

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Греков Евгений Михайлович

**Закономерности режима вулканической сейсмичности в
периоды магматических интрузий**

Специальность 1.6.9. Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2026

Диссертация подготовлена на кафедре физики Земли физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научные руководители: ***Смирнов Владимир Борисович,***
доктор физико-математических наук,
доцент

Шебалин Петр Николаевич,
доктор физико-математических наук, член-
корреспондент РАН

Официальные оппоненты: ***Кулаков Иван Юрьевич,***
доктор геолого-минералогических наук,
член-корреспондент РАН, Сколковский
институт науки и технологий, Центр науки
и технологий добычи углеводородов,
профессор

Турунтаев Сергей Борисович,
доктор физико-математических наук,
Институт динамики геосфер имени
академика М.А. Садовского Российской
академии наук, исполняющий обязанности
директора

Крылов Артем Александрович,
кандидат физико-математических наук,
Институт океанологии имени
П.П. Ширшова Российской академии наук,
лаборатория геодинамики, георесурсов,
георисков и геоэкологии, старший научный
сотрудник

Защита диссертации состоится «01» октября 2026 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.3 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, физический факультет, ЮФА.

E-mail: diss.sov.016.3@org.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций Научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3997>

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

С.В. Колесов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа посвящена исследованию вулканической сейсмичности в качестве инструмента для изучения процесса разрушения пород и инициации землетрясений.

Актуальность темы и степень ее разработанности. Основное внимание уделено процессам магматических интрузий, это явление можно представить как натуральный эксперимент по воздействию интенсивного внешнего по отношению к среде источника, приводящего к разрушению. Под интрузией здесь понимается процесс внедрения магмы в трещины горных пород под давлением, созданным в магматической системе.

Интрузии часто предвещают извержения и инициируют особый сейсмический режим – вулканические рои [Glazner, McNutt, 2021]. Рои землетрясений – это серии относительно слабых сейсмических событий, происходящих за небольшой промежуток времени в ограниченном пространстве без ярко выраженного основного события.

Актуальной остается задача классификации вулканических роев: она заключается в выявлении признаков, по которым рои закономерно различаются, и в сопоставлении их типов с физическими процессами. В современной работе [McNutt, 2025] диагностика вулканических роев обозначена ключевой для прогнозирования извержений. На основе 6 примеров извержений автор выделяет два типа роев и отмечает закономерность: перед извержением иногда наблюдается пара роев – сначала «длинный», затем «короткий», в котором появляются землетрясения с длиннопериодными компонентами. Предполагается, что первый тип отражает рост давления магмы, второй – ее продвижение к поверхности при открытии канала.

Автор и сам отмечает концептуальный характер модели: закономерность выполняется не на всех вулканах даже среди 6 примеров; выборка ограничена субдукционными зонами; закономерное поведение наклона графика повторяемости, на которое также опирается автор, наблюдается лишь в половине случаев. Это, на наш взгляд, свидетельствует о том, что задача классификации вулканических роев далека от решения.

Другим интригующим результатом при исследовании вулканических роев является широкий диапазон значений наклона графика повторяемости (*b-value*), входящего в закон Гутенберга-Рихтера [Gutenberg, Richter, 1944] и отражающего соотношение числа событий разной магнитуды. Для тектонической сейсмичности этот параметр обычно близок к единице, тогда как для вулканической – меняется от аномально низких (до 0.44) до экстремально высоких (иногда более 3) значений [Roberts et al., 2015]. Деление на повышенные, нормальные и экстремально высокие значения условно и используется для удобства изложения. Для вулканической сейсмичности характерны в среднем повышенные значения *b* – в [Glazner, McNutt, 2021] типичным считается значение 1.7, поэтому значения выше 1.9 мы считаем аномально высокими.

Достаточно хорошо известен эффект падения наклона графика повторяемости во времени перед извержениями [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 1.9) являются предметом активной дискуссии. Например, известна работа [Roberts et al., 2015], озаглавленная вопросом «Высоки ли *b-value* вулканической сейсмичности, если да, то когда?». Отвечая на вторую часть вопроса, авторы приводят лишь общее суждение: повышенные значения наклона графика повторяемости характерны для периодов активизации вулканов. Истинность экстремально высоких значений параметра для вулканической сейсмичности до сих пор ставится под сомнение (например, [Konstantinou, 2022; Roberts et al., 2015]), а причины и условия их наблюдения изучены не в полной мере.

Многообразие методов оценки *b-value* в исследованиях вулканической сейсмичности делает актуальным пересчет этого параметра унифицированной методикой даже для уже изученных случаев: так, в [Roberts et al., 2015] при повторном анализе двух известных эпизодов авторы подтверждают экстремально высокие значения для одного случая и опровергают для другого.

