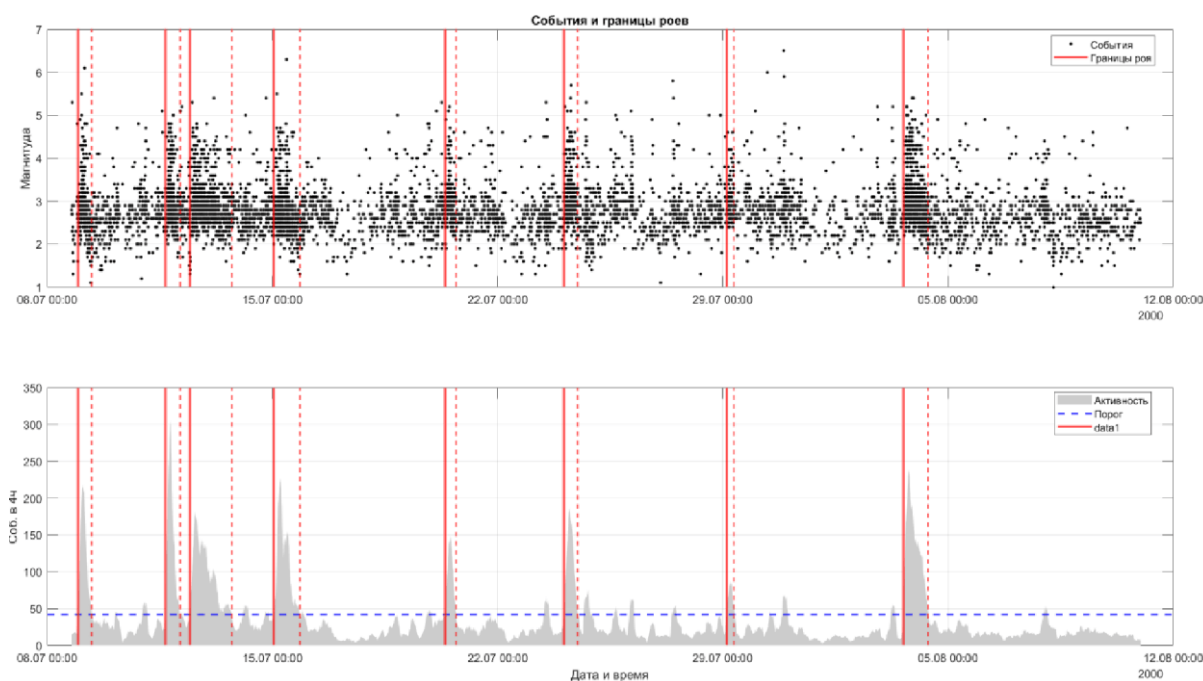


Рисунок 50 – график активности для второго интервала периода интрузии вулкана Миякедзима. Красными сплошными вертикальными линиями отмечены времена начала роев, пунктирными – окончания роев. Горизонтальная синяя линия – порог активности

На рисунке 68 показаны всплески, в которых более 100 событий. Всего в этом интервале 8 таких роев.

Рой №1

График повторяемости имеет аномальное число событий после магнитуды 3.9 (Рис. 51), но также и недостаток на магнитудах 3.7. Однозначно нельзя сказать, какие из этих артефактов являются результатом наличия шума в распределении. Рассмотрим два варианта ограничения

сверху: 3.4 и 3.9. Значения наклона графика повторяемости совпадают в пределах погрешности с обоими вариантами.

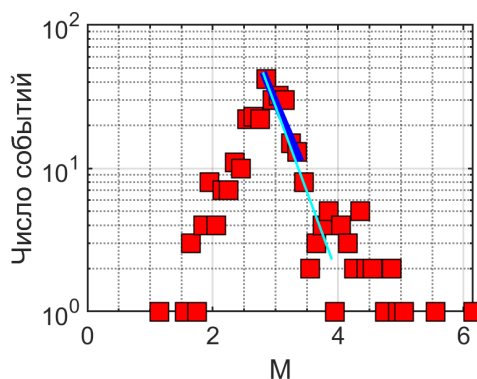


Рисунок 51 – график повторяемости для роя 1 второго интервала. Синяя линия аппроксимация с ограничением 3.4 по магнитудам сверху, бирюзовая – с ограничением 3.9. Значение $b = 1.01 \pm 0.17$ в диапазоне магнитуд от 2.8 до 3.4, значение $b = 1.19 \pm 0.12$ в диапазоне магнитуд от 2.8 до 3.9

Представительная магнитуда определялась с уровнем значимости 0.05 и ограничением магнитуд сверху до 3.4 включительно, а также до 3.9. Результаты совпадают и дают значение $M_c = 2.8$. Для оценки вариаций M_c во времени событий недостаточно. Временной профиль роя представлен без ограничения сверху на рисунке 52.

Ввиду малого числа событий для оценки вариаций b использовалось всего три окна шириной 100 представительных событий выше порога 2.8.

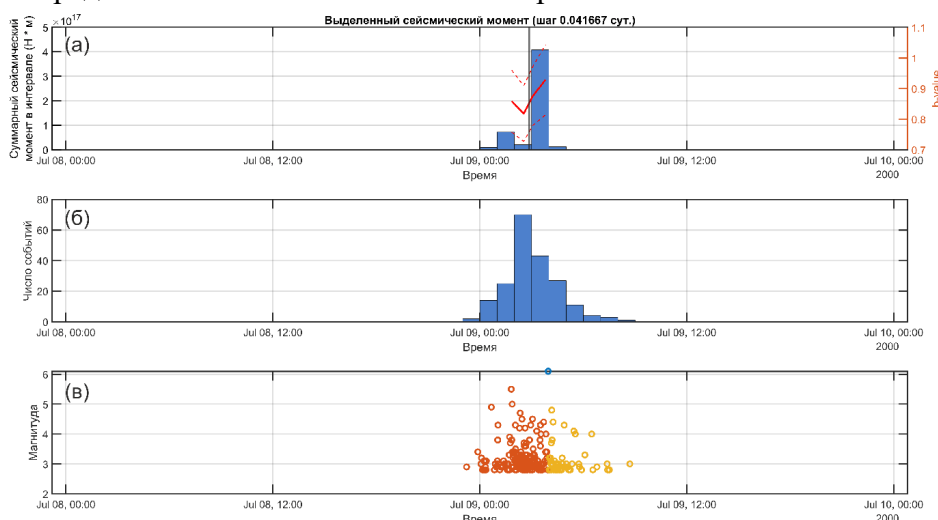


Рисунок 52 – графики для роя 1 второго интервала интрузии вулкана Миякедзима без ограничения по магнитудам сверху: (а) – график высвобождения суммарного сейсмического момента во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, синий кружок – сильнейшее событие роя,

оранжевые кружки – события до сильнейшего, желтые – события после сильнейшего.

Вертикальной черной линией показано время центроида по обрезанным по 3.4 событиям

Интересно, что пик активности слабых событий приходится не на период после сильнейшего, которое должно было вызвать всплеск афтершоков. Рой мелких событий остается симметричен относительно своего собственного пика, независимо от крупных событий. Сильнейшее событие должно было притянуть на себя время центроида слабых событий, но этого не произошло. Возможно, в силу своей специфики это событие не вызвало большого числа афтершоков. Это же подтверждается коэффициентами асимметрии: учет сильных событий меняет значение коэффициента асимметрии энергии с 0.7 на -1, но при этом коэффициент асимметрии числа событий остается 0.4, если бы рой состоял из афтершоков сильнейшего события, у него была бы сильная положительная асимметрия по числу событий. Это частично говорит в пользу принятой гипотезы о наличии двух независимых режимов сейсмичности. Временной профиль роя с ограничением по магнитуде представлен рисунке 53.

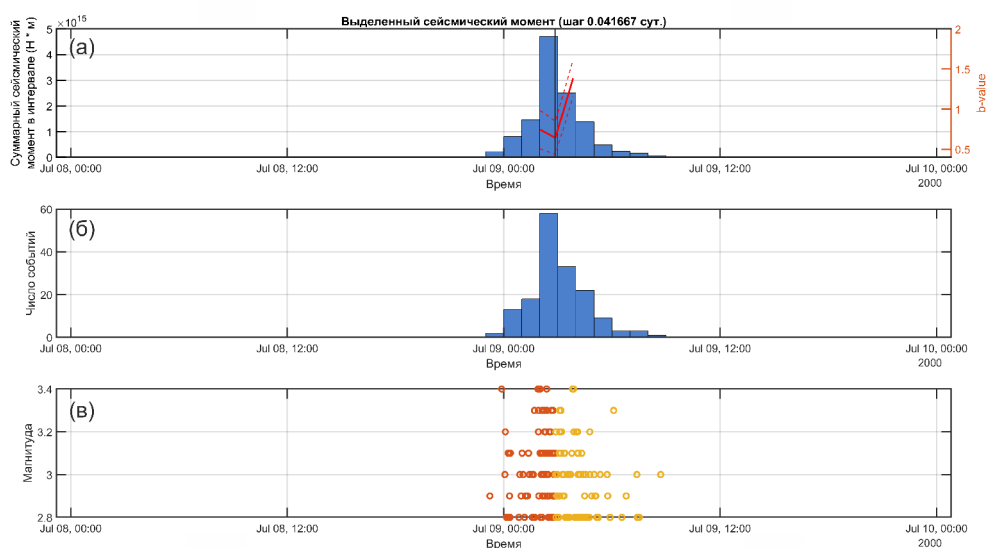


Рисунок 53 – графики для роя 1 второго интервала интрузии вулкана Миякедзима с ограничением по магнитудам сверху 3.4: (а) – график высвобождения суммарного сейсмического момента во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, оранжевые кружки – события до времени центроида, желтые – события после времени центроида. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 100 событий и сдвигом 25 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу. Вертикальной черной линией показано время центроида по обрезанным событиям, зеленой – по всем.

В вариациях b -value видно, что значение минимально в центре роя и затем повышается в конце. Построим графики повторяемости для разных частей роя (Рис. 54).

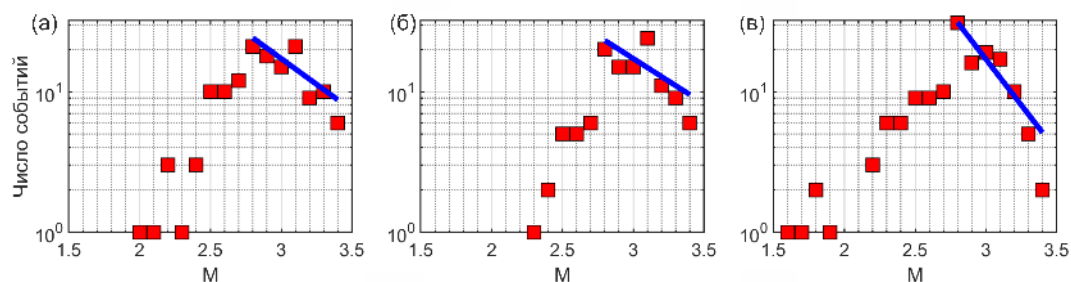


Рисунок 54 – графики повторяемости для трех частей роя: (а) – в начале: $b = 0.73 \pm 0.24$; (б) – в центре: $b = 0.64 \pm 0.21$; (в) – в конце: $b = 1.31 \pm 0.23$

В вариациях b -value меняется в диапазоне от 0.64 до 1.31.

Рой №2

График повторяемости имеет аномальное число событий после магнитуды 3.9 (Рис. 55). Рассмотрим два варианта ограничения сверху: 3.4 и 3.9. Значения наклона графика повторяемости совпадают в пределах погрешности с обоими вариантами. Отдадим предпочтение второму варианту для сохранения большего числа событий.

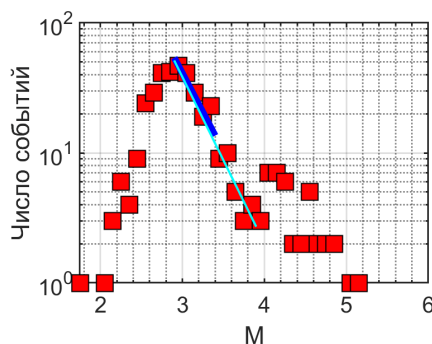


Рисунок 55 – график повторяемости для роя 2 второго интервала. Синяя линия – аппроксимация с ограничением 3.4 по магнитудам сверху, бирюзовая – с ограничением 3.9. Значение $b = 1.20 \pm 0.21$ в диапазоне магнитуд от 2.9 до 3.4, значение $b = 1.28 \pm 0.12$ в диапазоне магнитуд от 2.9 до 3.9

Представительная магнитуда оценивалась с уровнем значимости 0.05 с ограничением сверху 3.9 включительно. Получено значение $M_c = 2.9$. Вариации представительной магнитуды оценивались в окне 150 событий со сдвигом 25 с уровнем значимости 0.15. Значение в вариациях не превышает $M_c = 3.0$, его и выберем в качестве порога для всего роя. Временной профиль роя представлен на рисунке 56.

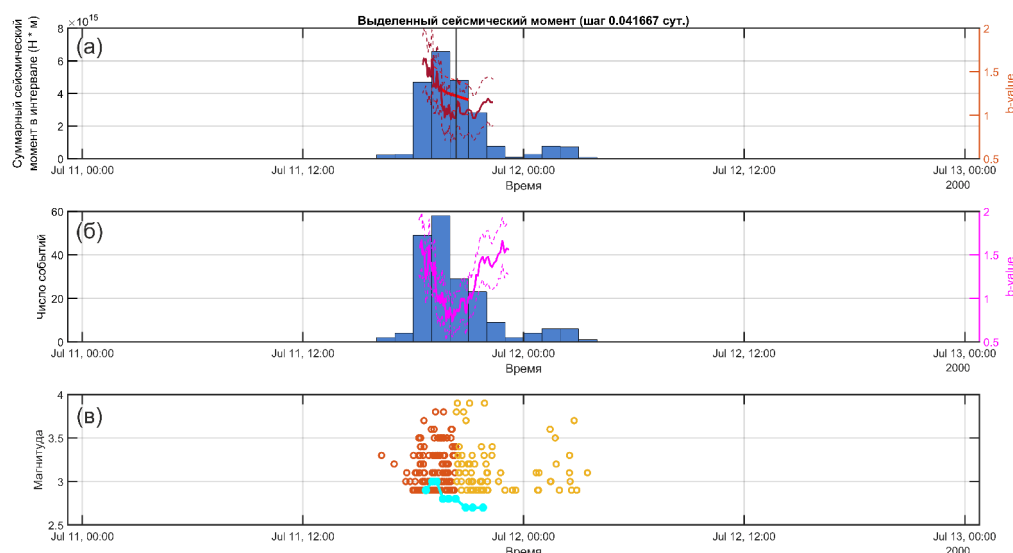


Рисунок 56 – графики для роя 2 второго интервала интрузии вулкана Миякедзима с ограничением по магнитудам сверху 3.9 и представительной магнитудой 3.0: (а) – график высвобождения суммарного сейсмического момента во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, оранжевые кружки – события до времени центроида, желтые – события после времени центроида. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 100 событий и сдвигом 23 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу; бордовая линия: окно 50 событий, сдвиг 1. На графике (б) розовой линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 50 событий и сдвигом 1 событий с $M_c = 2.9$, розовые пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу

Построим графики повторяемости для трех частей роя с окнами шириной 100 событий (Рис. 57).

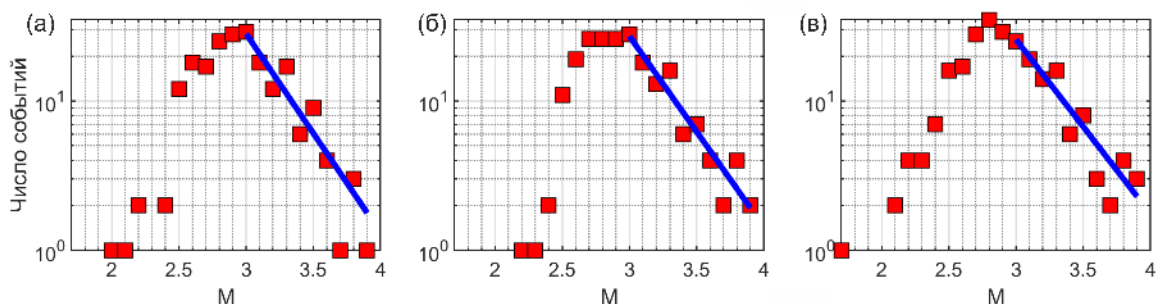


Рисунок 57 – графики повторяемости в трех окнах шириной 100 событий: (а) – в начале: $b = 1.32 \pm 0.17$; (б) – в центре: $b = 1.25 \pm 0.18$; (в) – в конце: $b = 1.20 \pm 0.17$

Также построим вариации с представительной магнитудой $M_c = 2.9$ и сравним с прежним результатом (Рис. 56(б)).

Видно, что тренд падения к времени центроида сохраняется с обоими порогами. При использовании окна шириной 100 событий не наблюдается значимой аномалии, вероятно, из-за недостатка разрешающей способности окно в 100 событий захватывает значения из разных режимов с разным наклоном графика. Дополнительно представим графики для 3 окон шириной 50 событий с порогом 2.9: самого первого, в центре, и последнего (Рис. 58). Ни в одном из этих окон не отвергнута гипотеза о полноте с порогом 2.9 на уровне значимости 0.15. Падение в центре роя может быть вызвано отклонением графика повторяемости от линейной формы.

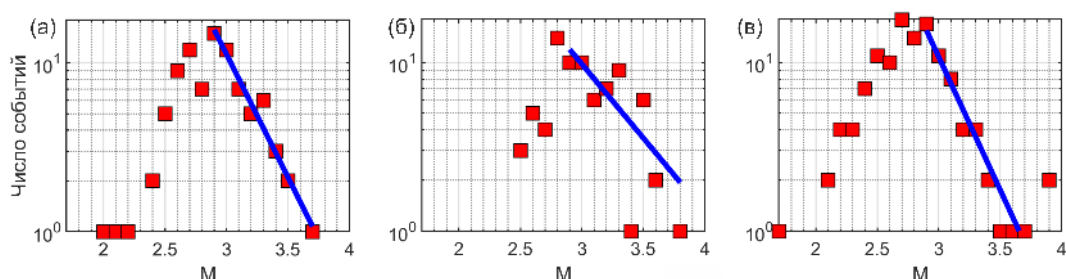


Рисунок 58 – графики повторяемости в трех окнах шириной 50 событий: (а) – в начале: $b = 1.46 \pm 0.31$; (б) – в центре: $b = 0.88 \pm 0.29$; (в) – в конце: $b = 1.58 \pm 0.30$

В вариациях значение b меняется в диапазоне от 1.20 до 1.32 в окнах шириной 100 событий и от 0.95 до 1.65 в окнах шириной 50 событий с представительной магнитудой 3.0.

Рой №3

График повторяемости имеет дефицит событий на магнитудах около 3.6 (Рис. 59). При этом наклоны графика до и после «провала» совпадают.

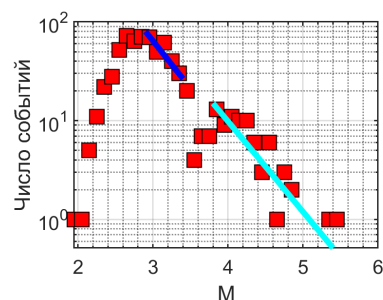


Рисунок 59 – график повторяемости для роя 3 второго интервала. Синяя линия – аппроксимация с ограничением 3.4 по магнитудам сверху, бирюзовая – по магнитудам более 3.8. Значение $b = 0.96 \pm 0.16$ в диапазоне магнитуд от 2.9 до 3.4, значение $b = 0.92 \pm 0.14$ в диапазоне магнитуд от 3.8 до 5.4

Представительная магнитуда оценена с уровнем значимости 0.15, получена оценка $M_c = 2.9$. Вариации M_c в окне 300 со сдвигом 50 с уровнем значимости 0.15 с ограничением сверху по 3.4 включительно, значение в вариациях не превышает среднего 2.9. Временной профиль роя представлен на рисунке 60.

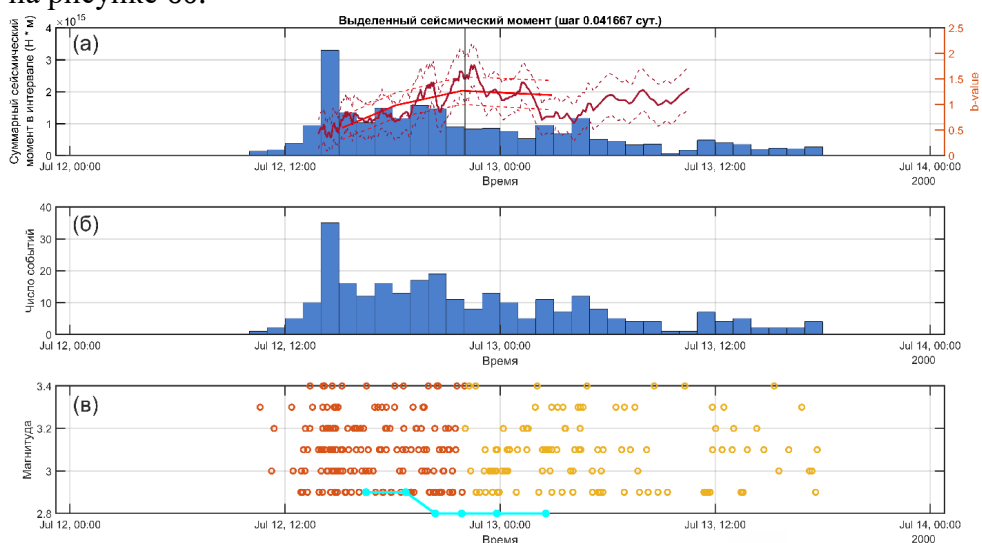


Рисунок 60 – графики для роя 3 второго интервала интрузии вулкана Миякедзима с ограничением по магнитудам сверху 3.4: (а) – график высвобождения суммарного сейсмического момента во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, оранжевые кружки – события до времени центроида, желтые – события после времени центроида. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 100 событий и сдвигом 50 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу; бордовая линия: окно 50 событий, сдвиг 1

В вариациях значение b -value меняется в диапазоне от 0.54 до 1.27 в окнах шириной 100 событий и от 0.36 до 1.77 в окнах шириной 50 событий. По вариациям с разными ширинами окон можно проследить тренд роста b -value от начала роя к концу, однако он не значим с учетом погрешностей.

Рой №4

Этот всплеск активности представляет собой смешение форшок-афтершоковой серии сильного события и роя (Рис. 61). Разделим их по широте 34.3 градуса.

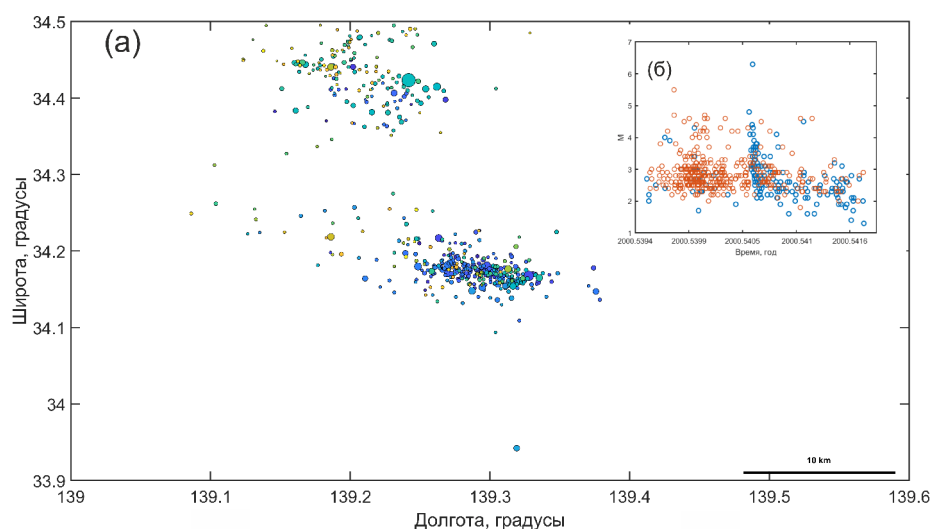


Рисунок 61 – (а) – события всплеска в пространстве. (б) – распределение во времени, синие – события выше широты 34.3, оранжевые – ниже.

Далее будем рассматривать именно роевую часть (Рис. 62).

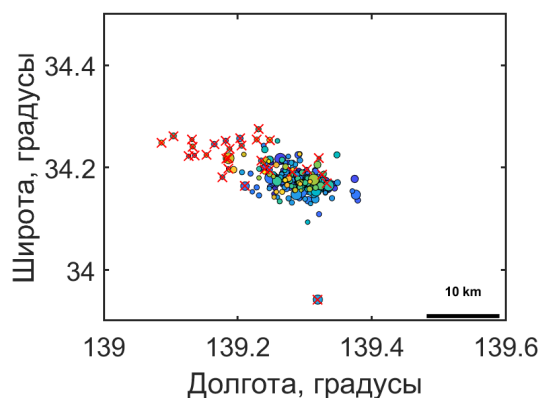


Рисунок 62 – события роя 4 второго интервала в пространстве. Красными крестами отмечены события слишком далекие по расстоянию

График повторяемости имеет отклонения от линейности на магнитудах выше 4.0 (Рис. 63).

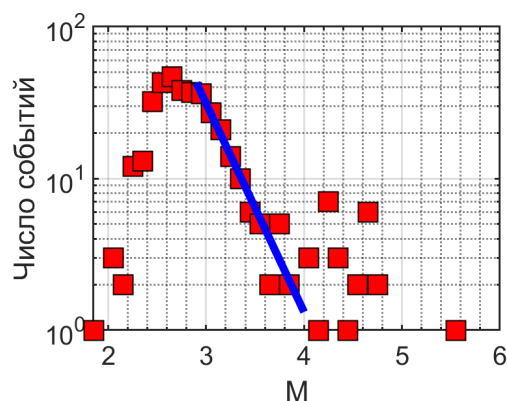


Рисунок 63 – график повторяемости для роя 4 второго интервала. Синяя линия – аппроксимация с ограничением 4.0 по магнитудам сверху. Значение $b = 1.37 \pm 0.15$ в диапазоне магнитуд от 2.9 до 4.0

Оценка представительности для всего роя на уровне значимости 0.15 дает $M_c = 2.9$ при ограничении сверху 4.0. При анализе вариаций M_c в окне 150 событий и сдвигом 25 с уровнем значимости 0.15 значение не превышает 2.8. Выберем порог 2.9 для всего роя. Временной профиль роя представлен на рисунке 64.

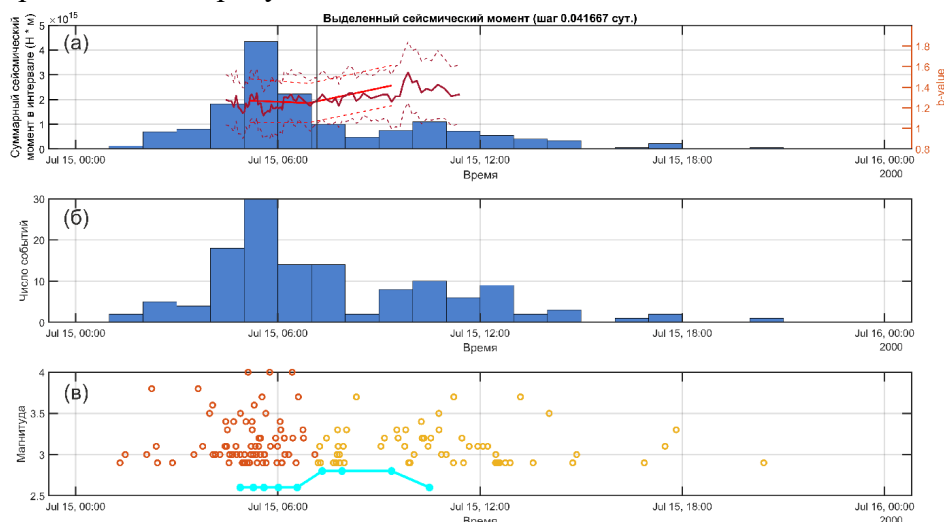


Рисунок 64 – графики для роя 4 второго интервала интрузии вулкана Миякедзима с ограничением по магнитудам сверху 4.0: (а) – график высвобождения суммарного сейсмического момента во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, оранжевые кружки – события до времени центроида, желтые – события после времени центроида. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 80 событий и сдвигом 25 событий,

красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу; бордовая линия: окно 50 событий, сдвиг 1

Значимых аномалий в вариациях b -value не наблюдается. Значения b меняются в диапазоне от 1.25 до 1.42 в окнах шириной 80 событий и от 1.13 до 1.54 в окнах шириной 50 событий.

Рой №5

График повторяемости имеет небольшой артефакт на магнитудах более 3.9 (Рис. 65).

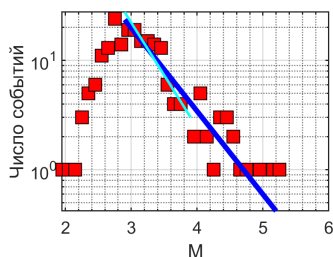


Рисунок 65 – график повторяемости для роя 5 второго интервала. Синяя линия – аппроксимация без ограничения, бирюзовая линия – с ограничением 3.9. Значение $b = 0.76 \pm 0.08$ в диапазоне магнитуд от 2.9 до 5.2. Значение $b = 0.96 \pm 0.18$ в диапазоне магнитуд от 2.9 до 3.9

Оценка M_c с уровнем значимости 0.15 без ограничения сверху, получено значение $M_c = 2.9$. Вариации M_c оценивались также без ограничения в окнах 100 событий и сдвигом 25 с уровнем значимости 0.15, значение не превышает 2.9. Временной профиль роя без ограничения сверху представлен на рисунке 66.

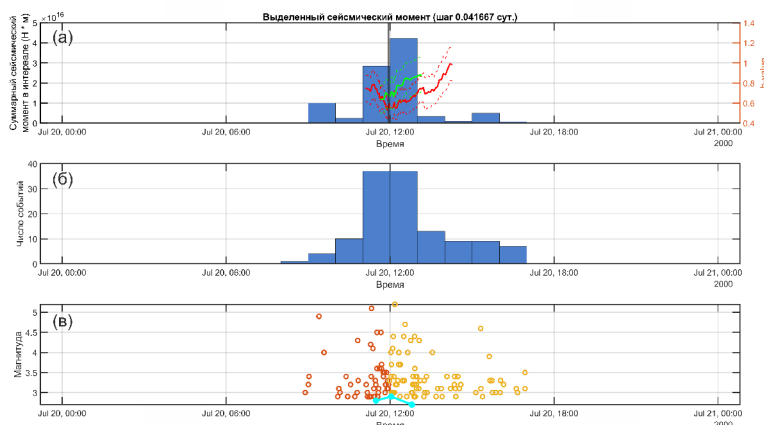


Рисунок 66 – графики для роя 5 второго интервала интрузии вулкана Миякедзима без ограничения сверху: (а) – график высвобождения суммарного сейсмического момента во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во

времени, оранжевые кружки – события до времени центроида, желтые – события после времени центроида. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 50 событий и сдвигом 1 событий с $M_c = 2.9$, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу; зеленая линия: окно 50 событий, сдвиг 1 с $M_c = 3.2$

В вариациях наблюдается падение значения в момент кульминации роя, чтобы проверить его устойчивость на рисунке 92 также показаны вариации с повышенным порогом представительности, тренд сохраняется. Также построим графики повторяемости для трех частей роя (Рис. 67).

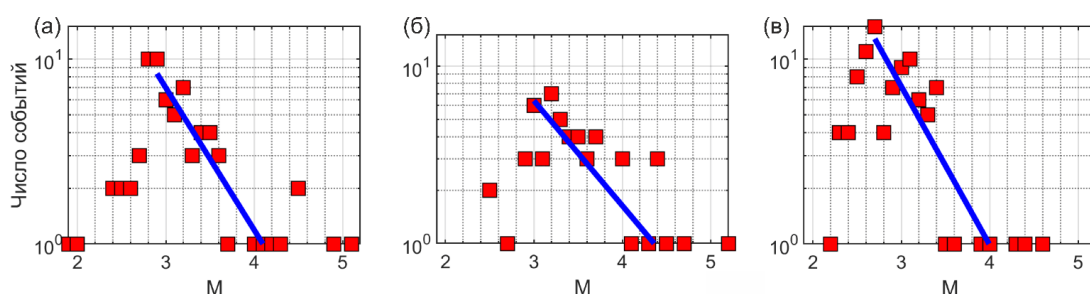


Рисунок 67 – графики повторяемости в трех окнах: (а) – в начале: $b = 0.77 \pm 0.14$ при $M_c = 2.9$; (б) – в центре: $b = 0.59 \pm 0.14$ при $M_c = 3.0$; (в) – в конце: $b = 0.86 \pm 0.12$ при $M_c = 2.7$.

Падение еще более ярко выражено при введении ограничения сверху (Рис. 68). Значения b варьируются в диапазоне от 0.24 до 1.15 в окнах шириной 50 событий.

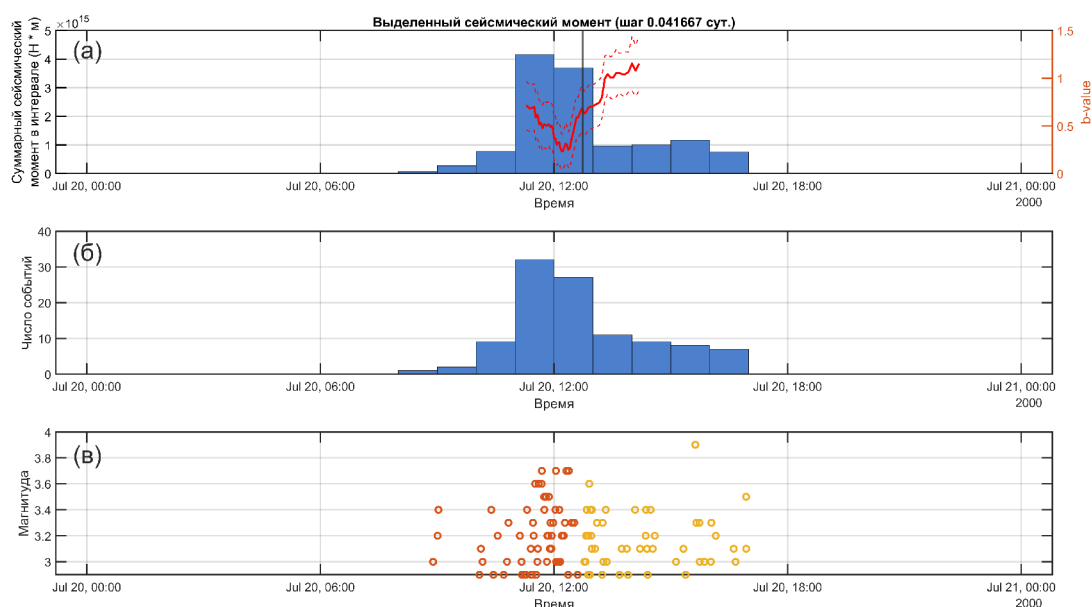


Рисунок 68 – графики для роя 5 второго интервала интрузии вулкана Миякедзима с ограничением по магнитудам сверху 3.9: (а) – график высвобождения суммарного

сейсмического момента во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, оранжевые кружки – события до времени центроида, желтые – события после времени центроида. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 50 событий и сдвигом 1 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу

Рой №6

График повторяемости имеет выраженную аномалию на магнитудах более 3.8 (рис. 69).

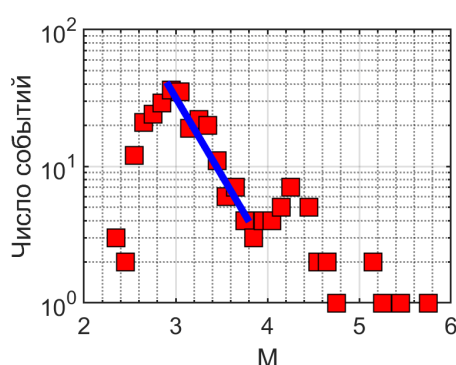


Рисунок 69 – график повторяемости для роя 6 второго интервала. Синяя линия – аппроксимация с ограничением 3.8. Значение $b = 1.13 \pm 0.13$ в диапазоне магнитуд от 2.9 до 3.8

Представительная магнитуда оценена с уровнем значимости 0.15 и ограничением сверху по 3.8 включительно, получено значение $M_c = 2.9$. Вариации представительной магнитуды рассчитаны в окнах 150 событий со сдвигом 25 событий и уровнем значимости 0.15. Значение в вариациях достигает порога 3.0 к концу роя, но в основном держится на уровне 2.9. Вариации b -value построим с обоими порогами. Временной профиль роя представлен на рисунке 70.

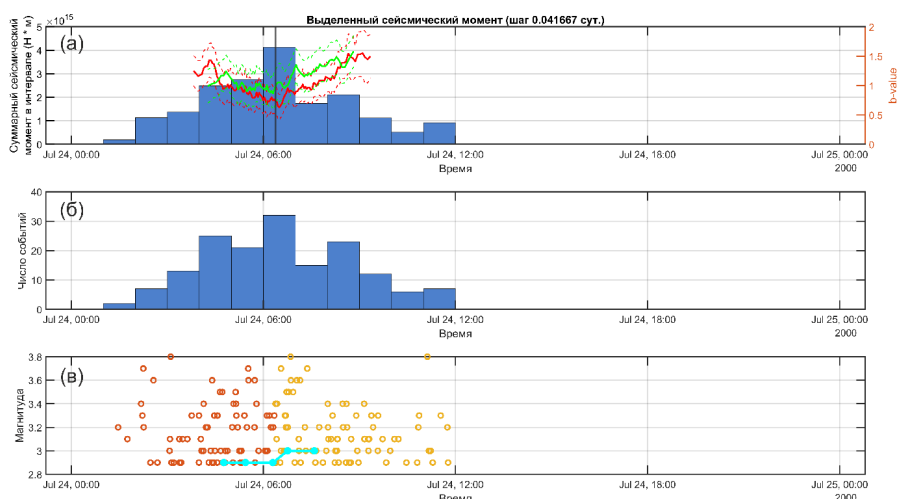


Рисунок 70 – графики для роя 6 второго интервала интрузии вулкана Миякедзима с ограничением по магнитудам сверху 3.8: (а) – график высвобождения суммарного сейсмического момента во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, оранжевые кружки – события до времени центроида, желтые – события после времени центроида. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 50 событий и сдвигом 1 событий с $M_c = 2.9$, красные пунктирные линии – п коридор стандартного отклонения по бутстрепу; зеленая линия: окно 50 событий, сдвиг 1 с $M_c = 3.0$

Слабый тренд падения значения b прослеживается с обоими порогами M_c , однако изменения не значимы. Построим графики повторяемости для трех частей роя (рис. 71).

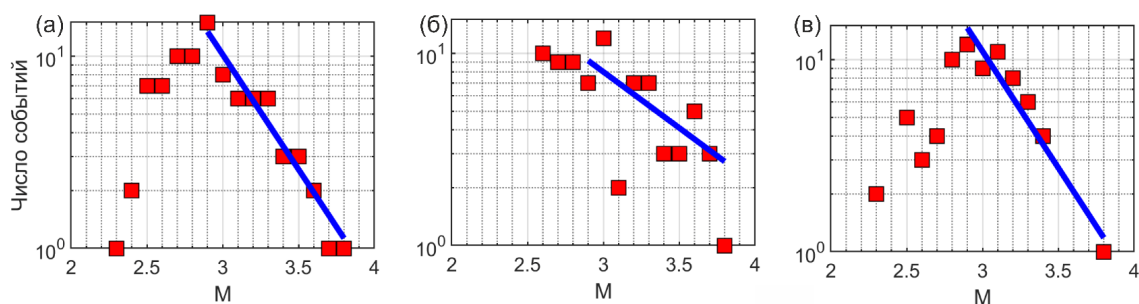


Рисунок 71 – графики повторяемости в трех окнах шириной 50 событий: (а) – в начале: $b = 1.20 \pm 0.26$ при $M_c = 2.9$; (б) – в центре: $b = 0.58 \pm 0.21$ при $M_c = 2.9$; (в) – в конце: $b = 1.21 \pm 0.40$ при $M_c = 2.9$.

Падение в центре роя может быть объяснено отклонением графика повторяемости от линейной формы.

Значения b -value меняются в диапазоне от 0.63 до 1.55 с порогом 2.9 и от 0.86 до 1.59 с порогом 3.0.

Рой №7

График повторяемости имеет небольшой избыток событий на магнитудах выше 4.1 (Рис. 72).

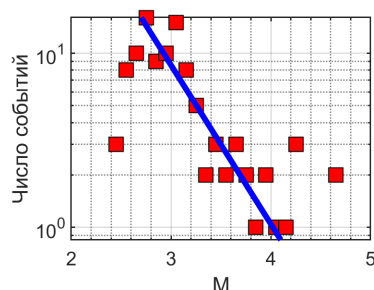


Рисунок 72 – график повторяемости для роя 7 второго интервала. Синяя линия – аппроксимация с ограничением 4.1. Значение $b = 0.91 \pm 0.15$ в диапазоне магнитуд от 2.7 до 4.1

Расчеты представительной магнитуды без ограничения, с ограничениями 4.1, 3.9, 3.8 и 3.7 дают одно и то же значение $M_c = 2.7$ на уровне значимости 0.15. Значения b соответственно: 0.81 ± 0.11 , 0.91 ± 0.15 , 0.91 ± 0.14 , 0.93 ± 0.17 , 0.94 ± 0.17 . Все эти значения совпадают в пределах погрешности. Далее будем использовать верхний порог 4.1 для сохранения наибольшего числа событий. Вариации M_c оценить не удастся, так как после фильтрации остается всего 80 событий. Временной профиль роя представлен на рисунке 73.

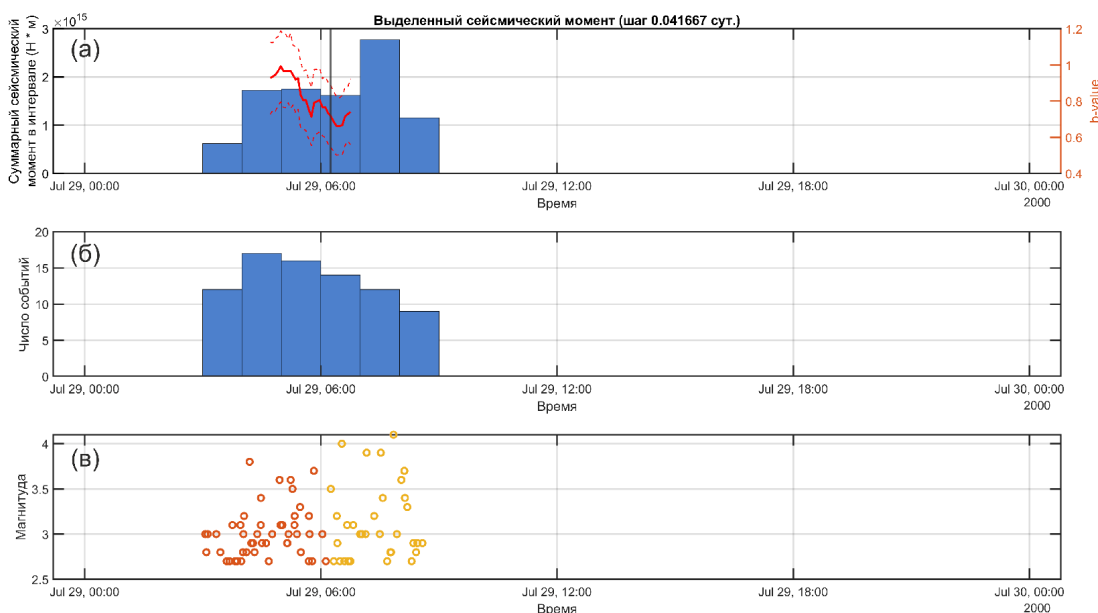


Рисунок 73 – графики для роя 7 второго интервала интрузии вулкана Миякедзима с ограничением по магнитудам сверху 4.1: (а) – график высвобождения суммарного

сейсмического момента во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, оранжевые кружки – события до времени центроида, желтые – события после времени центроида. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 50 событий и сдвигом 1 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу

В вариациях значение b меняются в диапазоне от 0.68 до 0.99 в окнах шириной 50 событий.

Рой №8

График повторяемости имеет значительную аномалию на магнитудах выше 4.0 (рис. 74).

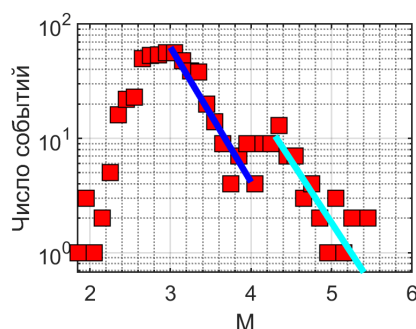


Рисунок 74 – график повторяемости для роя 8 второго интервала. Синяя линия – аппроксимация с ограничением 4.0. Значение $b = 1.19 \pm 0.11$ в диапазоне магнитуд от 3.0 до 4.0. Бирюзовая линия – аппроксимация в диапазоне от 4.3 до 5.4: $b = 1.10 \pm 0.27$

Представительная магнитуда рассчитана с ограничением 4.0 с уровнем значимости 0.15, получено значение $M_c = 3.1$. Вариации M_c оценивались в окне 200 событий со сдвигом 50 с уровнем значимости 0.15, в вариациях значение нигде не превышает 3.0. Выберем его в качестве порога. Временной профиль роя представлен на рисунке 75.