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 Фаградальсфьядль 2021 года (рифтовая зона и «горячая точка»);

– один случай в Японии – извержение вулкана Миякедзима 2000 года (зона субдукции).

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. 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 *b-value* более современными методами, что частично изменило картину и возможную интерпретацию.

Впервые с применением унифицированной 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.

Теоретическая значимость работы заключается в:

- развитии представлений о механизме инициации вулканических роев;
- демонстрации подобию 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 трещин под воздействием напряжений, создаваемых магматической интрузией в условиях ее стагнации. Продемонстрирована ее 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].

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 приведенные в диссертации результаты являются оригинальными и получены самим автором, если не указано, что они взяты из другой работы. Автор самостоятельно программно реализовывал расчетные алгоритмы. 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.

Результаты были представлены на 7 международных и всероссийских конференциях.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы, формулировку цели и задач исследования, основные положения, выносимые на защиту. В **первой главе** приведен обзор состояния проблемы, описана природа вулканизма и вулканической сейсмичности, приведены известные сведения о вулканических роях и их временных вариациях наклона графика повторяемости.

Во **второй главе** обсуждается основная методология, используемая в работе. В **разделе 2.1** рассмотрена методология оценки наклона графика повторяемости, сформулирована общая методика расчета временных вариаций наклона графика повторяемости. В **разделе 2.2** приводится формализация описания временных профилей вулканических роев. Для этого используется концепция асимметрии по двум аспектам: по высвобождению энергии и по активности. В работе [Roland, McGuire, 2009] авторы вводят критерий, который 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]:

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

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

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

Для анализа временного профиля активности 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.

Этот коэффициент отражает, в какой части последовательности происходит ее кульминация. Кульминацией роя будем называть период максимальной активности, а энергетической кульминацией – период максимального высвобождения энергии или сейсмического момента.

Если оба коэффициента асимметрии принимают отрицательные значения – рой называется отрицательно асимметричным.

В главе 3 представлены основные результаты анализа роев исследуемых вулканов. На рисунке 1 показаны исследуемые вулканы на карте.

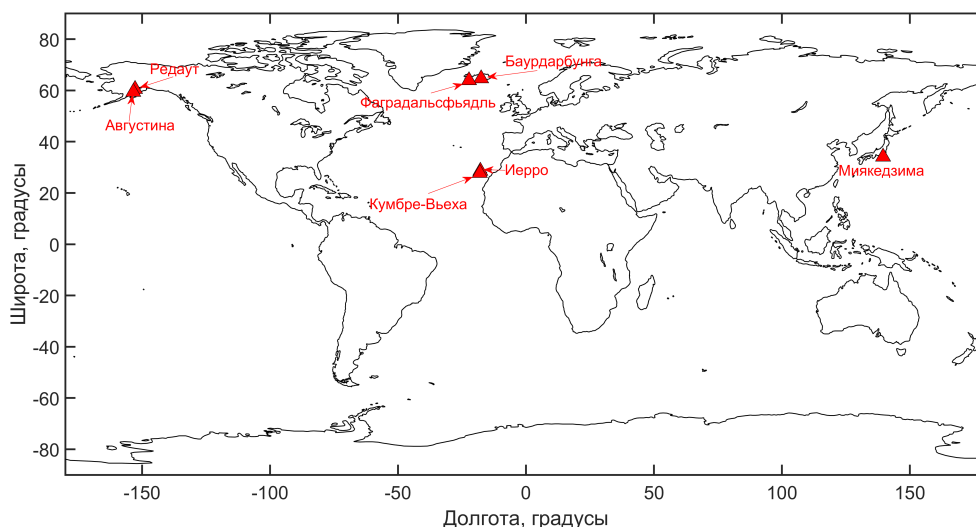


Рисунок 1 – карта исследуемых в работе вулканов

В разделе 3.1 рассматривается два роя предэруптивного периода извержения вулкана Редаут 2009 года. Первый рой обладает бимодальной формой временного профиля, не демонстрирует значимых временных вариаций *b-value* со средним 1.31 ± 0.35 . Второй рой имеет значительную отрицательную асимметрию, выраженную в росте активности и магнитуд событий от начала к концу роя, сопровождающемся спадом параметра *b* от экстремально высокого значения (2.74 ± 0.31) на стадии активизации до умеренно повышенного (1.68 ± 0.29) в период кульминации (Рис. 4 (а)). Почти сразу после энергетической кульминации этого роя появились длиннопериодные землетрясения и началось извержение, что указывает на связь роя с финальным прорывом магмы к поверхности и формированием магматического канала.