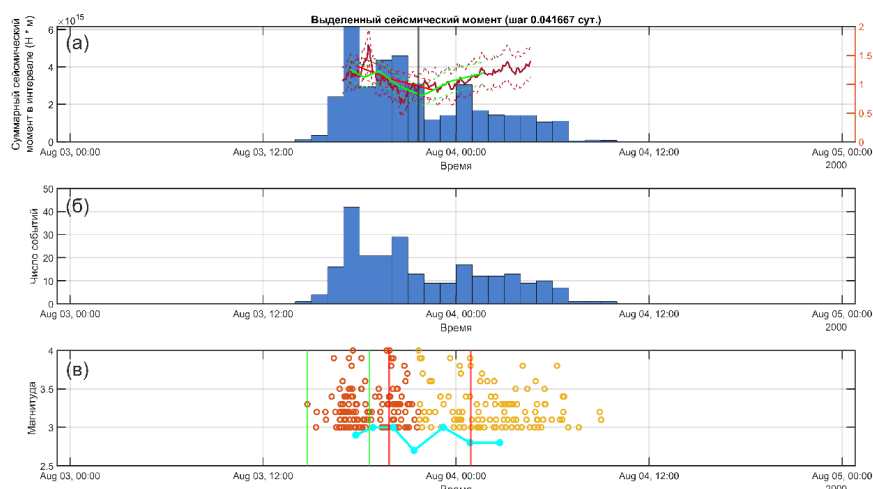


Рисунок 75 – графики для дня 8 второго интервала интрузии вулкана Миякедзима с ограничением по магнитудам сверху 4.0: (а) – график высвобождения суммарного сейсмического момента во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, оранжевые кружки – события до времени центроида, желтые – события после времени центроида. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 100 событий и сдвигом 50 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу; бордовая линия: окно 50 событий, сдвиг 1 событие; зеленая линия – окно 80 событий, сдвиг 25 событий. Снизу зеленые линии показывают границы первого окна 80 событий, красные линии – границы 5 окна по 80 событий (самое низкое значение b). На графике (в) бирюзовой линией показаны вариации M_c

В вариациях нет чётких трендов, можно говорить о стабильности значения, но в окнах шириной 80 событий наблюдается небольшое падение к центру дня.

Рассмотрим графики повторяемости в трех окнах шириной 100 событий (Рис. 76).

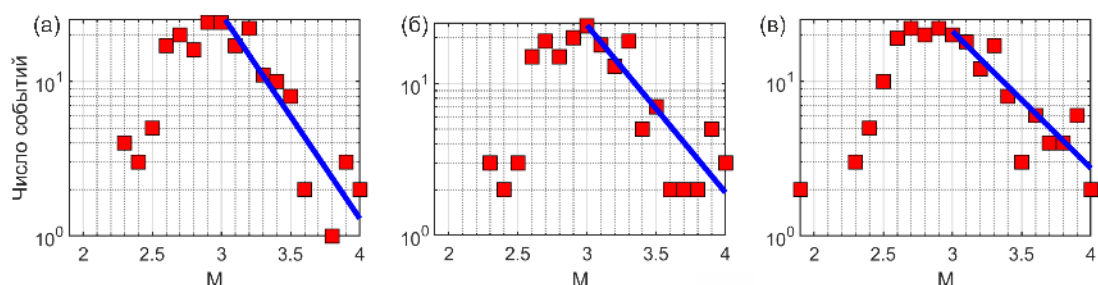


Рисунок 76 – графики повторяемости в трех окнах шириной 100 событий: (а) – в начале: $b = 1.32 \pm 0.18$; (б) – в центре: $b = 1.10 \pm 0.16$; (в) – в конце: $b = 0.88 \pm 0.15$

Рассмотрим график повторяемости в окне шириной 80 событий с минимальным значением b (Рис. 77). Падение может быть вызвано отклонением графика от линейной формы в этой точке.

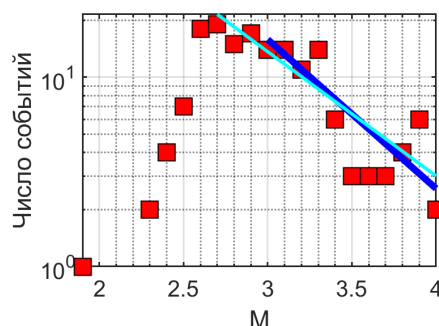


Рисунок 77 – график повторяемости пятого (красного) окна с рисунка 75, шириной 80 событий. Локальное $M_c = 2.7$, а переоценённый с таким порогом $b = 0.66 \pm 0.10$ – бирюзовая линия

В вариациях значение меняется в диапазоне от 0.80 до 1.26 в окнах шириной 80 событий и от 0.65 до 1.68 в окнах шириной 50 событий.

Третий интервал

В этом интервале использовался порог 25 событий в 4 часа, и ограничение не менее 100 событий в рое. В таком случае выделяется только один рой (рис. 78).

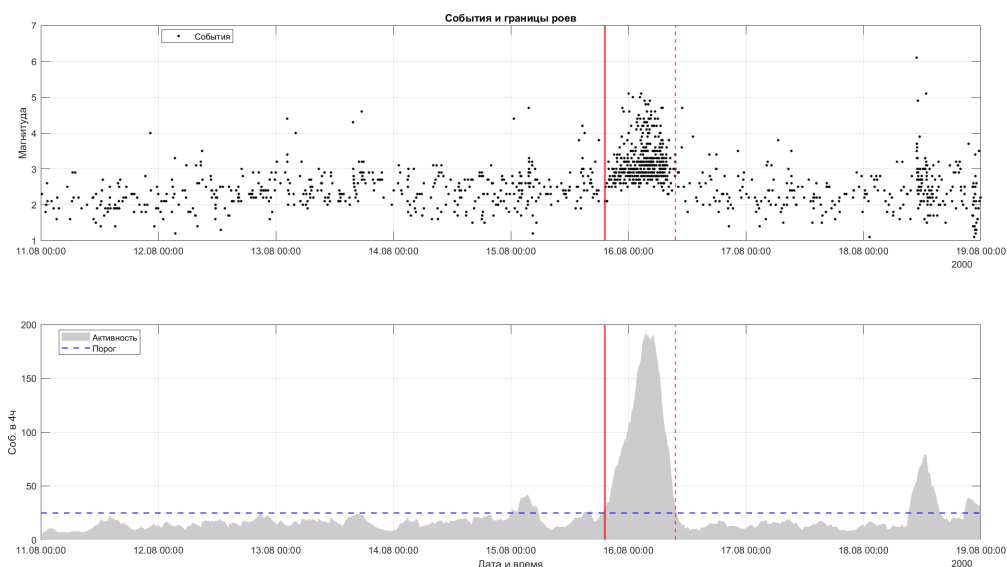


Рисунок 78 – график активности для третьего интервала периода интрузии вулкана Миякедзима. Красными сплошными вертикальными линиями отмечены времена начала роев, пунктирными – окончания роев. Горизонтальная синяя линия – порог активности.

Рой №1

График повторяемости имеет значительную аномалию на магнитудах выше 3.9 (рис. 79).

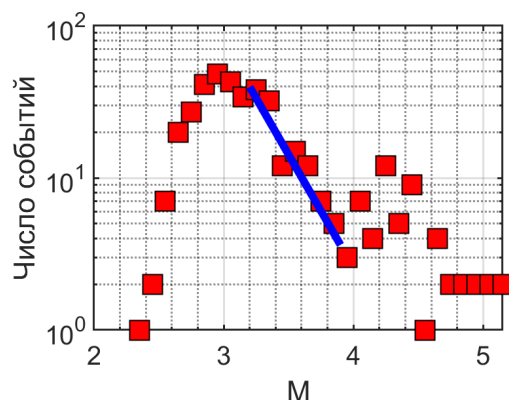


Рисунок 79 – график повторяемости для роя 1 третьего интервала. Синяя линия – аппроксимация с ограничением 3.9. Значение $b = 1.48 \pm 0.21$ в диапазоне магнитуд от 3.2 до 3.9

Представительную магнитуду оценим с ограничением сверху по 3.9 и уровнем значимости 0.15. Получаем значение $M_c = 3.2$. Вариации M_c рассчитывались в окне 200 событий со сдвигом 25 и уровнем значимости 0.15 и ограничением сверху 3.9. Представительная магнитуда в вариациях не превышает значения 3.2.

Рой имеет слабую отрицательную асимметрию по энергии и числу событий. Магнитуды событий симметричны справа и слева от центра роя, ярко выраженного основного события нет (Рис. 80).

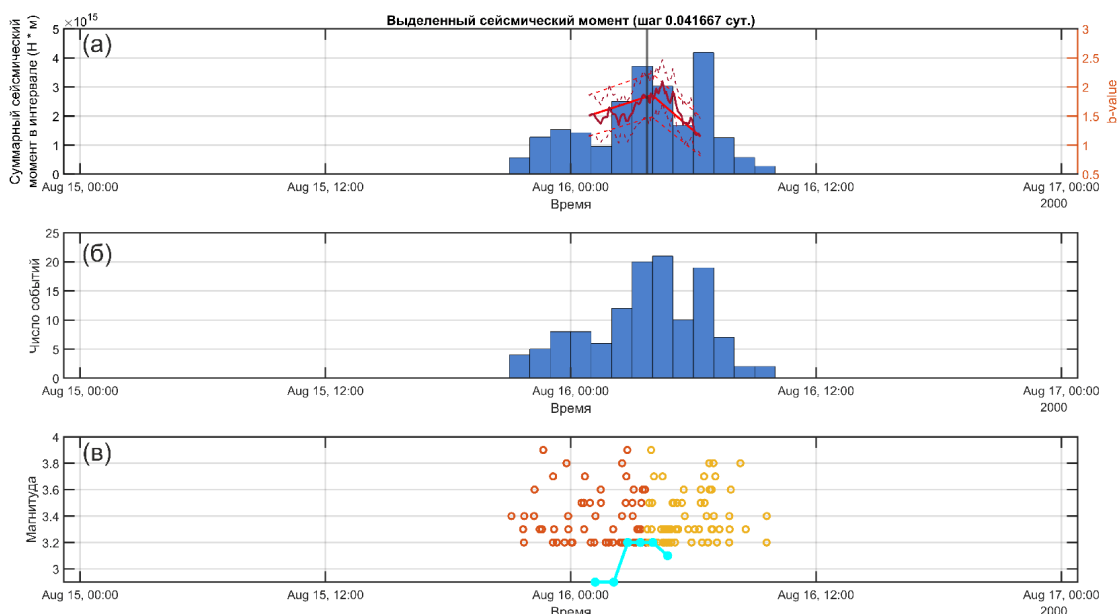


Рисунок 80 – графики для роя 1 третьего интервала интрузии вулкана Миякедзима с ограничением по магнитудам сверху 3.9: (а) – график высвобождения суммарного

сейсмического момента во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, оранжевые кружки – события до времени центроида, желтые – события после времени центроида. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 50 событий и сдвигом 37 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу; бордовая линия: окно 50 событий, сдвиг 1 событие. На графике (в) бирюзовой линией показаны вариации M_c

Значимых аномалий в вариациях b -value не наблюдается. На рисунке 81 показаны графики повторяемости для трех элементов роя. В вариациях значения b меняются в диапазоне от 1.15 до 2.10.

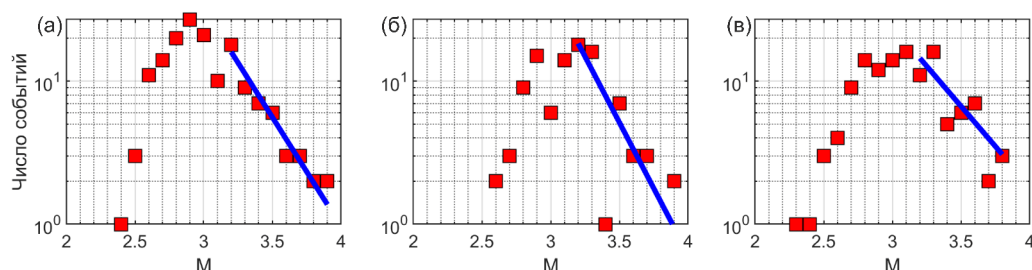


Рисунок 81 – графики повторяемости с ограничением сверху. (а) – для первых 50 событий: $b = 1.51 \pm 0.34$, (б) – для 50 событий в центре: $b = 1.82 \pm 0.41$, (в) – для последних 50 событий: $b = 1.12 \pm 0.31$

Резюме

Сейсмичность в рассматриваемом периоде концентрировалась вдоль линейной структуры в направлении Северо-запад–Юго-восток под водой между островами Мияке и Кодзу. Она была вызвана интрузией магмы, предположительно, из большого очага, находящегося под этой областью. Этот процесс сопровождался коллапсом центральной кальдеры Миякедзимы, вероятно, в результате оттока магмы из-под вулкана.

В сейсмическом режиме наблюдается избыток событий с магнитудами более 4.0, что приводит к отклонениям графиков повторяемости от линейной формы. Это явление можно объяснить, как артефактами регистрации, так и физическими причинами. Против первой гипотезы косвенно говорит тот факт, что в области пространства, не включающей область интрузии, за тот же период в каталоге такой эффект не наблюдается или выражен очень слабо. В пользу второй гипотезы говорит ряд наблюдений:

1. Показано, что в сейсмическом режиме интрузии присутствовало аномально большое количество событий с недипольной компонентой в модели очага.
2. Такие события со сбросовым механизмом наблюдаются при использовании другого каталога, причем показано, что для группы со сбросовыми механизмами и для группы со сдвиговыми механизмами магнитудно-частотные распределения отличаются.
3. Известное явление, что для интрузий в рифтовых зонах характерна генерация сбросов и грабенов, в совокупности с тем, что область острова Мяке находится в зоне активного задугового рифтинга со скоростью расхождения около 9 мм в год.
4. Похожая форма графиков повторяемости для режимов в момент коллапса вулканической кальдеры, где такая форма является результатом наличия событий с необычным механизмом, связанных с вертикальным кольцевым обрушением пород

На основе этих рассуждений было отдано предпочтение физической интерпретации. В таком случае мы принимаем гипотезу о том, что в наблюдаемой сейсмичности смешано два режима: более мелкие события представляют собой режим роевой интрузивной активности в виде вулкано-тектонических землетрясений, более сильные события это, предположительно, землетрясения, вызванные коллапсом пород вследствие интрузии.

На некоторых рядах удалось косвенно продемонстрировать, что сильные и слабые события представляют собой два отдельных сейсмических режима. Обратим внимание, например, на рои 8 первого интервала (1.8), рои 1 и 4 второго интервала (2.1 и 2.4).

На примере восьмого ряда первого интервала хорошо видны отдельные события с магнитудами более 4, которые выпадают из режима более слабых событий. В этом смысле можно сказать, что эти события не предсказываются по графику повторяемости более слабых событий. На примере ряда 2.1 можно увидеть, что сильнейшее событие приходится не на пик роевой активности, а стоит особняком и происходит ближе к концу ряда, на спаде активности. Причем его афтершоки гораздо менее интенсивны, чем события ряда, и не смещают пик активности к сильнейшему событию. При удалении же аномальных событий из рассмотрения, рой принимает симметричную во времени форму, как по числу событий, так и по энергии. На примере ряда 2.4 можно увидеть, что роевая активность и форшок-афтершоковая серия происходят параллельно во времени, но при этом разнесены по пространству на расстояние порядка 10 км.

Также стоит отметить, что наблюдаются сильные события с афтершоковыми сериями, которые происходят и вне периодов всплесков роевой активности.

Поскольку в данном исследовании нас в первую очередь интересует роевая активность, при дальнейшем исследовании роев для них вводилось ограничение сверху по магнитудам, чтобы второй режим не искажал результаты.

Всего за этот период интрузии был рассмотрен 21 рой, их параметры представлены в таблице 1. Первая цифра в нумерации роев указывает на номер одного из трех временных интервалов, на которые был разделен период интрузии. Рой 1.1 показан после разделения на два дополнительных роя: 1.1.1 и 1.1.2. В таблице 1 столбец N_c – число событий, оставшееся после фильтрации по пространству и магнитудам; столбец «Диапазон M » показывает используемый для анализа в этом рое диапазон магнитуд; столбец «Длительность» – содержит длительности роев в сутках; столбец «Среднее b » – b -value рассчитанное по всем событиям роя в указанном диапазоне магнитуд; столбцы «Минимальное и Максимальное b » содержат минимальные и максимальные значения b -value, наблюдавшиеся во временных вариациях роя; столбец « $M_{0\ skew}$ » – коэффициент асимметрии высвобождения сейсмического момента; столбец « N_{skew} » – коэффициент асимметрии профиля активности. В столбце «Аномалия b » указано, наблюдается ли визуально падение b -value в момент кульминации роя во временных вариациях параметра. Такой столбец приводится из соображений, что одинаковый характер изменений параметра в большом числе различных роев может сигнализировать о наличии закономерности, даже если изменения статистически незначимы в рамках каждого роя. В столбце «Значимость» указывается, есть ли основания отвергнуть истинность наблюдаемой аномалии: «да» – означает, что таких оснований нет; «мало N_c » – означает, что в рое слишком мало событий, чтобы делать на основе него выводы; «Нелин.» – означает, что аномалию можно объяснить локальным отклонением графика повторяемости от линейной формы; « M_c » – означает, что аномалию можно объяснить локальным ухудшением представительности.

Таблица 1. Параметры роев периода интрузии вулкана Миякедзима

№	Начало	Конец	N_c	Диапазон M	Длительность, сутки	Среднее b -value	b_{min}	b_{max}	$M_{0\ skew}$	N_{skew}	Аномалия b	Значимость
1.1.1	26-Jun-2000 20:05:08	28-Jun-2000 09:00:00	498	[2.7;3.9]	1.54	1.09 ± 0.05	0.53	1.40	0.06	0.19	нет	-
1.1.2	28-Jun-2000 09:00:00	29-Jun-2000 00:00:00	415	[2.7;3.9]	0.63	1.04 ± 0.07	0.62	1.67	0.72	0.81	возможно	да
1.2	29-Jun-2000 08:50:43	30-Jun-2000 03:54:04	181	[3.1;3.9]	0.79	1.25 ± 0.15	0.38	1.67	0.62	1.10	да	да

1.3	30-Jun-2000 23:38:06	01-Jul-2000 05:43:42	133	[2.1;5.0]	0.25	0.51 ±0.06	0.47	0.52	-0.36	0.46	нет	-
1.4	01-Jul-2000 20:30:00	02-Jul-2000 03:50:42	67	[2.7;3.7]	0.30	1.52 ±0.22	1.33	1.51	-0.18	-0.15	нет	Мало Nc
1.5	02-Jul-2000 04:45:43	02-Jul-2000 10:38:55	67	[2.7;3.9]	0.25	1.52 ±0.22	0.65	0.87	0.96	0.39	нет	Мало Nc
1.6	03-Jul-2000 07:55:49	03-Jul-2000 18:16:34	143	[2.8;4.3]	0.43	0.95 ±0.11	0.62	1.03	0.91	0.60	возможн о	нет
1.7	03-Jul-2000 21:26:05	04-Jul-2000 03:58:21	92	[2.6;4.8]	0.27	0.73 ±0.09	0.38	0.66	0.36	0.40	нет	Мало Nc
1.8	04-Jul-2000 10:52:27	04-Jul-2000 18:30:50	145	[2.8;3.8]	0.32	1.36 ±0.21	1.22	1.52	-0.01	0.03	возможн о	нет
1.9	05-Jul-2000 06:56:58	05-Jul-2000 17:02:26	119	[2.8;3.9]	0.42	1.37 ±0.17	0.90	1.89	1.56	0.75	да	Мало Nc
1.10	06-Jul-2000 14:40:08	07-Jul-2000 07:56:10	190	[3.1;3.9]	0.72	1.46 ±0.15	1.02	1.88	0.18	0.23	нет	-
1.11	07-Jul-2000 18:09:53	07-Jul-2000 23:34:53	64	[2.8;3.5]	0.23	2.02 ±0.34	1.98	2.13	0.1	0.23	нет	Мало Nc
2.1	08-Jul-2000 22:58:10	09-Jul-2000 09:19:14	152	[2.8;3.4]	0.43	1.01 ±0.17	0.64	1.31	0.71	0.38	да	Нелин.
2.2	11-Jul-2000 16:16:42	12-Jul-2000 03:28:37	146	[3.0;3.9]	0.47	1.28 ±0.12	1.20	1.32	1.65	0.73	да	Нелин.
2.3	12-Jul-2000 10:33:06	13-Jul-2000 17:44:53	272	[2.9;3.4]	1.30	0.96 ±0.16	0.36	1.77	0.8	0.66	да	нет
2.4	15-Jul-2000 01:02:41	15-Jul-2000 20:27:48	359	[2.9;4.0]	0.81	1.37 ±0.15	1.13	1.54	1.10	1.14	нет	-
2.5	20-Jul-2000 08:53:37	20-Jul-2000 17:05:44	106	[2.9;3.9]	0.34	0.96 ±0.18	0.24	1.15	0.62	0.70	да	Mc
2.6	24-Jul-2000 01:27:51	24-Jul-2000 11:46:10	163	[2.9;3.8]	0.43	1.13 ±0.13	0.63	1.55	0.21	-0.02	возможн о	Нелин.
2.7	29-Jul-2000 02:58:29	29-Jul-2000 08:34:47	80	[2.7;4.1]	0.23	0.91 ±0.15	0.68	0.99	-0.32	0.31	возможн о	мало Nc

2.8	03-Aug-2000 14:45:06	04-Aug-2000 09:22:12	248	[3.0;4.0]	0.78	1.19 ± 0.11	0.65	1.68	0.64	0.92	ВОЗМОЖНО	да
3.1	15-Aug-2000 19:15:08	16-Aug-2000 09:37:38	124	[3.2;3.9]	0.60	1.48 ± 0.21	1.15	2.10	-0.35	-0.28	нет	-

В результате анализа временных профилей роев их можно разделить на две группы: симметричные и положительно-асимметричные (Рис. 82). Первая группа представляет собой симметричные во времени всплески активности, энергия и число событий нарастают и спадают одинаково до и после времени центроида, которое приходится на пик активности роя и центр временного интервала. Это, например, рои 1.1.1, 1.3, 1.4, 1.5, 1.7, 1.8, 1.10, 1.11, 2.1, 2.6, 2.7. 3.1. Они обозначены зеленым цветом в таблице 1 в столбце с номером роя.

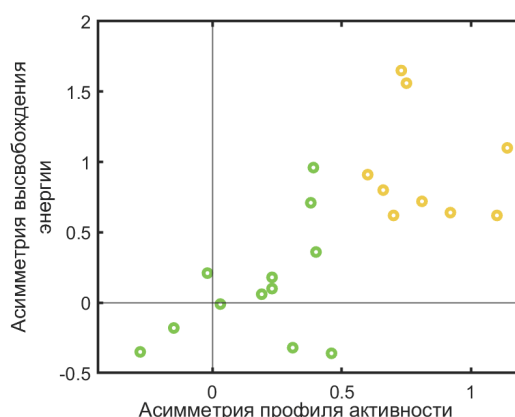


Рисунок 82 – диаграмма параметров асимметрии роев Миякедзима, зеленым показана симметричная группа, желтым – положительно-асимметричная

Их коэффициенты энергетической асимметрии лежат в диапазоне от -0.36 до 0.96 со средним значением 0.11, а коэффициенты асимметрии по числу событий от -0.28 до 0.46 со средним значением 0.18. Значение b от 0.51 до 2.02 со средним 1.24. Для этих роев не удалось обнаружить устойчивых закономерностей в поведении b , кроме роя 2.1, где, однако, аномалию можно объяснить отклонением графика повторяемости от линейной формы. Но стоит отметить, что это относительно короткие рои (средняя длительность 0.37 суток) с небольшим числом событий: медианное значение всего 160 событий до фильтрации по порогам магнитуд и 116 событий после фильтрации. Не исключено, что малое число событий не позволяет увидеть какие-либо аномалии в вариациях b .

Вторая группа – это рои, у которых сперва происходит всплеск событий и затем следует более вытянутый «хвост» релаксации: 1.1.2, 1.2, 1.6, 1.9, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.8. То есть кульминация

роя происходит в начале, после чего рой медленно затухает, это выражается в наиболее положительных коэффициентах асимметрии.

Их коэффициенты энергетической асимметрии лежат в диапазоне от 0.62 до 1.65 со средним значением 0.96, а коэффициенты асимметрии профиля активности от 0.60 до 1.14 со средним значением 0.82. Значение b от 0.90 до 1.25 со средним 1.11. Это более длительные рои (средняя длительность 0.58 суток) с большим числом событий: медианное значение 432 событий до фильтрации по порогам магнитуд и 175 событий после фильтрации. Для многих из этих роев наблюдается аномалия b , но в большинстве случаев её можно объяснить артефактами данных.

Экстремально высокие значения b -value (более 1.90) наблюдаются только в вариациях двух роев: 1.11 и 3.1. Нельзя сказать об устойчивых закономерностях в поведении b -value во времени.

3.7 Вулкан Фаградалсфьядль

3.7.1 Обзор

Вулкан расположен на полуострове Рейкьянес в рифтовой зоне Исландии. Рифт представлен косой сейсмической и вулканической зонами шириной от 5 до 10 км со скоростью спрединга около 18-19 мм в год [Fischer et al., 2022]. В результате растяжения в этой зоне наблюдается высокая сейсмическая активность с большим числом сбросов, а также грабены и сдвиговые разломы. В центральной части полуострова сейсмичность в основном концентрируется в системах трещин вулканов Фаградалсфьядль и Крисювик. Система вулкана Фаградалсфьядль активизировалась 24 февраля 2021 года с относительно сильного землетрясения $M_L = 5.3$. На основе деформаций была идентифицирована интрузия магмы на небольшой глубине [Fischer et al., 2022]. Дайка достигла поверхности 19 марта 2021 года, когда и началось трещинное извержение. На рисунке 1 представлено распределение сейсмических событий во время интрузии.

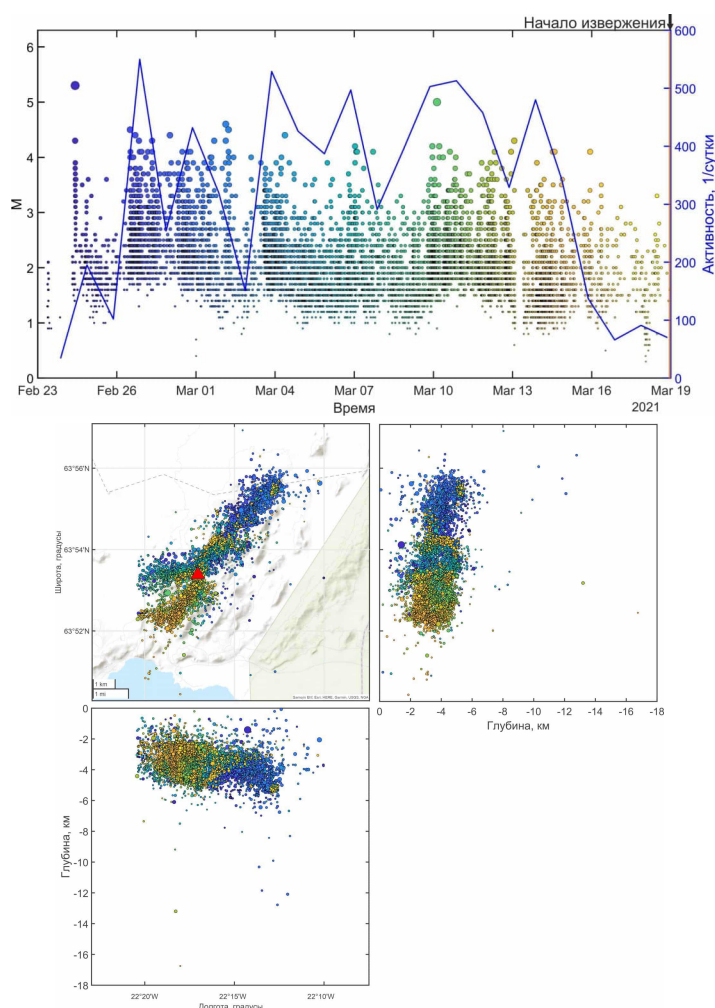


Рисунок 1 – события интрузии вулкана Фаградалсфьядль перед извержением 2021-го года: сверху во времени, снизу – на карте

В работе [Fischer et al., 2022] выделяют три сегмента сейсмичности (Рис. 2). Они схематично показаны на рисунке ниже. Сегмент 2 вытянут вдоль направления рифтового разлома.

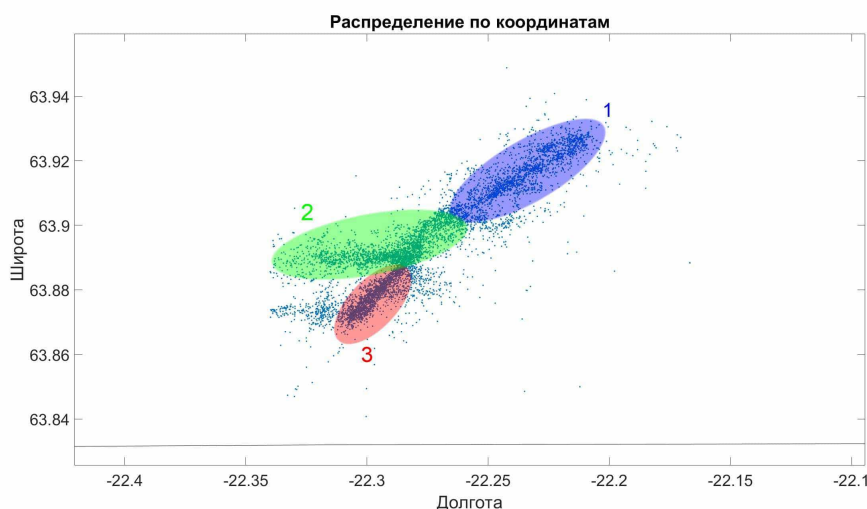


Рисунок 2 – схематичное изображение трех сегментов сейсмичности, активизировавшихся поочередно во время интрузии согласно [Fischer et al., 2022]

Авторы [Fischer et al., 2022] разделили период интрузии на несколько периодов по активации того или иного сегмента. Сейсмическая активность проявилась с сильного события и его афтершоковой серии, активируя первый сегмент. Между 2 и 9 марта активировалась центральная часть в пересечении трех сегментов и затем сегмент 2. Между 9 и 14 марта рой мигрировал на Юг и активировал сегмент 3, после чего к 19 марта сейсмичность вернулась в центр – точку пересечения сегментов, где и произошел прорыв магмы на поверхность. На основе предшествовавшей сейсмичности, начавшийся еще в 2017-ом году, авторы предполагают, что в этой точке сформировалась ослабленная зона под воздействием растягивающих напряжений. Извержение контролировалось изменениями поля напряжений в рифтовой зоне и было инициировано крупным тектоническим землетрясением 24 февраля.

Однако в работе [Hobé et al., 2025] высказана и другая гипотеза, авторы обнаружили глубинную сейсмичность (на глубине около 9 км) задолго до извержения 2021-го года, они предполагают, что магма начала накапливаться под вулканом по меньшей мере еще в мае 2020-го года. С помощью сейсмической томографии они также обнаружили зону с аномальным повышением соотношения V_p/V_s на глубинах 9-12 км, авторы связывают её с верхней частью магматического резервуара. По мнению авторов [Hobé et al., 2025], интрузия началась после того, как давление в резервуаре достигло критического порога и

уже внедрение дайки вызвало первое сильнейшее землетрясение ($M_L=5.4$). Тем не менее в пользу первой гипотезы о тектонической первопричине косвенно говорит наличие выраженной серии афтершоков у этого события и тот факт, что вулканический рой начался только, примерно, через двое суток после него, а не сразу. Это может говорить о том, что магме понадобилось какое-то время, чтобы начать движение после того, как путь к поверхности освободился.

В работе используется каталог сети ReikNet из исследования [Fischer et al., 2022]. В [Fischer et al., 2022] указано, что в этом каталоге для расчета магнитуд использовались стандартные формулы для локальных магнитуд полуострова Рейкьянес, что позволяет предположить, что эти магнитуды эквивалентны региональным локальным магнитудам исландского каталога сети SIL. Далее будет рассматриваться участок от 63.8 до 63.95 градусов по широте и от -22.16 до -22.34 градусов по долготе.

Для вычисления сейсмического момента событий необходимо перейти к моментной магнитуде. Формула для такого перехода в случае каталога сети SIL представлена в работе [Panzera et al., 2015]:

$$M_w = (1.215 \pm 0.031)M_L + (-0.373 \pm 0.110), M_L \geq 2.5$$

Предполагая эквивалентность локальных магнитуд сети ReikNet локальным магнитудам сети SIL, далее будем использовать эту формулу для пересчета.

Рассмотрим сейсмическую активность рассматриваемого участка (Рис. 3).

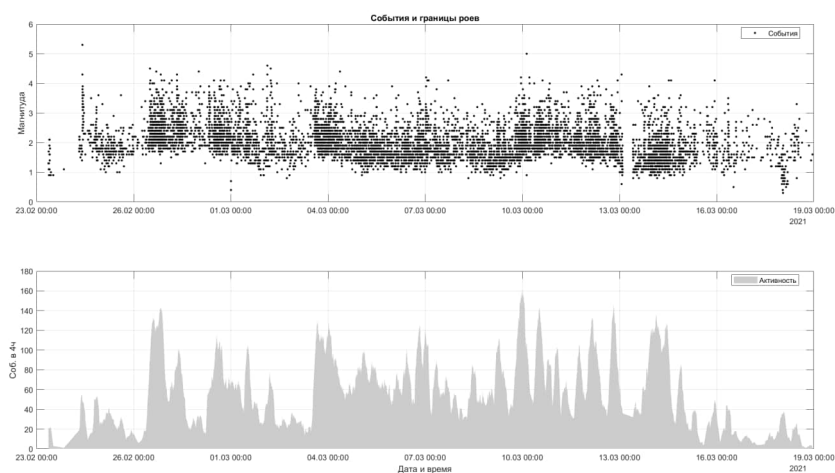
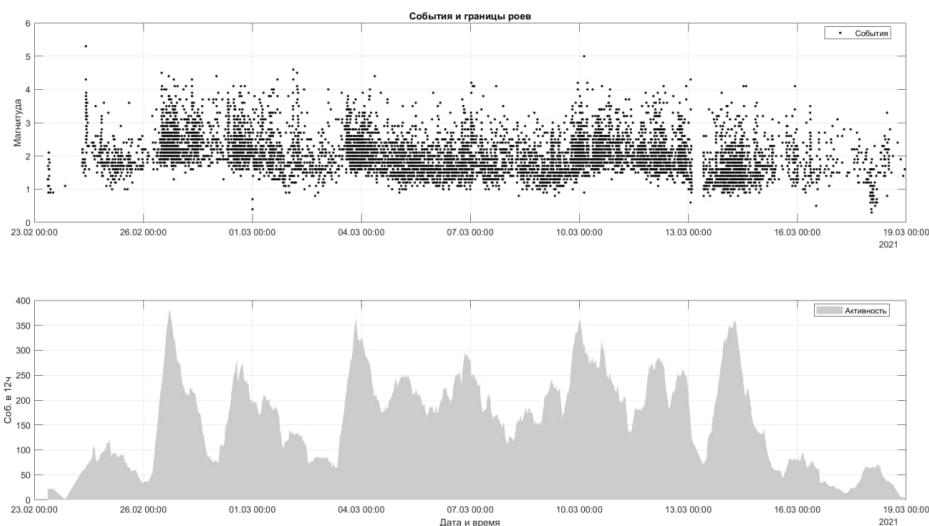


Рисунок 3 – сейсмическая активность в период интрузии вулкана Фаградалсфьядль 2021-го года с разными ширинами временных окон



Продолжение рисунка 3

События идут плотным равномерным потоком без ярко выраженных уплотнений и разрежений, конкретные роевые всплески, отделенные достаточно длинными периодами затишья, не наблюдаются. За исключением даты 13.03 00:00, но это затишье имеет очень резкие временные границы и, вероятно, вызвано пробелом в записи.

В работе [Fischer et al., 2022] период интрузии разделен на несколько временных интервалов по активизации того или иного сегмента сейсмичности. Рассмотрим основные параметры этих интервалов (таблица 1). Представительная магнитуда во всех периодах оценивалась с уровнем значимости 0.01. На рисунке 4 представлены графики повторяемости всех интервалов.

Таблица 1. Параметры временных интервалов сейсмичности в период интрузии

Описание	Период	N	M_c	N_c	b
Начало активизации первого сегмента с сильного события и его афтершоковой серии	24.02.2021 – 02.03.2021	1770	2.7	464	0.86 ± 0.05
Активизация центральной части, сегмент 2	02.03.2021 - 09.03.2021	2619	2.3	670	0.91 ± 0.04
Активизация сегмента 3	09.03.2021 - 14.03.2021	2205	2.4	560	0.93 ± 0.04
Возврат к центральному сегменту с последующим прорывом	14.03.2021 -19.03.2021	922	2.0	276	0.86 ± 0.06

N – число событий, M_c – представительная магнитуда, N_c – число представленных событий, b – наклон графика повторяемости

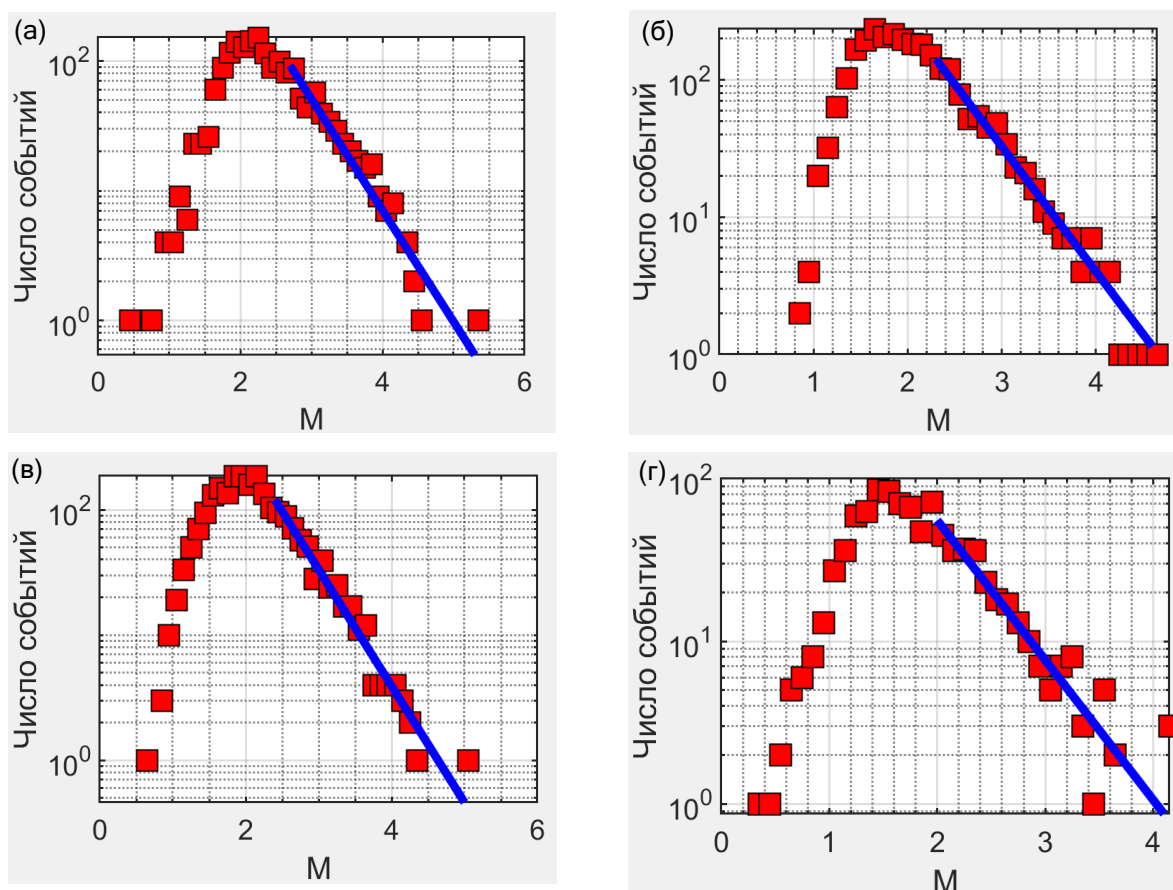


Рисунок 4 – графики повторяемости для временных интервалов по [Fischer et al., 2022], буквы (а,б,в,г) соответствуют строкам таблицы 1 в том же порядке

От периода к периоду среднее значение *b-value* почти не меняется и держится на уровне близком к «классической» единице. Графики имеют линейную часть без значительных отклонений и артефактов.

3.7.1 Анализ сейсмичности

Вариации представительной магнитуды во времени рассчитаны в окнах шириной 500 событий и сдвигом 250 с уровнем значимости 0.05. Максимальное значение M_c в вариациях достигает 2.5, выберем его в качестве порога для всего периода и рассчитаем вариации наклона графика повторяемости. Выбор такого порога к тому же позволит нам использовать формулу из [Panzera et al., 2015] для вычисления сейсмического момента для всех событий без дополнительных допущений.

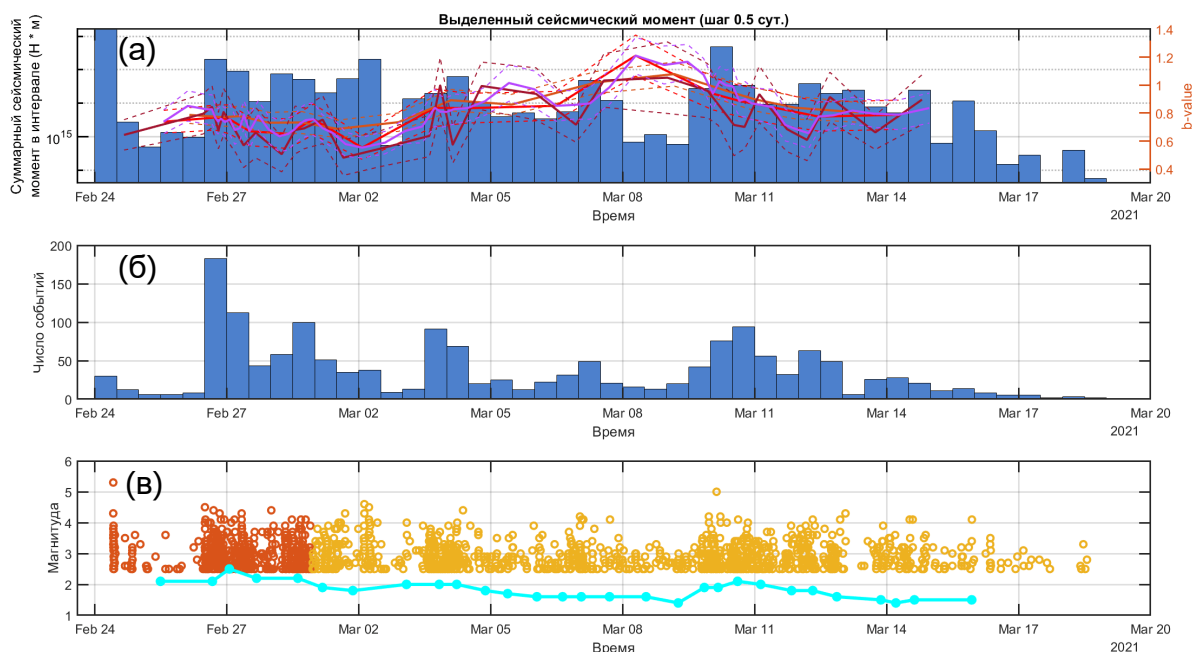


Рисунок 5 – графики для роя интрузии вулкана Фаградалсфьядль: (а) – график высвобождения суммарного сейсмического момента во временном окне; (б) – график числа событий во времени; (в) – распределение событий во времени, оранжевые кружки – события до времени центроида, желтые – события после времени центроида. На графике (а) красной линией показаны вариации b -value в скользящем по времени окне шириной 100 событий и сдвигом 100 событий, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу; оранжевая линия: окно 200, сдвиг 100; бордовая линия: окно 50 событий, сдвиг 50; фиолетовая линия: окно 100, сдвиг 25

Видно, что в целом значения в вариациях держатся на уровне близком к 1 либо ниже. В вариациях значения b меняются в диапазоне от 0.55 до 1.21 в окнах шириной 100 событий. Первое понижение (до ~ 0.5) можно сопоставить со всплеском активности в районе 27 февраля по 2 марта, однако в остальном корреляция не прослеживается. Самым важным результатом тут является отсутствие аномально высоких значений параметра b , максимальное значение в вариациях достигает всего лишь 1.21, что в пределах погрешности совпадает со стандартным для тектонической сейсмичности. Приведем несколько графиков повторяемости соответствующих минимальным значениям (в районе 2 марта и 12 марта) и максимальному значению (в районе 8 марта) в вариациях с окном шириной 100 событий и сдвигом 25 (Рис. 6).

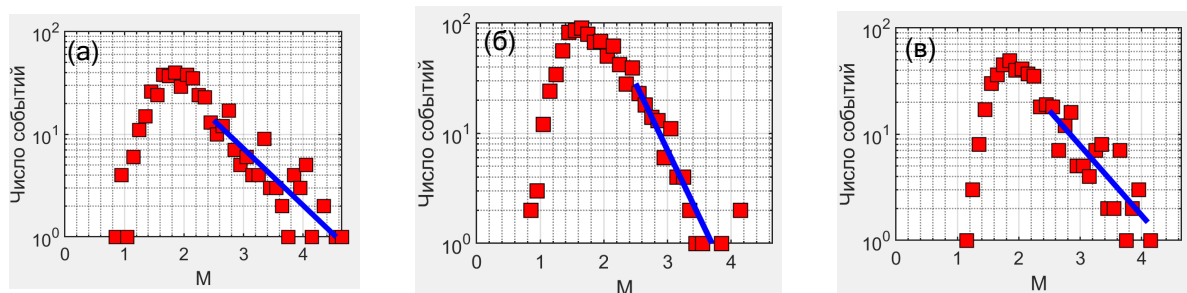


Рисунок 6 – графики повторяемости для трех окон шириной 100 событий. (а) – в первом окне: $b = 0.55 \pm 0.07$; (б) – во втором окне: $b = 1.21 \pm 0.13$; (в) – в третьем окне:

$$b = 0.67 \pm 0.11$$

Хотя графики с низкими значениями довольно зашумлены, результаты аппроксимации выглядят вполне правдоподобным и не искажены искусственно артефактами. Отсутствие anomalously высоких значений может говорить о том, что в данном случае интрузия испытывала меньшее сопротивление со стороны среды, но при этом фазы консолидации разломов в более крупные все равно присутствуют, давая anomalously низкие значения в некоторых местах.

Резюме

Вулкан находится в активной рифтовой зоне с высокой тектонической активностью. Извержение, согласно [Fischer et al., 2022], могло быть инициировано крупным тектоническим землетрясением. Однако есть аргументы и в пользу чисто магматической инициации, об этом свидетельствуют признаки предварительного накопления магмы в подземном резервуаре под вулканической системой [Hobé et al., 2025]. Так или иначе в обоих случаях есть свидетельства, что интрузия происходила по тектонически ослабленной зоне.

Сейсмичность во время интрузии мигрировала по рою трещин вулканической системы, а истечение лавы произошло в ослабленной тектоническими напряжениями точке. Интрузия длилась 23 дня. Поток событий роя относительно равномерен во времени без отдельно стоящих всплесков активности, выраженных пауз и четкой кульминации по высвобождению энергии.

В вариациях *b-value* не наблюдается экстремально высоких значений и не прослеживается четкой связи между временными профилями роя и изменениями параметра *b*. Этот случай показывает, что при отсутствии соответствующего паттерна активности и высвобождения энергии не наблюдается и паттерна падения значений наклона графика повторяемости от экстремально высоких значений.

Сейсмический режим этого интрузивного эпизода был исследован нами в работе [Греков, 2025], рассматривались вариации наклона графика повторяемости во времени, изменения степени кластеризации во времени, проводился анализ временной асимметрии высвобождения энергии. Там же этот эпизод сопоставлялся с интрузивным эпизодом Баурдарбунга 2014 года.

Глава 4. Обобщение и интерпретация результатов

Обобщение результатов

В работе Моги [Mogi, 1963] была предложена классификация известных типов последовательностей землетрясений, которые различаются по форме высвобождения энергии и генерации событий во времени. Тут мы исследовали более тонкую структуру вулканических роев в том же контексте. Предпосылкой для этого служит существование нескольких моделей генерации вулканических роев при интрузиях. Это наталкивает на мысль о возможном многообразии типов вулканических роев, отражающим различия в процессах инициации подобно лабораторным экспериментам по разрушению образцов горных пород под прессом, где наблюдаются различные формы акустических откликов (в том числе роеподобных), например, в зависимости от сценариев нагружения.

В данной работе проанализировано суммарно 32 роя, зарегистрированных в разных вулканических системах: 2 роя интрузии перед извержением вулкана Редаут в 2009-ом году, 2 роя в период интрузии вулкана Августина перед извержением в 2006-ом году, 4 роя вулкана Кумбре-Вьеха в период интрузии перед извержением в 2021-ом году, 1 рой в период интрузии вулкана Иерро перед извержением 2011-го года, 1 рой в период интрузии вулкана Баурдарбунга перед извержением 2014-го года, 1 рой в период интрузии вулкана Фаградальсфьядль перед извержением 2021-го года, 21 рой в период интрузии вулкана Миякедзима во время извержения 2000-го года.

Расположение этих вулканических систем показано на рисунке 1. Их общие характеристики в таблице 1.

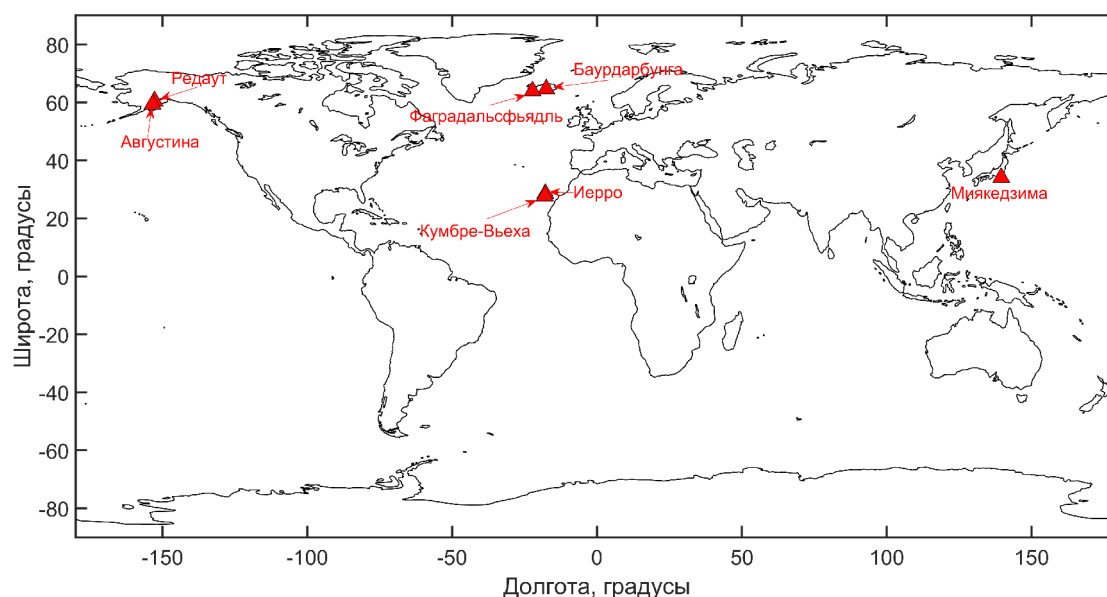


Рисунок 1 – карта исследуемых в работе вулканов

Для анализа специально выбирались хорошо задокументированные случаи, где достаточно достоверно известно наличие интрузивного процесса. Также, чтобы минимизировать смешение сигналов от вулканических источников разной природы, рассматривалась сейсмичность только в предэруптивные фазы, за исключением случая Миякедзима, где интрузия происходила в стороне от центрального вулкана без извержения в области интрузии.

Таблица 1. Параметры рассмотренных вулканов

Вулкан	Год извержения	Характерный тип магмы	Тип извержения	Зона
Августина	2006	Андезитовая	Эксплозивно-эффузивное	Субдукция
Редут	2009	Андезитовая	Эксплозивно-эффузивное	Субдукция
Кумбре-Вьеха	2021	Базальтовая	Эксплозивно-эффузивное	«Горячая точка»
Иерро	2011	Базальтовая	Эксплозивно-эффузивное	«Горячая точка»
Баурдарбунга	2014	Базальтовая	Эффузивное	Рифт и «горячая точка»
Фаградальсфьядль	2021	Базальтовая	Эффузивное	Рифт и «горячая точка»
Миякедзима	2000	Базальтовая	Эксплозивно-эффузивное	Субдукция

Для формализации различия во временных профилях роев использовалась концепция временной асимметрии, предложенная в работе [Roland, McGuire, 2009] для различия трех типов последовательностей по Моги и для анализа форм тектонических роев землетрясений. Там используется коэффициент асимметрии высвобождения сейсмического момента во времени. Афтершоковые последовательности обладают сильной положительной асимметрией, поскольку большая часть энергии высвобождается в начале серии, рой же могут иметь как положительные, так и отрицательные значения, но меньшие по модулю.

По определению Моги рой землетрясений это серия событий, в которой «количество и магнитуа землетрясений постепенно увеличиваются со временем, а затем уменьшаются после определенного периода. Среди них нет одного преобладающего главного землетрясения». В таком случае момент, до которого количество и магнитуа землетрясений растет и после которого они спадают, можно назвать кульминацией роя. Для описания положения кульминации роя во времени внутри роя использовался второй коэффициент асимметрии по событиям, по сути он отражает асимметрию временного профиля активности последовательности. Так, например, у афтершоковой последовательности оба коэффициента асимметрии будут положительными, так как серия афтершоков затухает во времени после основного толчка, то есть большая часть событий происходит в начале серии. Отметим, что в общем случае эти два коэффициента могут

и отличаться по знаку. Это может свидетельствовать, например, о том, что достаточно сильное событие произошло не в кульминации роя.

В симметричном рое стадии роста и спада активности будут иметь, примерно, одинаковую длительность. Если же кульминация роя смещена ближе к концу, то можно сказать, что фаза роста преобладает по длительности над фазой спада, то есть рой затух быстрее, чем активизировался. Это будет выражаться в отрицательной асимметрии временных профилей роя.

Диаграмма коэффициентов асимметрии для всех исследованных роев показана на рисунке 2. Случай Фаградальсфьядль отсутствует, так как там сейсмичность в период интрузии не имела выраженной кульминации. Асимметрия высвобождения энергии этой сейсмичности была исследована в работе [Греков, 2025], где показано, что за весь период в целом она имеет положительную асимметрию с коэффициентом 0.83. Первый рой вулкана Редаут имеет большой отрицательный коэффициент асимметрии профиля активности при близком к нулю энергетическом коэффициенте асимметрии. Это объясняется бимодальной формой его временного профиля (Рис. 3(а)), он имеет две равноценные кульминации, из-за этого коэффициент асимметрии временного профиля активности не в полной мере отражает действительность.

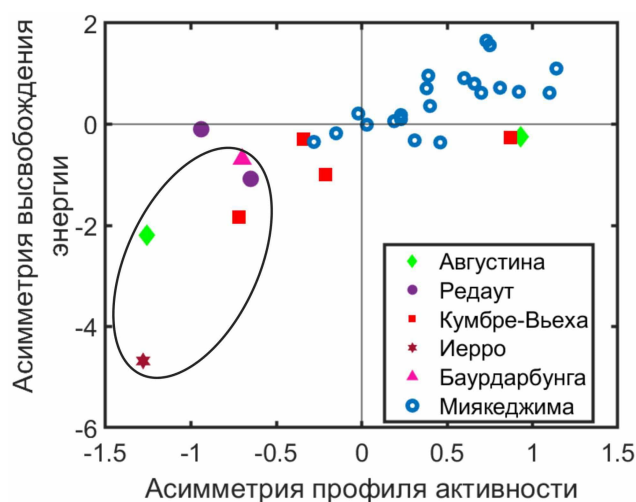


Рисунок 2 – диаграмма коэффициентов асимметрии роев, эллипсом выделена группа наиболее отрицательно-асимметричных роев

Также стоит отметить первый рой вулкана Кумбре-Вьеха, который имеет значительный отрицательный энергетический коэффициент асимметрии -1.06. Он состоит из небольшого «полового» всплеска событий в начале и двух кульминаций в конце, такой профиль смещает значение коэффициента в отрицательную сторону. Если следовать определению Моги, эти рои следует разделить на более короткие подпоследовательности, в таком случае они становятся симметричными, но на рисунке 2 показаны значения без такого разделения из соображений унификации. Временной профиль этого роя показан на рисунке 3(б).

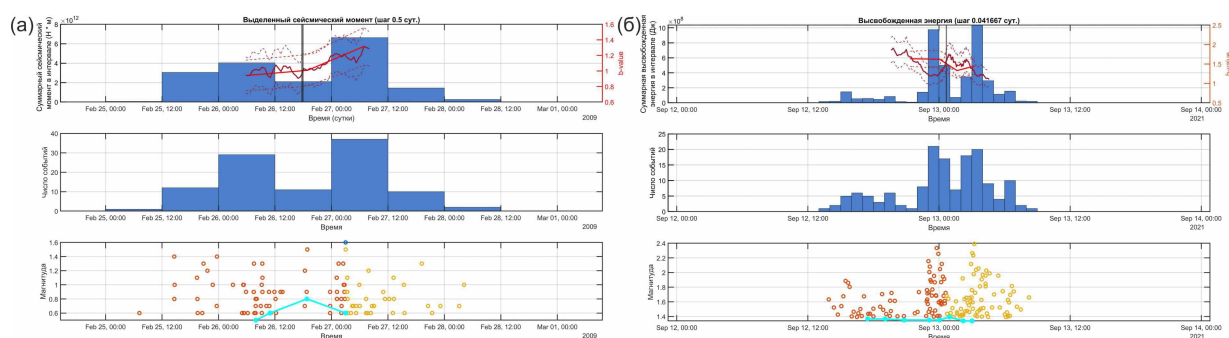


Рисунок 3 – профили первого роя вулкана Редаут (а) и первого роя вулкана Кумбре-Вьеха (б)

В результате анализа временных профилей была выделена группа из пяти наиболее отрицательно-асимметричных роев, они обведены эллипсом на рисунке 2. Их временные профили продублируем на рисунке 4. Важным для выделения этих роев является совпадение поведения обоих коэффициентов, то есть эти рои обладают наибольшей отрицательной асимметрией, как по высвобождению энергии, так и по временному профилю активности, что говорит о согласующейся динамике развития процесса по силе и количеству событий.

Для этих роев характерна длительная фаза активизации, в течение которой постепенно увеличиваются максимальные магнитуды толчков, а также растет их число. На всех из них энергетическая кульминация, примерно, совпадает по времени с кульминацией активности. Можно заметить, что, вообще говоря, рост магнитуд и числа событий в фазе активизации не всегда монотонный, он имеет паузы, локальные максимумы и минимумы, но важно, что период максимальной активности и высвобождения энергии всегда приходится на конец роя, и в течение всего остального периода больше нет всплесков равноценных финальному энергетически и по активности. Также отметим, что такой паттерн вряд ли мог сформироваться случайно, потому что в таком случае сильнейшие события могли бы происходить равновероятно на протяжении всего роя, но они концентрируются именно в конце него близко друг к другу. Для сокращения записи далее будем называть эти 5 роев отрицательно-асимметричными, подразумевая, что остальные рои с отрицательными коэффициентами асимметрии либо ближе к точке симметрии (ноль по обоим коэффициентам), либо обладают выраженной бимодальной формой.

Такие рои наблюдались на 5 из 7 рассмотренных случаев интрузии, они отсутствовали на вулканах Миякедзима и Фаградалсфьядль. На тех вулканах, где они есть, извержение начиналось почти сразу после таких роев. На вулканах Редаут и Кумбре-Вьеха извержение началось почти одновременно с энергетической кульминацией роя (в течение нескольких часов); на вулкане Августина, примерно, через 13 часов после окончания роя, на вулкане Иерро сразу после окончания роя, на вулкане Баурдарбунга, примерно, через 4 суток после кульминации роя.

Отметим, что длительность этих роев сильно меняется от вулкана к вулкану: на вулкане Редаут длительность около 3 суток, на вулкане Кумбре-Вьеха около 1.5 суток, на вулкане Августина 255 суток, на вулкане Иерро 80 суток, на вулкане Баурдарбунга около 12 суток.

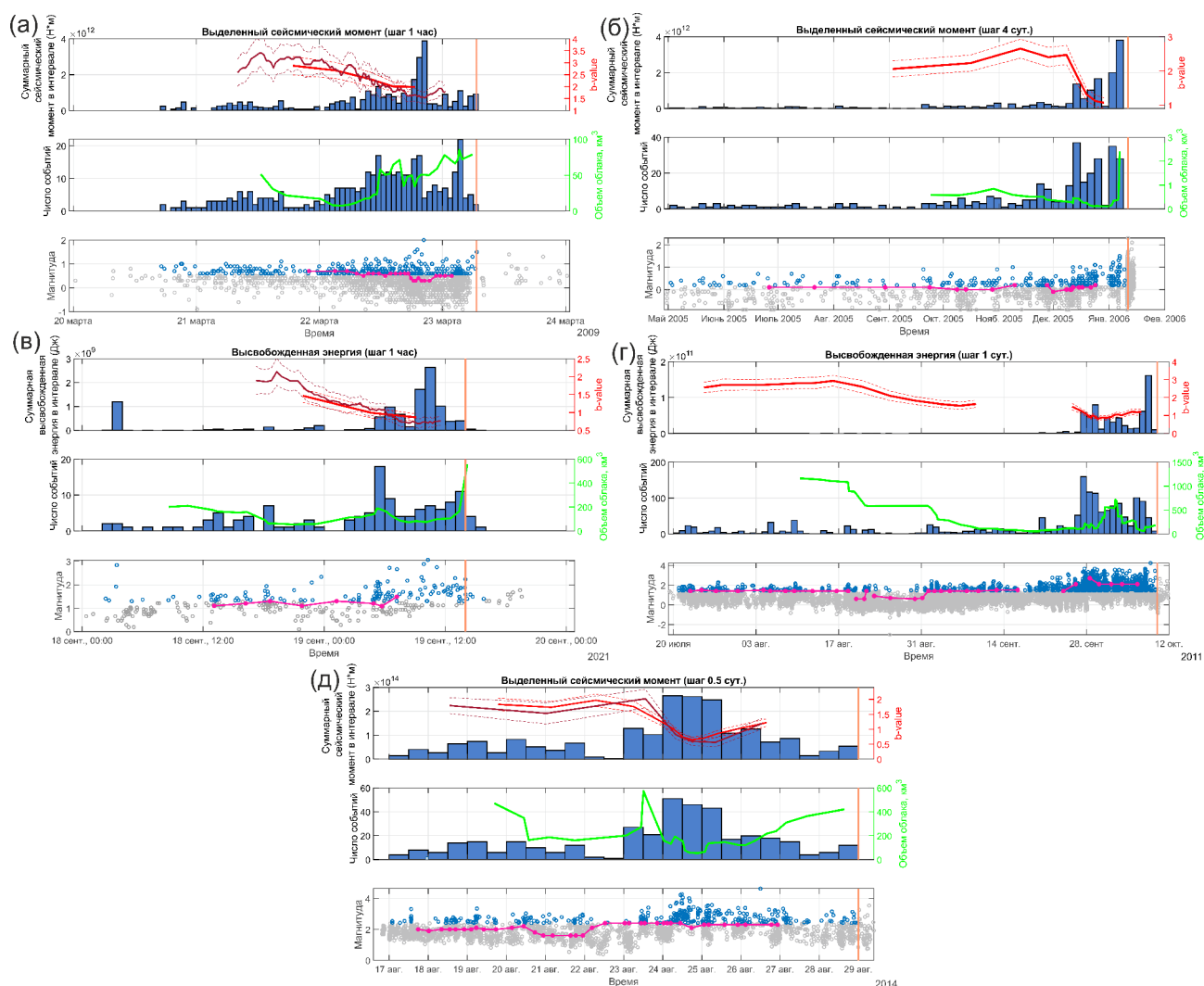


Рисунок 4 – временные профили для отрицательно-асимметричных роев: (а) – второй рой вулкана Редаут, (б) – длинный рой вулкана Августина, (в) – четвертый рой вулкана Кумбре-Вьеха, (г) – рой вулкана Иерро, (д) – рой вулкана Баурдарбунга. Для каждого роя приведено три панели: верхняя показывает энергетический профиль роя, на ней также линиями показаны временные вариации *b-value* иногда с различными размерами окон; центральная показывает профиль активности роя, на ней зелеными линиями также показаны изменения объема облака событий роя во времени; нижняя показывает распределение магнитуд событий во времени, синие кружки – события роя выше порога представительности, серые кружки – остальные события, розовой линией также изображены вариации представительной магнитуды во времени, оранжевая вертикальная линия – момент начала извержения

Далее для всех роев был проведен анализ временных вариаций наклона графика повторяемости. Было обнаружено, что для всех 5 наиболее отрицательно-асимметричных роев характерен одинаковый паттерн поведения *b-value* во времени: значение падает от экстремально высоких (более 1.9) в начале роя до нормальных или повышенных в конце (от 0.8 до 1.7) (Рис. 4). Этот паттерн отчасти был известен на ряде вулканов, где он имеет широкие временные масштабы (Августина, Иерро, Баурдарбунга), мы показываем, что он наблюдается и на меньших временных масштабах (Редат, Кумбре-Вьеха). На вулкане Кумбре-Вьеха этот паттерн можно увидеть в работе [Suarez et al., 2023], но там на нем не акцентируется внимание. Также частично этот эффект обсуждается в работе [Konstantinou, 2022], где на четырех вулканах Алеутской дуги (Макушин, Мартин, Редат и Спурр) продемонстрировано падение *b-value* перед извержениями и периодами вулканического беспокойства, но из-за очень широкого усреднения там не фиксировались экстремально высокие значения. Наша работа показывает, что это явление на самом деле может иметь гораздо меньшие временные масштабы, а также связана с конкретным паттерном временного профиля роя – экстремально высокие значения в фазе активизации и падение в период кульминации.

Далее на основе анализа вариаций других роев, можно сделать вывод, что такой паттерн *b-value* не характерен для роев, не обладающих значительной отрицательной асимметрией. Так на вулкане Миякедзима есть достаточно длинные рои, обладающие наоборот положительной асимметрией, то есть имеющие кульминацию в начале роя, но для них устойчивой закономерности поведения *b-value* не выявляется. Падение к кульминации роя частично можно проследить в первых двух симметричных роях Кумбре-Вьеха, однако в случае первого роя они статистически незначимы, в случае второго роя их можно объяснить отклонением графика от линейной формы.

Также важным является следующее наблюдение: экстремально высокие значения *b-value* (более 1.9) не характерны для других роев. На рисунке 5 показаны максимальные значения наклона графика повторяемости, достигаемые во временных вариациях каждого роя. На графике не отображены короткий рой вулкана Августина, так как для него нельзя корректно оценить наклон графика повторяемости, а также случай интрузии вулкана Фаградалсфьядль, так как для него нельзя корректно оценить коэффициенты асимметрии, но значения в вариациях в этом случае не превышают 1.20. Экстремально высокие значения (более 1.90) наблюдаются для всех 5 наиболее отрицательно-асимметричных роев, но при этом присутствуют только у 3 из 25 прочих роев (Рис. 5). Для первого роя Кумбре-Вьеха такое высокое значение возможно получить только по первым 50 событиям в начале роя, два других значения наблюдаются в роях вулкана Миякедзима, где они могут быть завышены из-за вводимого ограничения на магнитуды сверху.

Видно, что вулканические рои отличаются друг от друга в рамках в том числе одной предэруптивной фазы. Так на вулкане Кумбре-Вьеха в первых трех более глубоких роях не наблюдается экстремально высоких значений b -value, также они более симметричные по сравнению с последним роём, который сопровождал продвижение магмы на финальном прорыве к поверхности. Можно предположить, что тот или иной механизм инициации реализуется, например, в зависимости от глубины, чем ближе магма подходит к поверхности, тем меньше давление окружающих пород.

Мы верифицируем нашу методику на уже проанализированных вулканах, где обнаруженный паттерн проявляется на больших временных масштабах и потому доступен для регистрации даже грубыми методами (Иерро, частично Августина). А затем показываем, что эту же закономерность можно экстраполировать и на меньшие масштабы (Редаут, Кумбре-Вьеха), позволяя тем самым установить связь паттерна изменения b -value с конкретным паттерном активности и высвобождения энергии.

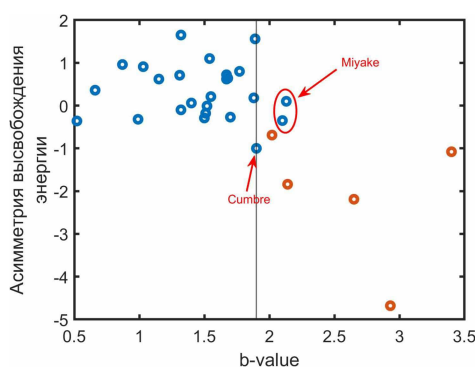


Рисунок 5 – график зависимости максимального значения b -value во временных вариациях роев от их энергетической асимметрии, оранжевые кружки – отрицательно-асимметричные рои, красными стрелками отмечены выпадающие из общей закономерности рои – с экстремально высоким значением b -value, но без отрицательной асимметрии, вертикальная линия – порог 1.90

Интерпретация

В работе [Ibáñez et al., 2012], посвященной исследованию вулкана Иерро, авторы отмечают, что описанное выше поведение b кажется контринтуитивным. Они ожидали, что на начальной фазе активизации будут происходить глубокие сильные события из-за повышения напряжений в породах при интрузии, давая сниженное b -value, а по мере поднятия магмы к поверхности в результате дегазации будет повышаться поровое давление и b -value наоборот будет расти, в действительности же происходит обратное. Наиболее частой интерпретацией подобного паттерна падения b является связь с напряженным состоянием среды [Jacobs, McNutt,

2010]. То есть напряжения растут по мере развития процесса интрузии, приводя к снижению значения *b-value*.

Однако более детальные исследования *b-value* показывают, что это не совсем так. В работе [Greenfield et al., 2020] по исследованию вариаций параметра *b* при интрузии на Баурдарбунга 2014 года авторы отмечают, что можно было ожидать, что в моменты стагнации продвижения дайки *b-value* должно было быть сниженным из-за нарастания напряжений вокруг дайки, а в моменты прорыва наоборот расти, так как напряжения сбрасываются. Однако на деле оказалось, что это не всегда выполняется: некоторые периоды продвижения имеют сниженное значение, а некоторые повышенное, некоторые не влияют на *b-value* вовсе. В период самой длинной паузы (20-23 августа) они отмечают постепенный спад значения *b*, в конце паузы *b-value* флуктуирует, но минимум значения достигается прямо перед следующей фазой продвижения, а после начала продвижения значение резко вырастает. Концепцию, которая объясняет это явление предложил [Konstantinou, 2022], на основе лабораторных исследований он связывает падение *b-value* не просто с ростом напряжений, а с процессом образования магистрального разрыва в результате объединения более мелких разломов.

Такая гипотеза повторяет общую концепцию, предложенную в книге «Физика переходных режимов» [Смирнов, Пономарев, 2020], под переходным режимом понимается «сейсмический отклик геофизической среды на локализованные в пространстве воздействия естественного и искусственного происхождения, выводящие её из стационарного состояния». Там рассмотрены случаи естественных переходных режимов: афтершоковые серии и сейсмичность вызванная заполнением водохранилищ, невулканические сейсмические рои, а также лабораторные эксперименты моделирующие переходные режимы и эксперименты по нагнетанию воды в скважины. Отмечается, что для переходных режимов характерно уменьшение наклона графика повторяемости на стадии роста активности и увеличение при спаде активности. Авторы объясняют такое поведение перераспределением процесса разрушения по масштабам, от младших к старшим на стадии возбуждения (сценарий ЛНТ [Соболев, 2019]) и от старших к младшим на стадии релаксации.

Обратим особое внимание на эксперимент с нагружением с обратной связью по активности акустической эмиссии (АЭ), который призван моделировать растянутый во времени процесс формирования макроразрыва [Смирнов, Пономарев, 2020]. Акустический отклик и вариации параметров режима в таком эксперименте представлены на рисунке 6(а).

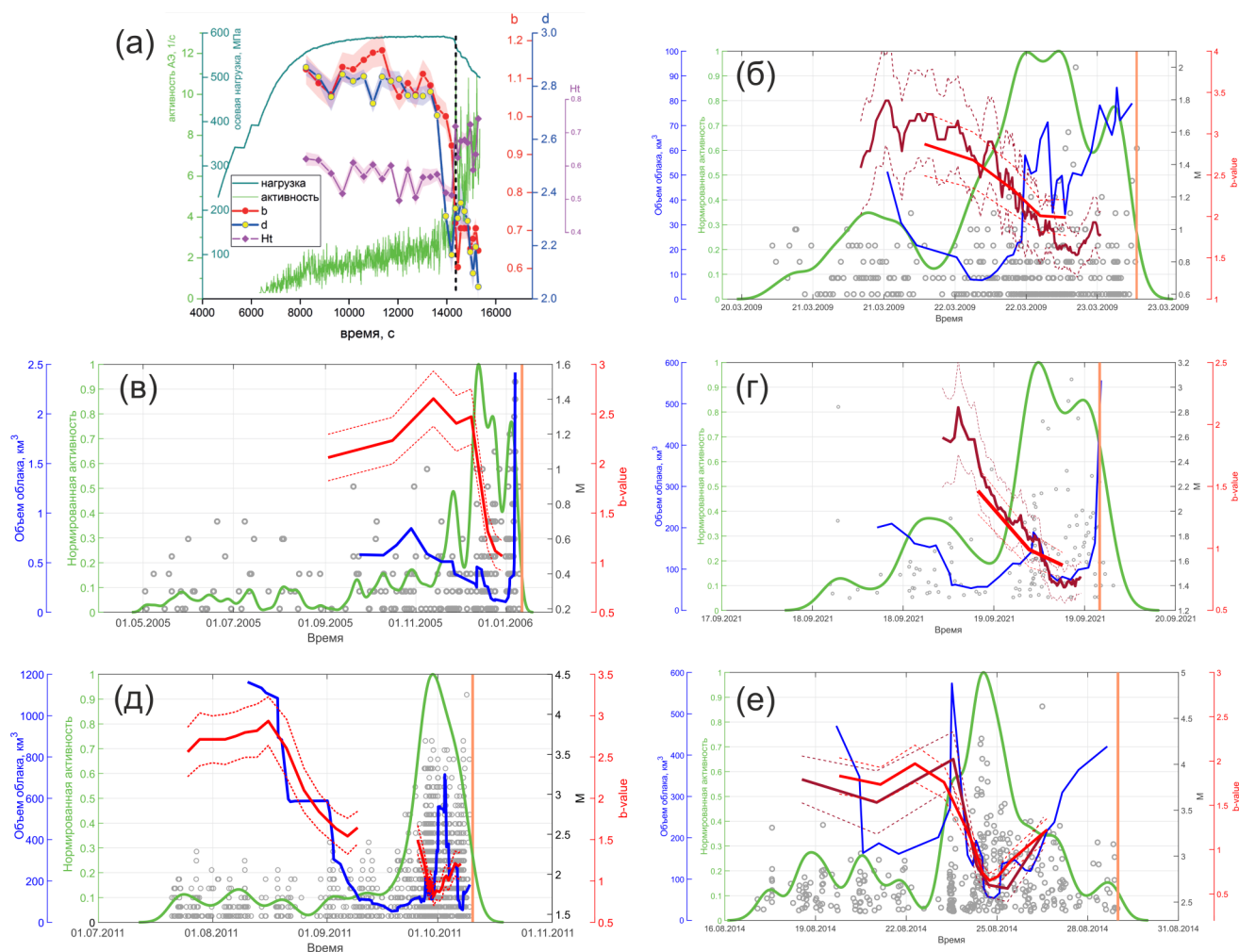


Рисунок 6 – (а) – акустический отклик в эксперименте с нагружением с обратной связью по активности АЭ из книги [Смирнов, Пономарев, 2020], зеленая линия – активность АЭ, голубая линия – осевая нагрузка, красная линия – наклон графика повторяемости, синяя линия – фрактальная размерность гипоцентров, фиолетовая линия – показатель Хёрста, вертикальная пунктирная линия – начало формирования разломной зоны. (б, в, г, д, е) – временные профили пяти отрицательно-асимметричных вулканических роев соответственно: Редаут, Августина, Кумбре-Вьеха, Иерро, Баударбунга. На каждом графике серые кружки – землетрясения роя, зеленая линия – нормированная сглаженная активность, красная линия – вариации наклона графика повторяемости, красные пунктирные линии – коридор стандартного отклонения по бутстрепу, синяя линия – изменения объема облака событий роя во времени

Хотя авторы не рассматривают его как модель переходного режима, акустический отклик в таком эксперименте оказался очень похож по закономерностям на отрицательно-асимметричные вулканические рои. Обозначим следующие наблюдаемые закономерности:

1. Профиль активности имеет отрицательную асимметрию в нашей терминологии – длинная стадия подготовки с постепенно нарастающей активностью и выраженной кульминацией в конце процесса.
2. Падение наклона графика повторяемости в момент кульминации.
3. Падение фрактальной размерности в момент кульминации.
4. Рост показателя Хёрста в момент кульминации (это означает увеличение степени временной кластеризации).
5. На «плоской» части кривой нагружения, то есть на стадии активизации в нашей терминологии, наклон графика повторяемости $b \sim 1$ значительно выше характерного значения $b \sim 0.5$ [Смирнов, Пономарев, 2020].

В работе [Смирнов, Пономарев, 2020] такое поведение интерпретируют как процесс постепенного увеличения концентрации микротрещин до некоторого критического значения, после которого трещины начинают взаимодействовать друг с другом и «разрушение переходит в стадию локализации (нуклеации)». Поэтому на первой стадии события распределены равномерно и не связаны между собой, о чем говорят значения фрактальной размерности близкие к 3, высокие значения наклона графика повторяемости и показатель Хёрста близкий к значению, характерному для режима независимых событий.

Для выделенных отрицательно-асимметричных роев помимо схожей формы профиля активности на всех пяти случаях наблюдается экстремально высокое значение b на стадии подготовки, его падение в период кульминации, а также частично (лучше всего на случаях вулканов Редаут, Августина и Иерро) сжатие облака событий роя, что косвенно говорит о процессе «нуклеации» (Рис. 6).

В данной работе мы проанализировали степень кластеризации на начальной стадии отрицательно-асимметричных роев и в период кульминации с помощью анализа распределений времен задержек между событиями (см. разделы для соответствующих вулканов). Яркий результат виден на вулканах Редаут и Августина, менее выражено на вулкане Иерро – распределение времен задержек между событиями в период кульминации там бимодальное. Доля моды с меньшими расстояниями, то есть степень кластеризации, увеличивается от единиц процентов до порядка 50% между стадиями. Также было проведено сравнение с периодами вулканического затишья. На вулкане Августина степень кластеризации и форма распределений в период активизации роя совпадает с периодом вулканического затишья, а положение мод остается, примерно, одинаковым независимо от периода, но в период кульминации роя доля моды с меньшими временами увеличивается. Это мы также демонстрируем в работах [Grekov et al., 2025; Греков, Шебалин, 2025]. Стационарность положения мод может говорить, что

характерные временные масштабы расстояний между событиями являются свойствами среды. Увеличение временной кластеризации событий косвенно говорит об увеличении взаимодействия между трещинами. При достижении определенной концентрации дефектов, одно разрушение инициирует соседние разломы, при этом более мелкие трещины начинают сливаться во все более крупные. Такая идея в том числе лежит в основе модели лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ) [Соболев, 2019].

Таким образом, в пяти отрицательно-асимметричных роях полностью или частично повторяются 4 из 5 характерных закономерностей акустического отклика в эксперименте по формированию макроразрыва, кроме падения значений фрактальной размерности, анализ которой не проводился.

Наиболее ярко эти эффекты выражены в длинном рое вулкана Августина, но самая подробная информация о процессе интрузии есть для случая вулкана Иерро. Сопоставим на его примере обозначенные фазы с магматическими процессами. На рисунке 7 изображен временной профиль сейсмичности предэруптивной фазы этого вулкана.

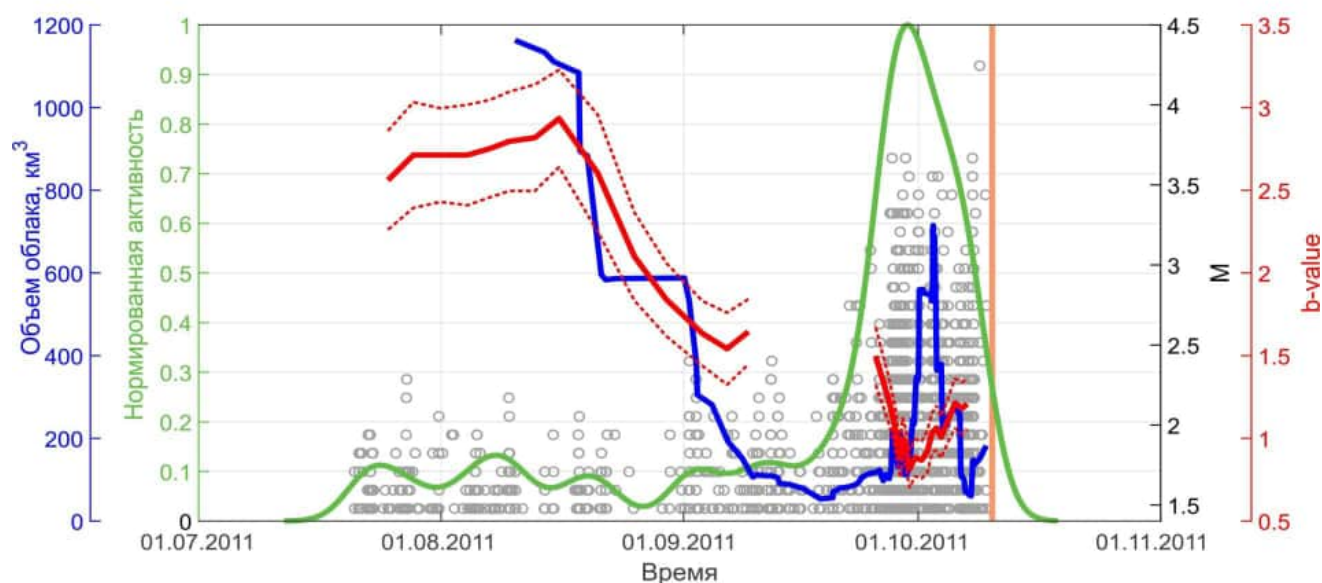


Рисунок 7 – сейсмичность предэруптивного периода извержения вулкана Иерро 2011-го года. Зеленая линия – нормированная на единицу огибающая активности, серые кружки – события выше порога представительности, красная линия – временные вариации наклона графика повторяемости, синяя линия – изменения объема облака землетрясений во времени, вертикальная оранжевая линия показывает момент начала извержения

Схематичная модель магматических процессов в предэруптивную фазу по [González et al., 2013] показана на рисунке 8.

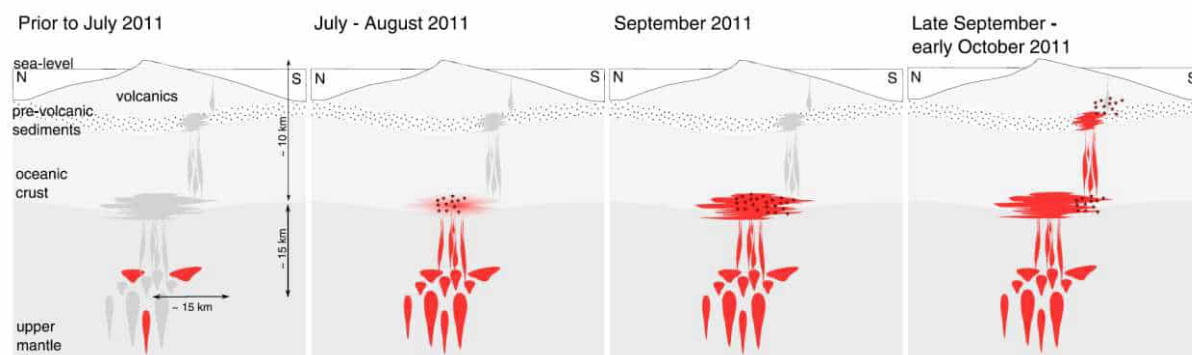


Рисунок 8 – модель процессов в магматической системе в предэруптивную фазу, предложенная в [González et al., 2013], показан срез вулкана вдоль направления север-юг

На протяжении порядка 140 суток магма генерировала сейсмические события в области глубинного очага на границе мантии и океанической коры, не продвигаясь вверх. В рамках этого периода активность и магнитуды событий медленно росли, а объем облака землетрясений постепенно уменьшался, в этой же стадии наблюдается экстремально высокое значение b -value. Затем активность резко выросла, что знаменует начало кульминации роя, значения b -value снизились, одновременно с этим магма начала двигаться вверх и достигла поверхности всего за 20 суток. Можно предположить, что в течение первых 140 суток давление в очаге создавало напряжения в коре, продуцируя множество разрозненных микротрещин, после чего с началом образования макроразрыва магма быстро вырвалась к поверхности. Такое объяснение в основном совпадает с идеей, предложенной в [Konstantinou, 2022], за исключением того, что автор не дает четкой интерпретации экстремально высоким значениям b на стадии подготовки, которое, судя по всему, предсказывалось лабораторным экспериментом в такой интерпретации. Таким образом мы приводим больше свидетельств в пользу описанной модели.

В [Смирнов, Пономарев, 2020] отмечается, что в естественных условиях сложно обнаружить такое поведение, поскольку формирование разломной зоны происходит в геологических масштабах. Возможно, магматическая интрузия реализует подобный эффект в естественных условиях на промежуточном масштабе между лабораторным и тектоническим – от нескольких месяцев до нескольких суток. В [Rubin, 1998] автор указывал, что на кончике магматической дайки напряжений недостаточно, чтобы сформировать новый разлом в цельном элементе горных пород, однако в описанных выше случаях может работать кинетическая концепция прочности Журкова [Журков, 1968], в которой дефекты среды постепенно накапливаются в среде, в конечном итоге приводя к макроразрушению. В [Смирнов, Пономарев,

2020] предполагается, что процесс передачи разрушения от младших масштабов к старшим на стадии активизации может происходить как лавинообразно, так и не лавинообразно. К какому из этих типов относятся рассматриваемые отрицательно-асимметричные рои сказать однозначно нельзя, поскольку неизвестно происходит ли разрушение на стадии кульминации только благодаря продолжающемуся воздействию магмы или в какой-то момент этот процесс становится самоподдерживающимся и происходит уже независимо от внешнего источника.

Еще одним важным лабораторным экспериментом в контексте этой работы представляется моделирование переходным режимов при силовой инициации «плавной» ступенькой [Смирнов, Пономарев, 2020; Smirnov et al., 2010]. То есть с относительно медленным линейным нарастанием деформации, а затем выдержкой образца при неизменной деформации. Отмечается, что такое воздействие вызывает акустический отклик подобный сейсмическим роям (рис. 9).

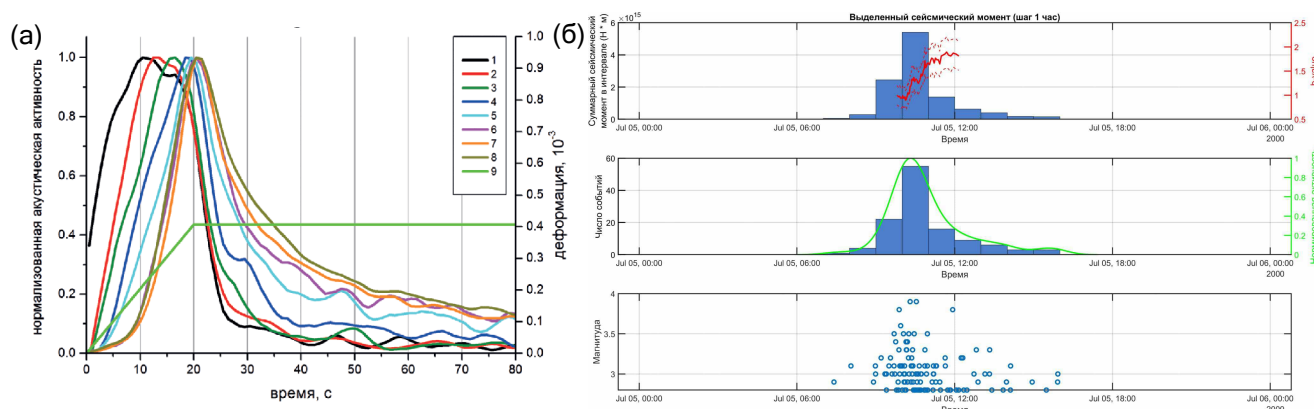


Рисунок 9 – (а) – графики акустической активности в экспериментах по воздействию «плавной» ступенькой из работы [Смирнов, Пономарев, 2020], зеленой ступенькой показана деформация, остальные разноцветные линии – нормированная активность событий в разных итерациях воздействия. (б) – пример вулканического роя с положительно асимметричной формой

Видно, что в таком случае профиль активности наоборот имеет положительную асимметрию – кульминация в начале с последующим «хвостом» релаксации. В экспериментах по нагнетанию воды в скважину также наблюдался роеподобный отклик, его «интенсивность плавно увеличивалась после иницирующего скачка давления воды, а затем постепенно уменьшалась» [Смирнов, Пономарев, 2020].

Вулканические рои такой формы также присутствуют среди рассмотренных, они наиболее характерны для интрузии вулкана Миякедзима. В [Смирнов, Пономарев, 2020] отмечается закономерное падение значения наклона графика повторяемости в период кульминации

активности как в случае лабораторных экспериментов, так в случае экспериментов со скважиной. Однако для подобных вулканических роев мы не обнаружили такого устойчивого поведения параметра. Хотя иногда и наблюдаются следы подобного паттерна, зачастую его можно объяснить либо снижением представительности, либо артефактами вычисления, вызванными отклонениями графиков повторяемости от линейной формы. Не исключено, что доступное качество данных не позволяет выявить такое поведение в этих вулканических роях. Также стоит упомянуть, что отсутствие значимых вариаций наклона графика повторяемости обнаружено в экспериментах по пропусканию электрического тока через образец, насыщенный проводящей жидкостью. Такой эксперимент, предположительно, моделирует отклик наведенной сейсмичности, вызванный повышением порового давления вследствие увеличения напряжений в среде [Смирнов, Пономарев, 2020], что может происходить, например, при росте нагрузки на ложе водохранилища. Подобный эффект, вероятно, может присутствовать и в контексте вулканической сейсмичности, например, при повышении давления в магматической камере.

Отметим также, что в зависимости от уровня напряжений формы профилей активности роеподобных откликов в экспериментах могут принимать и более симметричные конфигурации, что можно сопоставить с наличием и таких вулканических роев. Также симметричная форма наблюдалась в сейсмических роях Коринфского рифта, где тоже обнаружено падение наклона графика повторяемости в кульминации роя [Потанина и др., 2011]. В работе [Смирнов, Пономарев, 2020] предложена модель, в которой паттерн сейсмического отклика при возмущении описывается конкуренцией процессов возбуждения и релаксации. При малой скорости нарастания инициирующей ступеньки напряжений активность имеет роевой характер, а величина и положение максимума активности во времени (в нашей терминологии кульминация) зависят от параметра a , который описывает емкость доступных актов разрушения системы и зависит от величины действующих фоновых напряжений до возмущения. С ростом параметра a кульминация отклика смещается вправо по оси времени, а форма его временного профиля меняется от положительно-асимметричной до отрицательно-асимметричной.

Можно предположить, что благодаря сложному устройству магматических систем, многообразию процессов, протекающих в них, а также изменениям условий (например, в зависимости от глубины), магма способна создавать различные режимы нагружения горных пород, продуцируя разнообразные по форме сейсмические отклики. В наиболее общем виде при интрузии режим нагружения, вероятно, определяется конкуренцией двух факторов: ростом давления магмы и увеличением доступного объема за счет деформации пород. Результирующая динамика (сценарий нагружения) зависит от соотношения скорости нагнетания давления, скорости увеличения объема и вязкости расплава. Так, низковязкая магма при стабильном

притоке способна мгновенно заполнять новые полости, поддерживая непрерывную нагрузку. В то же время, высокая вязкость расплава или дефицит притока массы при увеличении объема приводят к падению давления в системе, что влияет на форму сейсмического отклика. О существовании динамики этих параметров свидетельствуют явления «надувания» и «сдувания» магматических камер и их корреляция с моментами резкого продвижения интрузий, например, в случае интрузии Баурдарбунга. А также наличие поверхностных деформаций при интрузиях, которое косвенно говорит о том, что в процессе интрузии может происходить увеличение доступного для магмы объема. Скачкообразное увеличение свободного объема может реализовываться в модели Хилла, при разрушении перемычки между дайками они резко объединяются в более крупную полость.

Дискуссия

Стоит отметить, что существуют мнения, отрицающие концепцию временной эволюции *b-value* часто наблюдаемую перед извержениями. В работе [Roberts et al., 2016] были построены вариации наклона графика повторяемости во времени для всего периода активности вулкана Иерро в 2011-ом году. Авторы показывают, что значение меняется не плавно, а периодически перескакивает между различными модами и что в период извержения каждую из мод можно соотнести с конкретным пространственным кластером сейсмичности. На основе этого они утверждают, что вариации *b-value* связаны только с пространством, а изменения во времени вызваны сменой локации генерации событий. Однако они не объясняют, почему в предэруптивной фазе в период с 19 июля по 20 сентября, когда сейсмичность была стационарна в пространстве, все равно наблюдается три моды. К тому же мода со значением 3.2, наблюдаемая в предэруптивной фазе, больше ни разу не реализуется за весь период активности вулкана, хотя пространственно события в той же области происходили. Последующее изменение режима в период миграции с 20 сентября по 18 октября авторы связывают с тем, что сейсмичность теперь происходит в среде с другими свойствами, но, на наш взгляд, тут возникает классическая проблема причины и следствия. С одной стороны, можно сказать, что режим изменился потому что магма мигрировала, но также можно и сказать, что магма мигрировала, потому что изменился режим в результате развития разрушения или накопления напряжений. В пользу второго сценария говорит случай интрузии вулкана Баурдарбунга, где показано, что интрузия продвигается скачками, в ней чередуются прорывы и стагнации разной длительности. Различные моды наблюдались даже, когда интрузия стагнировала [Greenfield et al., 2020], причем иногда прослеживалась закономерность: *b-value* снижается от начала к концу периода стагнации, что наталкивает на мысль именно о временной эволюции режима. В таком случае можно предположить, что такие скачки между модами связаны с процессами преодоления барьеров, эти

барьеры имеют разные масштабы и каждому из них соответствует своя флуктуация во временных вариациях наклона графика повторяемости, причем преодоление более сильного барьера может состоять из преодоления серии более слабых. Признаки такого эффекта можно увидеть в случае интрузии вулкана Августина, где события группировались в самоподобные серии, разделенные сейсмическими затишьями [Grekov et al., 2025; Греков, Шебалин, 2025].

На примере наиболее физически ясного случая Баурдарбунга можно увидеть, что описанный паттерн *b-value* характерен для периода стагнации интрузии перед барьером, а снижение *b-value* происходит в момент прорыва – в кульминации роя. Из этого можно предположить, что в случаях, когда барьеры минимальны или отсутствуют, почти не наблюдается экстремально высоких значений *b-value*, как и отрицательно-асимметричных роев. Об этом также говорят в работе [Sigmundsson et al., 2015]: «Формирование даек благоприятно на дивергентных границах плит, потому что движения плит растягивают кору и снижают нормальное напряжение на плоскостях потенциальных даек». Мы предполагаем, что из рассмотренных такими случаями являются интрузии на вулканах Фаградалсфьядль и Миякедзима.

Для случая Миякедзима [Toda et al. 2002] успешно восстановили паттерн в форме «кости», образуемый гипоцентрами вулcano-тектонических землетрясений, что согласно модели [Roman, 2005] может означать, что региональные напряжения преобладают над интрузивными. В работе [Roman, Cashman, 2006] для Миякедзимы указаны тектонические условия, как сжимающие. Тут имеется в виду, что область находится под воздействием сжатия в вдоль направления Северо-запад–Юго-восток в результате субдукции Филиппинской плиты под Евразийскую, но при этом зона также находится под воздействием растяжения в направлении оси Северо-восток–Юго-запад в результате задугового спрединга [Passarelli et al., 2015; Nishimura, 2011]. Второе способствует раскрытию интрузивной трещины.

Вулкан Фаградалсфьядль находится в зоне спрединга – в рифтовой зоне Исландии. На нем не наблюдается соответствующего отрицательно-асимметричного паттерна и экстремально высоких значений *b-value*. Отметим, что вулкан Баурдарбунга также находится в рифтовой зоне Исландии. Однако, в первом случае, есть свидетельства в пользу того, что извержение было спровоцировано сильным тектоническим событием и магма пассивно затекала в уже раскрытые трещины по ослабленной зоне. В отличие от случая Баурдарбунга, где магма сперва поднялась в магматическую камеру из мантийного плюма, центр которого на данный момент находится прямо под этим вулканом, а затем активно прокладывала путь к поверхности, преодолевая барьеры, признаки чего также наблюдались в [Sigmundsson et al., 2015]. В пользу этого также говорит преобладание сдвиговых механизмов очагов во время этой интрузии [Sigmundsson et al.,

2015], а не сбросов, характерных для интрузий в рифтовых зонах. Однако стоит отметить, что и в случае интрузии на Фаградальсфьядль также не преобладали сбросы, там это объясняют нестандартными тектоническими условиями – косым рифтингом [Fischer et al., 2022], то есть тем, что это зона трансенсии, а не чистого растяжения.

Еще одним примером интрузии в условиях рифтинга может являться регион Эфиопия. К сожалению, в рамках данной работы автору не удалось получить в распоряжение данные об интрузивной сейсмичности этого региона. Поэтому тут мы можем ориентироваться только на косвенные свидетельства других исследований. В работе [Belachew et al., 2011] рассчитаны средние значения *b-value* для ряда интрузивных вулканических роев этого региона. Хотя в нашей работе мы показали, что среднее значение для роя может маскировать его локальные высокие значения, тот факт, что ни в одном из 7 роев среднее значение не превысило величину 1.69 (диапазон от 0.75 до 1.69) может говорить в пользу нашей гипотезы. В этих роях преобладали сбросы [Belachew et al., 2013], что характерно для интрузий в рифтовых зонах.

На основе изложенных рассуждений можно сформулировать следующую гипотезу. В условиях, когда силы воздействия (интрузии) достаточно для преодоления эффективного предела прочности пород к внедрению, разрушение происходит сразу и процесс интрузии носит более равномерный характер, непрерывно продвигаясь к поверхности (например, предположительно, в случае эпизода вулкана Фаградальсфьядль). Если же силы воздействия недостаточно для преодоления предела прочности, процесс интрузии стагнирует и начинается накопление дефектов в среде, продуцирующие экстремально высокие значения наклона графика повторяемости. Эта фаза накопления закономерно завершается макроразрушением, выраженным в виде кульминации, что в совокупности дает отрицательно-асимметричный паттерн развития сейсмичности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обоснование защищаемых положений

На основе анализа форм и параметров режима 32 вулканических роев было сформулировано три защищаемых положения, каждое из которых служит шагом к формированию физической интерпретации.

На диаграмме рисунка 2 четвертой главы видно, что рои отличаются по форме временных профилей и в большинстве случаев либо симметричны, либо обладают положительной асимметрией. На общем фоне среди них можно выделить 5 роев, обладающих наибольшей отрицательной временной асимметрией. Они представлены вторым роем предэруптивной фазы вулкана Редаут 2009-го года, длинным роем вулкана Августина перед извержением 2006-го года, четвертым роем вулкана Кумбре-Вьеха перед извержением 2021-го года, роем вулкана Иерро, который охватывает почти весь предэруптивный период перед извержением 2011-го года, а также роем вулкана Баурдарбунга при латеральной интрузии перед извержением 2014-го года. На рисунке 4 четвертой главы показано, что для таких роев характерна относительно длительная фаза активизации, сопровождающаяся медленным нарастанием активности и максимальных магнитуд событий, после чего происходит фаза кульминации с последующей более короткой фазой релаксации. Это поведение и отражается высокой отрицательной асимметрией временных профилей этих роев. На тех вулканах, где такой рой присутствует, он наблюдается ближе к концу предэруптивного периода, и его кульминация знаменует начало извержения. Важно отметить, что при этом на этих вулканах в предэруптивную фазу может происходить и несколько роев (случаи Редаут и Кумбре-Вьеха), но только последний перед началом извержения обладает наибольшей временной отрицательной асимметрией. Исключение составляет вулкан Августина, где после кульминации длинного роя произошел еще один короткий рой, только после которого началось извержение. Однако согласно предположению [Jacobs, McNutt, 2010], где был проведен анализ волновых форм событий этого роя, он является продолжением кульминации длинного роя, но с примесью большого числа событий со сверх длиннопериодной компонентой, которые, вероятно, и знаменуют начало прорыва магмы к поверхности. Это подтверждается и тем наблюдением, что он закономерно продолжает паттерн роста активности и максимальной магнитуды длинного роя. В совокупности это отражено в первом защищаемом положении:

Разработанная классификация вулканических роев по форме их временного профиля позволяет выявить обособленный тип вулканических роев, отличающихся наибольшей отрицательной асимметрией временного профиля, то есть обладающих свойством значительного преобладания по длительности стадии активизации над стадией спада, а также

ростом максимальной магнитуды событий по мере приближения к кульминации, предвещающей начало извержения.

На верхних панелях для каждого роя с отрицательной временной асимметрией на рисунке 4 четвертой главы представлены временные вариации наклона графика повторяемости. Во всех 5 роях наблюдается падение наклона графика повторяемости к периоду кульминации роя. Диапазон абсолютных величин варьируется от роя к рою, однако во всех пяти случаях в фазе активизации параметр принимает экстремально высокие значения (более 1.90), в том смысле, что они превышают даже высокие показатели характерные для вулканической сейсмичности в среднем (1.7 согласно [Glazner, McNutt, 2021]). В период кульминации значение падает либо до сниженных (0.80), либо до повышенных (около 1.70). Также на рисунке 5 четвертой главы показано, что экстремально высокие значения во временных вариациях характерны именно для роев такой формы. Максимальные значения временных вариаций таких роев лежат в диапазоне от 2.02 до 3.40, среди прочих 25 роев на графике и роя вулкана Фаградалсфьядль только в двух достигается значение 2.10. Эти свидетельства формируют второе защищаемое положение:

Для выявленного типа роев, характеризующихся наибольшей отрицательной временной асимметрией, характерен спад наклона графика повторяемости от экстремально высоких значений (более 1.9) в начале роя до нормальных или повышенных (от 0.8 до 1.7) в конце.

Из рисунка 2 четвертой главы также следует, что для роев в период интрузии вулкана Миякедзима не характерна значительная отрицательная асимметрия, также такая форма роя отсутствует в период интрузии вулкана Фаградалсфьядль. В обоих случаях отсутствует также и описанный во втором положении паттерн временной эволюции параметра наклона графика повторяемости, и гораздо реже встречаются экстремально высокие значения наклона графика повторяемости: в период интрузии вулкана Фаградалсфьядль значения в вариациях не превышают порога 1.20, а среди 21 роя вулкана Миякедзима только у двух наблюдается значение около 2.10. В обоих случаях интрузия происходила в условиях тектонического рифтового растяжения: в случае Миякедзима благодаря задуговому спредингу в субдукционной зоне [Passarelli et al., 2015], в случае Фаградалсфьядль благодаря активному рифтингу Исландии. Однако обнаружено и исключение из этого правила – интрузия вулкана Баурдарбунга также происходила в условиях рифтинга Исландии, но тем не менее проявила описанные в первом и втором положениях паттерны. То есть рои, обладающие свойствами, описанными в первом и втором положениях, наблюдаются в конце предэруптивной фазы на всех 4 вулканах, которые не находятся в зоне тектонического рифтового растяжения, и только на одном из 3 вулканов, которые находятся в таких условиях. В совокупности по трем таким вулканам только один рой

из 23 обладает описанными в первом и втором положениях закономерностями. На основе этих наблюдений сформулировано третье защищаемое положение.

Выявленный тип роев, характеризующихся наибольшей отрицательной временной асимметрией, не характерен для интрузий, происходящих в условиях тектонического рифтового растяжения.

Такие положения являются ключевыми для формулировки физической интерпретации. Первое и второе положения позволяют сопоставить наблюдаемый сейсмический отклик в виде определенного типа вулканического роя с результатами лабораторного моделирования конкретного процесса – формирования разломной зоны в образце. Первое положение также свидетельствует о том, что именно после завершения такого процесса для магмы открывается путь к поверхности. На основе этого можно предположить, что такой отклик наблюдается, когда давления магмы не хватает для того, чтобы дайка продолжила распространение, то есть магма «упирается» в барьер. Тогда продолжительное действие напряжений, создаваемых магмой, накапливает дефекты в породах, пока не будет достигнута их критическая плотность. Это предположение подтверждается третьим положением: там, где эти барьеры отсутствуют или ослаблены под действием тектонических напряжений, подобный сейсмический отклик наблюдается значительно реже, так как уменьшается вероятность стагнации интрузии.

Обоснование выполнения целей исследования

Таким образом выполнены поставленные цели исследования. Выявлен паттерн совместного поведения активности, высвобождения сейсмической энергии и наклона графика повторяемости, который повторяется на 5 из 7 рассмотренных случаев в виде выделенного характерного типа вулканического роя. Предложена и обоснована гипотеза о том, в каких условиях наблюдается такой паттерн, объясняющая выпадающие из общей закономерности случаи.

Продемонстрирована перспективность и обоснованность предложенной классификации вулканических роев по формам временных профилей. Она основана на том факте, что три основных типа последовательностей землетрясений различаются по этому признаку, а в концепции физики переходных режимов они все имеют единую природу. Роеподобные акустические отклики в лабораторных экспериментах также отличаются именно по этому параметру в зависимости от условий нагружения, для чего в книге [Смирнов, Пономарев, 2020] предложена математическая модель.

Приведен большой спектр свидетельств в пользу альтернативной гипотезы, объясняющей падение наклона графика повторяемости перед извержениями. Наиболее распространенной

гипотезой на данный момент является предположение, что этот эффект является результатом роста напряжений. Мы приводим свидетельства в пользу того, что такой эффект может объясняться переходом разрушения с младших масштабов на старшие при образовании макроразрыва в контексте физики переходных режимов.

Предложена интерпретация экстремально высоких значений наклона графика повторяемости. Выдвинута гипотеза о том, что такие значения наблюдаются в периоды накопления дефектов под воздействием напряжений, создаваемых магматической интрузией в условиях её стагнации подобно лабораторному эксперименту по моделированию образования макроразрыва. Продемонстрирована её обоснованность.

Направления дальнейших исследований

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются расширение выборки вулканических роев и переход от качественного к количественному описанию закономерностей. В частности, одной из возможных задач является установление зависимости величины максимальных значений параметра b на стадии активизации роев выявленного типа от параметров воздействия и свойств среды. Исследовать такую зависимость возможно в том числе и в лабораторных экспериментах, а её экстраполяция на интрузивные процессы позволит получать информацию об их характеристиках.

В данной работе в основном рассматривались рои в предэруптивные фазы, чтобы избежать искажений из-за смещения сейсмических сигналов разной природы. Если решить эту проблему путем детального разделения сигналов вулканической сейсмичности по волновым формам, то предложенную классификацию будет возможно расширить и на вулканические рои, происходящие во время извержений. Это затем позволит получать более полную информацию о процессах, происходящих в магматических системах, и формулировать новые прогностические признаки извержений.

Также на основе сопоставления с закономерностями других переходных режимов, описанных в [Смирнов, Пономарев, 2020], видится возможной разработка более строгой физической модели инициации вулканических роев различной формы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1) *Гордеев Е.И.* Сейсмичность вулканов и контроль вулканической активности // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2007. – № 2. – С. 38-45.
- 2) *Греков Е. М., Шебалин П.Н.* Анализ группирования вулканической сейсмичности по данным извержения вулкана Августина 2006-го года // Russian Journal of Earth Sciences. – 2025. – Т. 25, № 4. – С. ES4005. – DOI 10.2205/2025ES001025.
- 3) *Греков Е.М.* Применение метода ближайшего соседа для анализа вулканических роев по данным извержений вулканов Исландии Баурдарбунга и Фаградалсфьядль // Вулканология и сейсмология. – 2025. – № 1. – С. 92-110. – DOI 10.31857/S0203030625010069.
- 4) *Журков С. Н.* Кинетическая концепция прочности твёрдых тел // Вестн. АН СССР. — 1968. — № 3. — С. 46–52.
- 5) *Павленко В.А., Завьялов А.Д.* Сравнительный анализ методов оценки магнитуды представительной регистрации землетрясений // Физика Земли. – 2022. – № 1. – С. 100-117. – DOI 10.31857/S0002333722010069. EDN RXQBFM.
- 6) *Писаренко В.Ф.* О законе повторяемости землетрясений. // Дискретные свойства геофизической среды. М.: Наука. – 1989. – С. 47–60.
- 7) *Потанина М.Г., Смирнов В.Б., Бернар П.* Особенности развития сейсмической роевой активности в Коринфском рифте в 2000-2005 гг // Физика Земли. – 2011. – № 7. – С. 54-66. – EDN: NXQHND.
- 8) *Садовский М.А., Писаренко В.Ф.* Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука. – 1991. – 96 с.
- 9) *Сафонов Д.А.* Новые переходные соотношения для энергетических характеристик землетрясений Сахалинского региона. // Геосистемы переходных зон. – 2025. – Т. 9, № 1 – С. 22–36. – DOI: <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.1.022-036>
- 10) *Смирнов В.Б.* Прогностические аномалии сейсмического режима. I. Методические основы подготовки исходных данных // Геофизические исследования. – 2009. – Т. 10, № 2. – С.7–22
- 11) *Смирнов В.Б., Пономарев А.В.* Физика переходных режимов сейсмичности. М.: РАН. – 2020. – 412 с. – ISBN 978-5-907036-90-1
- 12) *Соболев Г.А.* Модель лавинно-неустойчивого трещинообразования – ЛНТ. // Физика Земли. – 2019. – № 1. – С.166-179. – DOI: 10.31857/s0002-333720191166-179.
- 13) *Aki K.* Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits. // Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo 43. – 1965. – P. 237–239.

- 14) *Becerril L., Galvec J.P., Morales J.M., Romero C., Sánchez N., Martí J., Galindo I.* Volcano-structure of El Hierro (Canary Islands). // *Journal of maps.* – 2016. – V. 12, S1. – P. 43–52. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/17445647.2016.1157767>
- 15) *Belachew M., Ebinger C., Coté D.* Source mechanisms of dike-induced earthquakes in the Dabbahu-Manda Hararo rift segment in Afar, Ethiopia: Implications for faulting above dikes. // *Geophys. J. Int.* – 2013. – 192(3). – P.907–917.
- 16) *Belachew M., Ebinger C., Coté D., Keir D., Rowland J., Hammond J., Ayele A.* Comparison of dike intrusions in an incipient seafloor-spreading segment in Afar, Ethiopia: Seismicity perspectives. // *Journal of Geophysical Research.* – 2011. – V. 116. – DOI: 10.1029/2010JB007908.
- 17) *Bender B.* Maximum likelihood estimation of b values for magnitude grouped data // *Bulletin of the Seismological Society of America.* – 1983. – Vol. 73, no. 3. – P. 831–851. – DOI: 10.1785/bssa0730030831.
- 18) *Benoit J. P., McNutt S.* Global volcanic earthquake swarm database and preliminary analysis of volcanic earthquake swarm duration // *Annals of Geophysics.* – 1996. – V. 39, 2. – DOI: <https://doi.org/10.4401/ag-3963>.
- 19) *Bull K.F., Buurman H.* An overview of the 2009 eruption of Redoubt volcano, Alaska. // *J. Volc. Geotherm. Res.* – 2013. – V. 259. – P.2-15. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.06.024>
- 20) *Buurman H., West M., Thompson G.* The seismicity of the 2009 Redoubt eruption. // *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* – 2013. – V. 259. – DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2012.04.024.
- 21) *Buurman H., West M.E.* Seismic precursors to volcanic explosions during the 2006 eruption of Augustine Volcano: Chapter 2 in *The 2006 eruption of Augustine Volcano, Alaska* // *US Geological Survey Professional Paper.* – 2010. – V. 1769-2. – DOI: 10.3133/pp17692
- 22) *Cao A.M., Gao S.S.* Temporal variations of seismic b-values beneath northeastern japan island arc // *Geophys. Res. Lett.* – 2002. – V. 29. – DOI:10.1029/2001GL013775.
- 23) *Carracedo J. C., Torrado F. P., González A. R., Soler V., Turiel J. L. F., Troll V. R., Wiesmaier S.* The 2011 Submarine Volcanic Eruption in El Hierro (Canary Islands). // *Geology Today.* – 2012. – V. 28 (2). – P.53–58. – DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2451.2012.00827.x>
- 24) *Cervelli P. F., Fournier T., Freymueller J., Power J. A.* Ground deformation associated with the precursory unrest and early phases of the January 2006 eruption of Augustine Volcano, Alaska // *Geophysical Research Letters.* – 2006. – V. 33. L18304. – DOI:10.1029/2006GL027219
- 25) *D'Auria L., Koulakov I., Prudencio J., Cabrera-Pérez I., Ibáñez J.M., Barrancos J., García-Hernández R., Martínez van Dorth D., Padilla G.D., Przeor M., Ortega V., Hernández P., Pérez N.M.* Rapid magma ascent beneath La Palma revealed by seismic tomography. // *Sci Rep.* – 2022. – V. 12, 17654. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21818-9>

- 26) *De Luca C., Valerio E., Giudicepietro F., Macedonio G., Casu F., Lanari R.* Pre- and co-eruptive analysis of the September 2021 eruption at Cumbre Vieja volcano (La Palma, Canary Islands) through DInSAR measurements and analytical modeling. // *Geophysical Research Letters*. – 2022. – V. 49, e2021GL097293. – DOI: <https://doi.org/10.1029/2021GL097293>
- 27) *del Fresno C., Cesca S., Klugel A., Domínguez Cerdeña I., Díaz Suárez E. A., Dahm T., García Cañada L., Meletlidis S., Milkereit C., Valenzuela Malebrán C., López Díaz R., López C.* Magmatic plumbing and dynamic evolution of the 2021 La Palma eruption // *Nature Communications*. 2023. – Vol. 14. No. 1. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-35953-y>
- 28) *Del Pezzo E., Bianco F., Saccorotti G.* Duration, magnitude and uncertainty due to seismic noise: inferences on the temporal pattern of G-R b value at Mt. Vesuvius, Italy // *Bull. seism. Soc. Am.* – 2003. – V. 93(4) – P. 1847–1853.
- 29) *Dutta U., Biswas N., Martirosyan A., Papageorgiou A., Kinoshita S.* Estimation of earthquake source parameters and site response in Anchorage, Alaska from strong-motion network data using generalized inversion method // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 2003. – Volume 137, Issues 1–4. – Pages 13-29. – ISSN 0031-9201. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(03\)00005-0](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(03)00005-0).
- 30) *Einarsson P., Brandsdóttir B., Gudmundsson M. T., Björnsson H., Grínvold K., Sigmundsson F.* Center of the Iceland Hotspot Experiences Volcanic Unrest. // *Eos, Transactions American Geophysical Union*/ – 1997. – V. 78 (35). – P.369–375. – DOI: <https://doi.org/10.1029/97EO00237>.
- 31) *Fischer T., Hrubcova P., Salama A., Doubravová J., Agustsdottir T., Gudnason E., Horalek J., Hersir G.P.* Swarm seismicity illuminates stress transfer prior to the 2021 Fagradalsfjall eruption in Iceland. // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2022 – V. 594. 117685. – DOI: 10.1016/j.epsl.2022.117685.
- 32) *Fisher M.A., Ruppert N.A., White R.A., Sliter R.W., Wong F.L.* Distal volcano-tectonic seismicity near Augustine Volcano. // *U.S. Geological Survey Professional Paper*. – 2010. – V. 1769. – p. 119-128. – URL: http://pubs.usgs.gov/pp/1769/chapters/p1769_chapter06.pdf
- 33) *Geiger H., Mattsson T., Deegan F.M., Troll V. R., Burchardt S., Gudmundsson O., Tryggvason A., Krumbholz M., Harris C.* Magma plumbing for the 2014–2015 Holuhraun eruption, Iceland // *Geochem. Geophys. Geosyst.* – 2016. – V. 17. – P. 2953–2968. – DOI:10.1002/2016GC006317.
- 34) *Giudicepietro F., Ricciolino P., Bianco F., Caliro S., Cubellis E., D'Auria L., De Cesare W., De Martino P., Esposito A. M., Galluzzo D., Macedonio D., Lo Bascio D., Orazi M., Pappalardo L., Peluso R., Scarpato G., Tramelli A., Chiodini G.* Campi Flegrei, Vesuvius and Ischia Seismicity in the Context of the Neapolitan Volcanic Area // *Frontiers in Earth Science*. – 2021. – Vol. 9. – DOI: 10.3389/feart.2021.662113

- 35) *Glazner A. F., McNutt S. R.* Relationship between dike injection and b-value for volcanic earthquake swarms. // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2021. – V. 126, e2020JB021631. – DOI: <https://doi.org/10.1029/2020JB021631>
- 36) *González P. J., Samsonov S. V., Pepe S., Tiampo K. F., Tizzani P., Casu F., Fernández J., Camacho A. G., Sansosti E.* Magma Storage and Migration Associated with the 2011–2012 El Hierro Eruption: Implications for Crustal Magmatic Systems at Oceanic Island Volcanoes. // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2013. – V. 118 (8). – P. 4361–4377. – DOI: <https://doi.org/10.1002/jgrb.50289>
- 37) *Grapethin R., Freymueller J., Kaufman A.M.* Geodetic observation during the 2009 eruption at Redoubt volcano. // *J. Volc. Geotherm. Res.* – 2013. – V. 259. – P.115-132
- 38) *Greenfield T., White R. S., Winder T., Ágústsdóttir T.* Seismicity of the Askja and Bárðarbunga Volcanic Systems of Iceland, 2009–2015. // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2020. – V. 391, 106432. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.08.010>
- 39) *Grekov E.M., Shebalin P.N., Smirnov V.B.* Two Types of Seismic Activity Prior to the 2006 Eruption of Augustine Volcano in Alaska // *Doklady Earth Sciences*. – 2025. – Vol. 520, No. 2. – P. 1-8. – DOI 10.1134/S1028334X24605273.
- 40) *Gresta S., Patane G.* Variation of b values before the Etnean Eruption of March 1981 // *Pure appl. Geophys.* – 1983. – V. 121. – P. 287–295.
- 41) *Gudmundsson M., Jonsdottir K., Hooper A., Holohan E., Halldórsson S., Ofeigsson B., Cesca S., Vogfjörð K., Sigmundsson F., Hognadóttir T., Einarsson P., Sigmarsson O., Jarosch A., Jónasson K., Magnússon E., Hreinsdóttir S., Bagnardi M., Parks M., Hjörleifsdóttir V., Aiuppa A.* Gradual caldera collapse at Bardarbunga volcano, Iceland, regulated by lateral magma outflow. // *Science*. – 2016. – V. 353. aaf8988-aaf8988. – DOI: 10.1126/science.aaf8988.
- 42) *Gutenberg B., Richter C.* Frequency of earthquakes in California // *Nature*. – 1944. – Vol. 156 – pp. 371–371.
- 43) *Gutenberg B., Richter C.* Magnitude and energy of earthquakes // *Annals of Geophysics*. – 1956. – V. 9, N 1. – P. 1–15.
- 44) *Harada S., Ueno H., Ohno H.* The New Japan Meteorological Agency (JMA) Magnitude, Japan Geoscience Union (JPGU) meeting abstract. –2004. – URL: <https://gbank.gsj.jp/ld/resource/geolis/200450873.html>, http://www2.jpгу.org/meeting/2004/pdf/s050/s050-004_e.pdf.
- 45) *Hesterberg T., Moore D.S., Monaghan S., Clipson A., Epstein R., McCabe G. P.* Bootstrap Methods and Permutation Tests // *Introduction to the Practice of Statistics (5th Edition)*, Freeman & Co., New York. – 2005. – pp. 14.1-14.70.
- 46) *Hill D.P.* A model for earthquake swarms. // *Journal of Geophysical Research*. – 1977. – V. 82. – P. 1347-1352.

- 47) *Hobé A., Bazargan M., Selek B., Tryggvason A., Alofe E., Gudmundsson A.* Tomographic and volcanotectonic control on the 2021–2023 Fagradalsfjall eruptions, Iceland. // *Sci. Rep.* – 2025. – V. 15, 16455. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-95169-6>
- 48) *Holschneider M., Narteau C., Shebalin P., Peng Z., Schorlemmer D.* Bayesian analysis of the modified Omori law. // *J. Geophys. Res.* – 2012. – V. 117. – DOI:10.1029/2011JB009054.
- 49) *Hudson T. S., White R. S., Greenfield T., Ágústsdóttir T., Brisbourne A., Green R. G.* Deep crustal melt plumbing of Bárðarbunga volcano, Iceland // *Geophys. Res. Lett.* – 2017. – V. 44. – P. 8785–8794. – DOI:10.1002/2017GL074749.
- 50) *Ibáñez J., De Angelis S., Díaz Moreno A., Hernandez P., Alguacil G., Posadas A., Pérez N.* Insights Into The 2011-2012 Submarine Eruption Off The Coast Of El Hierro (Canary Islands, Spain) From Statistical Analyses Of Earthquake Activity. // *Geophysical Journal International.* – 2012. – V. 191. – P. 659-670. – DOI:10.1111/j.1365-246X.2012.05629.x.
- 51) *Jacobs K., Mcnutt S.* Using seismic b-values to interpret seismicity rates and physical processes during the preeruptive earthquake swarm at Augustine Volcano 2005–2006. // *US Geological Survey Professional Paper.* – 2010. – P. 59–75. – DOI: <https://doi.org/10.3133/pp17693>
- 52) JMA. 2023. Japan Meteorological Agency. The Seismological Bulletin of Japan: Hypocenters. URL: https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/hypo_e.html (accessed June 4, 2023)
- 53) *Kasatkina E., Koulakov I., West M., Izbekov P.* Seismic structure changes beneath Redoubt Volcano during the 2009 eruption inferred from local earthquake tomography. // *J. Geophys. Res. Solid Earth.* – 2014. – V.119. – P. 4938–4954. – DOI:10.1002/2013JB010935.
- 54) *Keir D., De Siena L., Doubre C., Johnson J.H., Maccaferri F., Passarelli L.* Editorial: Seismicity in Volcanic Areas. // *Front. Earth Sci.* – 2021. – V. 9:829460. – DOI: 10.3389/feart.2021.829460
- 55) *Klein F.W.* Earthquakes at Loihi submarine Volcano and the Hawaiian hot spot // *Geophys. Res. Lett.* – 1982. – V. 87(B9). – P. 7719–7726.
- 56) *Konstantinou K.* Multiyear temporal variation of b-values at Alaskan volcanoes: The synergetic influence of stress and material heterogeneity. // *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* – 2022. – V. 427. – DOI:10.1016/j.jvolgeores.2022.107572.
- 57) *Konstantinou K.I.* Dike volume derived from seismicity as a gauge of fracture toughness and propagation dynamics. // *Sci. Rep.* – 2024. – V. 14, 17593. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67724-0>
- 58) *Koulakov I., Qaysi S.I., Izbekov P., Browne B.L.* Structure of shallow magma sources beneath Augustine Volcano (Alaska) inferred from local earthquake tomography // *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* – 2023. – V. 444, 107965. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107965>

- 59) Kumagai H., Ohminato T., Nakano M., Ooi M., Kubo A., Inoue H., Oikawa J. Very-Long-Period Seismic Signals and Caldera Formation at Miyake Island // Japan. Science. – 2001. – V. 293. – P. 687-690. – DOI: 10.1126/science.1062136.
- 60) Larsen J.F., Nye C.J., Coombs M.L., Tilman M., Izbekov P., Cameron C. Petrology and geochemistry of the 2006 eruption of Augustine Volcano, chapter 15 of Power, J.A., Coombs, M.L., and Freymueller, J.T., eds., The 2006 eruption of Augustine Volcano. // Alaska: U.S. Geological Survey Professional Paper. – 2010. – V. 1769. – p. 335-382 and spreadsheets.
- 61) Lopez C., Blanco M. J., Abella R., Brenes B., Cabrera Rodríguez V.M., Casas B., Domínguez Cerdeña I., Felpeto A., de Villalta M. Fernández, del Fresno C., García O., García-Arias M. J., García-Cañada L., Gomis Moreno A., González-Alonso E., Guzmán Pérez J., Iribarren I., López-Díaz R., Luengo-Oroz N., Meletlidis S., Moreno M., Moure D., de Pablo J. Pereda, Rodero C., Romero E., Sainz-Maza S., Sentre Domingo M. A., Torres P. A., Trigo P., Villasante-Marcos V. Monitoring the volcanic unrest of El Hierro (Canary Islands) before the onset of the 2011-2012 submarine eruption // Geophys. Res. Lett. – 2012. – V. 39, L13303. – DOI: <https://doi.org/10.1029/2012GL051846>
- 62) Martí J., Pinel V., Lopez C., Geyer A., Abella R., Tarraga M., Blanco M. J., Castro A., Rodríguez C. Causes and mechanisms of the 2011-2012 El Hierro (Canary Islands) submarine eruption. // J. Geophys. Res. Solid Earth. – 2013. – V. 118. – P. 823–839. – DOI:10.1002/jgrb.50087.
- 63) Martin E., Bosse V., Ruffet G., Tiepolo M., Sigmarsson O. Geodynamics of rift-plume interaction in Iceland as constrained by new ⁴⁰Ar/³⁹Ar and in situ U-Pb zircon ages. // Earth and Planetary Science Letters. – 2011. – V. 311. – P. 28-38. – DOI: 10.1016/j.epsl.2011.08.036.
- 64) McNutt S. Long Swarms and Short Swarms at Volcanoes: Evidence for Different Processes. // Annals of Geophysics. – 2025. – V. 68 (1). – DOI: 10.4401/ag-9156.
- 65) McNutt S.R. Volcanic seismology // Annu. Rev. Earth planet. Sci. – 2005. – V. 32. – P. 461–491. – DOI: doi: 10.1146/annurev.earth.33.092203.122459
- 66) Mezcua J., Rueda J. Seismic swarms and earthquake activity b-value related to the September 19, 2021, La Palma volcano eruption in Cumbre Vieja, Canary Islands (Spain). // Bull Volcanol. – 2023. – V. 85, 32. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00445-023-01646-z>
- 67) Mignan A., Woessner J. Estimating the magnitude of completeness for earthquake catalogs // Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis. – 2012. – DOI: 10.5078/CORSSA-00180805.
- 68) Minakami T. Fundamental research for predicting volcanic eruptions, Part 1 // Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo. – 1960. – Vol. 38. – pp. 497–544.
- 69) Minson S. E., Dreger D. S., Bürgmann R., Kanamori H., Larson K. M. Seismically and geodetically determined nondouble-couple source mechanisms from the 2000 Miyakejima volcanic earthquake swarm. // J. Geophys. Res. – 2007. – V. 112, B10308. – DOI:10.1029/2006JB004847.

- 70) *Mogi K.* Some discussions on aftershocks, foreshocks and earthquake swarms, the fracture of a semi-infinite body caused by an inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena. // *Bulletin of the Earthquake Research Institute-University of Tokyo*. – 1963. – V. 41. – P. 615–658.
- 71) *Nakada S., Nagai M., Kaneko T., Nozawa A., Suzuki-Kamat K.* Chronology and products of the 2000 eruption of Miyakejima Volcano. // *Japan. Bull Volcanol.* – 2005. – V. 67. – P. 205–218. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00445-004-0404-4>
- 72) National Geographic Institute (IGN), Spanish Seismic Catalogue. <https://doi.org/10.7419/162.03.2022>
- 73) *Nishimura T.* Back-arc spreading of the northern Izu–Ogasawara (Bonin) Islands arc clarified by GPS data. // *Tectonophysics*. – 2011. – V. 512. – DOI: 10.1016/j.tecto.2011.09.022.
- 74) *Panzer F., Zecher J. D., Vogfjörð K. S., Eberhard D. A. J.* A Revised Earthquake Catalogue for South Iceland. // *Pure and Applied Geophysics*. – 2015. – V. 173 (1). – P. 97–116. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-015-1115-9>.
- 75) *Papadimitriou P., Karakostas A., Kapetanidis V., Pavlou K., Sotiriadis I., Spingos I.* Seismicity: A tool in forecasting Volcanic eruptions // 15th International Congress of the Geological Society of Greece, Harokopio University of Athens. – Greece, Athens. – 22-24 May, 2019
- 76) *Passarelli L., Rivalta E., Cesca S., Aoki Y.* Stress changes, focal mechanisms, and earthquake scaling laws for the 2000 dike at Miyakejima (Japan). // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. – 2015. – V. 120. – P. 4130–4145. – DOI:10.1002/2014JB011504.
- 77) *Passarelli L., Rivalta E., Jónsson S., Hensch M., Metzger S., Jakobsdóttir S.S., Maccaferri F., Corbi F., Dahm T.* Scaling and spatial complementarity of tectonic earthquake swarms. // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 2018. – V. 482. – pp. 62–70. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.10.052>
- 78) *Power J. A., Lalla D. J.* Seismic observations of Augustine Volcano, 1970-2007: Chapter 1 in *The 2006 eruption of Augustine Volcano, Alaska*. // *US Geological Survey Professional Paper*. – 2010. – P. 3-40. – DOI: 10.3133/PP17691
- 79) *Power J.A., Friberg P.A., Haney M.M., Parker T., Stihler S.D., Dixon J.P.* A unified catalog of earthquake hypocenters and magnitudes at volcanoes in Alaska—1989 to 2018 // *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report*. – 2019. – V. 2019–5037. – DOI: <https://doi.org/10.3133/sir20195037> Available at: <https://pubs.usgs.gov/publication/sir20195037>
- 80) *Power J.A., Stihler S.D., Chouet B.A., Haney M.M., Ketner D.M.* Seismic observations of Redoubt Volcano, Alaska - 1989-2010 and a conceptual model of the Redoubt magmatic system. // *J. Volc. Geotherm. Res.* – 2013. – V. 259. – P. 31-44. –DOI: <https://doi.org/10.1016/j.volgeores.2012.09.014>
- 81) *Riel B., Milillo P., Simons M., Lundgren P., Kanamori H., Samsonov S.* The Collapse of Bárðarbunga Caldera, Iceland. // *Geophysical Journal International*. – 2015. – V. 202 (1). – P. 446–453. – DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggv157>

- 82) *Roberts N. S., Bell A. F., Main I. G.* Are volcanic seismic b-values high, and if so when? // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2015. – V. 308. – P. 127-141. – ISSN 0377-0273. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.10.021>
- 83) *Roberts N. S., Bell A. F., Main I. G.* Mode switching in volcanic seismicity: El Hierro 2011–2013. // *Geophys. Res. Lett.* – 2016. – V. 43. – P. 4288–4296. – DOI:10.1002/2016GL068809.
- 84) *Roland E., McGuire Jeffrey J.* Earthquake swarms on transform faults // *Geophys. J. International*. – 2009. – V. 178. – P. 1677–1690.
- 85) *Roman D.C.* Numerical models of volcano-tectonic earthquake triggering on non-ideally oriented faults // *Geophysical Research Letters*. – 2005. – V. 32, L02304. – DOI: 10.1029/2004GL021549.
- 86) *Roman D.C., Cashman K.V.* The origin of volcano-tectonic earthquake swarms. // *Geology*. – 2006. – V. 34 (6). – P. 457–460. – DOI: <https://doi.org/10.1130/G22269.1>
- 87) *Rubeis V., Tosi P., Vinciguerra S.* Time clustering properties of seismicity in the Etna Region between 1874 and 1913 // *Geophysical Research Letters* – 1997. – Vol. 24. – pp. 2331-2334. – DOI: 10.1029/97GL02340
- 88) *Rubin A. M.* Dike-induced faulting and graben subsidence in volcanic rift zones. // *J. Geophys. Res.* – 1992. – V. 97(B2). – P. 1839–1858. – DOI:10.1029/91JB02170.
- 89) *Rubin A.M., Gillard D.* Dike-induced earthquakes: Theoretical considerations. // *J. Geophys. Res.* – 1998. – V. 103(B5). – P. 10017–10030. – DOI:10.1029/97JB03514.
- 90) *Rueda J., Mezcua J.* A local magnitude scale for a volcanic region: the Canary Islands, Spain. // *Bull Volcanol.* – 2022. – V. 84, 47. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01553-9>
- 91) *Schmid A., Grasso J.-R.* Omori law for eruption foreshocks and aftershocks // *Journal of geophysical research* – 2012. – Vol. 117. – DOI:10.1029/2011JB008975
- 92) *Shi Y., Bolt B.A.* The standard error of the magnitude-frequency b-value // *Bull. Seismol. Soc. Am.* – 1982. – V. 72. – P.1677-1687.
- 93) *Sigmundsson F., Hooper A., Hreinsdottir S., Vogfjörð K., Ofeigsson B., Heimissson E., Dumont S., Parks M., Spaans K., Gudmundsson G., Drouin V., Árnadóttir T., Jonsdottir K., Gudmundsson M., Högnadóttir T., Fridriksdottir H., Hensch M., Einarsson P., Magnússon E., Eibl E.* Segmented lateral dyke growth in a rifting event at Bárðarbunga volcanic system, Iceland // *Nature*. – 2015. – V. 517. – P. 191–195.
- 94) *Sigurdsson H., ed.* The Encyclopedia of Volcanoes. 2nd ed. Amsterdam: Academic Press. – 2015. – DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.01002-6>.
- 95) *Smirnov V.B., Ponomarev A.V., Benard P., Patonin A.V.* Regularities in transient modes in the seismic process according to the laboratory and natural modeling // *Izvestiya Phys. Solid Earth*. – 2010. – V. 46 (2). – P. 104–135.

- 96) *Steinke B., Jolly A.D., Carniel R., Dempsey D.E., Cronin S.J.* Identification of Seismo-Volcanic Regimes at Whakaari/White Island (New Zealand) Via Systematic Tuning of an Unsupervised Classifier // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* – 2023. – Vol. 128
- 97) *Suarez E.D., Domínguez-Cerdeña I., Villaseñor A., Sainz-Maza Aparicio S., del Fresno C., García-Cañada L.* Unveiling the pre-eruptive seismic series of the La Palma 2021 eruption: Insights through a fully automated analysis. // *Journal of Volcanology and Geothermal Research* – 2023. – V. 444, 107946. – ISSN 0377-0273. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107946>.
- 98) *Taylor B.* Rifting and the volcanic-tectonic evolution of the Izu-Bonin-Mariana Arc. In B. Taylor, K. Fujioka et al. (eds.) // *Proc. ODP, Scientific Results, Ocean Drilling Program*. – 1992. – V. 126. – P. 627-652. – DOI:10.2973/odp.proc.sr.126.163.1992.
- 99) *Tilling R. I.* Volcanoes. Washington, D.C.: U.S. Geological Survey, 1999. – 45 p. – URL: <https://pubs.usgs.gov/gip/volc/text.html> (дата обращения 23.03.2023)
- 100) *Toda S., Stein R., Sagiya T.* Evidence from the AD 2000 Izu islands earthquake swarm that stressing rate governs seismicity. // *Nature*. – 2002. – V. 419. – P. 58-61. – DOI: 10.1038/nature00997.
- 101) *Traversa P., Grasso J.-R.* How is Volcano Seismicity Different from Tectonic Seismicity? // *Bulletin of the Seismological Society of America* – 2010. – DOI: 10.1785/0120090214
- 102) *Uchide T., Imanishi K.* Underestimation of microearthquake size by the magnitude scale of the Japan Meteorological Agency: Influence on earthquake statistics. // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2018. – V. 123. – P. 606-620. – DOI: <https://doi.org/10.1002/2017JB014697>
- 103) *Uhira K., Baba T., Mori H., Katayama H., Hamada N.* Earthquake swarms preceding the 2000 eruption of Miyakejima volcano. // *Japan. Bull Volcanol.* – 2005. – V. 67. – P. 219–230. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00445-004-0405-3>
- 104) *Ukawa M., Tsukahara H.* Earthquake swarms and dike intrusions off the east coast of Izu Peninsula, central Japan. // *Tectonophysics*. – 1996. – V. 253. – P. 285–303. – DOI: 10.1016/0040-1951(95)00077-1.
- 105) *Umino N., Sacks Selwyn I.* Magnitude-frequency relations for northeastern Japan. // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1993. – V. 83 (5). – P. 1492–1506. – DOI: <https://doi.org/10.1785/BSSA0830051492>
- 106) *Utsu T.* A method for determining the value of b in a formula $\log n = a - bM$ showing the magnitude-frequency relation for earthquakes. // *Geophys. Bull. Hokkaido Univ.* – 1965. – V. 13. – P. 99–103.
- 107) *Venzke E., ed.* Global Volcanism Program, Report on Bardarbunga (Iceland). // *Bulletin of the Global Volcanism Network*, 42:2. Smithsonian Institution. – 2017. – DOI: <https://doi.org/10.5479/si.GVP.BGVN201702-373030>

- 108) Wiemer S., Wyss M. Minimum magnitude of complete reporting in earthquake catalogs: examples from Alaska, the western United States, and Japan // Bull. Seismol. Soc. Am. – 2000. – V. 90. – 859–869.
- 109) Woessner J., Wiemer S. Assessing the Quality of Earthquake Catalogues: Estimating the Magnitude of Completeness and Its Uncertainty. // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2005. – V. 95. – P. 684-698. – DOI: 10.1785/0120040007.
- 110) Yamaoka K., Kawamura M., Kimata F., Fujii N., Kudo T. Dike intrusion associated with the 2000 eruption of Miyakejima Volcano. // Japan. Bull Volcanol. – 2005. – V. 67. – P. 231–242. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00445-004-0406-2>
- 111) Yang X., Roman D.C., Janiszewski H., Maguire R., Schmandt B. Double reservoirs imaged below Great Sitkin Volcano, Alaska, explain the migration of volcanic seismicity. // Autheria – 2022. – DOI: 10.22541/essoar.167058972.23950272/v1
- 112) Zhan Y., Roman D.C., Le Mével H., Power J. A. Earthquakes indicated stress field change during the 2006 unrest of Augustine Volcano, Alaska. // Geophysical Research Letters. – 2022. – V. 49. – DOI: <https://doi.org/10.1029/2022GL097958>