В разделе 3.2 рассматривается два роя предэруптивной фазы извержения вулкана Августина 2006 года. Эти рои были выделены работе [Jacobs, McNutt, 2010]: длинный с 30 апреля 2005 по 10 января 2006 и короткий с 10 по 11 января. Сейсмичность этого периода была подробно рассмотрена нами в работах [Grekov et al., 2025; Греков, Шебалин, 2025]. Длинный рой обладает значительной отрицательной асимметрией, наблюдается выраженный рост активности и магнитуд событий, а также спад значения *b* от экстремально высокого уровня (от 2.04 до 2.65) до единицы (Рис. 4(б)). Известно, что предэруптивный период начался с длительного «раздувания» вулканической постройки, после чего характер деформаций изменился на интрузивный одновременно с увеличением активности и снижением наклона графика повторяемости. Второй рой является более плотным финальным всплеском событий с большой долей сверх длиннопериодных землетрясений (VLP). Авторы [Jacobs, McNutt, 2010] считают его продолжением процесса длинного роя и связывают с финальным прорывом магмы к поверхности, после которого и началось извержение.

В разделе 3.3 рассматривается четыре роя предэруптивной фазы извержения вулкана Кумбре-Вьеха, которое началось 19 сентября 2021 года [De Luca et al., 2022]. В отличие от трех первых роев, четвертый рой обладает значительной отрицательной асимметрией, а также демонстрирует спад значения параметра *b* от экстремально высокого до сниженного (от 2.14 до 0.70) (Рис. 4(в)). Сразу после его кульминации началось извержение. Этот рой связывают с финальным прорывом магмы к поверхности, который произошел по границе коры и геотермальной области под вулканом, обнаруженной с помощью томографии [D'Auria et al., 2022].

В разделе 3.4 рассматривается предэруптивная фаза извержения вулкана Иерро 2011 года. Поведение поверхностных деформаций в этом периоде схоже с предэруптивной фазой вулкана Августина – «надувание» вулканической постройки с последующим хрупким разрушением при внедрении магмы [Marti et al., 2013]. После отсечения событий по порогу представительности профиль активности предэруптивного периода вулкана Иерро также становится схож с профилем длинного роя вулкана Августина. На этом основании всю сейсмичность периода можно рассматривать как единый рой, аналогичный

длинному рою вулкана Августина. В таком случае он демонстрирует значительную отрицательную асимметрию и спад значений b -value от экстремально высоких (около 2.93) до сниженных (около 0.82) (Рис. 4(г)).

В разделе 3.5 рассматривается сейсмичность, приуроченная к латеральной интрузии перед извержением вулкана Баурдарбунга 2014 года. Сейсмичность, связанная с этим интрузивным эпизодом, была рассмотрена нами в работе [Греков, 2025]. Интрузия развивалась 15 суток, проходя стадии стагнаций и прорывов, которые в [Sigmundsson et al., 2015] связывают с преодолением энергетических барьеров. Самая длинная пауза (20–23 августа) была вызвана, вероятно, увеличением литостатического давления на пути интрузии [Sigmundsson et al., 2015]. С 20 августа по середину 24 августа активность нарастала. А с 19 по 23 августа параметр наклона графика повторяемости сохранял экстремально высокие значения (до 2.02 при окне в 50 событий), но 24–25 августа снизился до минимума (0.56) – на пике активности и высвобождения энергии (Рис. 4(д)). По мнению авторов [Sigmundsson et al., 2015], именно после 23 августа интрузия резко продвинулась дальше, преодолев барьер. Таким образом, характерное поведение параметра b и выраженный отрицательно-асимметричный паттерн сейсмичности связаны как раз с этим эпизодом.

В разделе 3.6 рассматривается сейсмичность периода интрузии вулкана Миякедзима 2000 года. В данном случае интрузия происходила параллельно с извержением в стороне от центральной кальдеры, и в области самой интрузии не было вулканической активности. Интрузия продолжалась почти 2 месяца, в течение которых сейсмичность концентрировалась вдоль линейной структуры [Yamaoka et al., 2005], образуя эпизоды повышенной активности, которые мы и будем считать отдельными роями. Среди рассмотренных 21 роя этого периода не наблюдается роев с выраженной отрицательной асимметрией временных профилей (Рис. 3(а)), а экстремально высокие значения b -value наблюдаются только в двух роях.

В разделе 3.7 рассматривается сейсмичность в период интрузии перед извержением вулкана Фаградалсфьядль 2021 года. Сопоставление сейсмичности, связанной с этой интрузией, с интрузивным эпизодом вулкана Баурдарбунга 2014 года было проведено нами в работе [Греков, 2025]. Вулканическая система активизировалась после землетрясения с $M_L = 5.3$, после чего, судя по поверхностным деформациям, начался процесс интрузии [Fischer et al., 2022], который привел к началу трещинного извержения.

Эта сейсмичность рассматривалась как непрерывный процесс из-за отсутствия ярко выраженных отдельных всплесков активности и высокой плотности потока событий. По этой причине для этого периода не рассчитывались коэффициенты асимметрии. Четких паттернов совместного роста или падения числа событий и высвобождаемой энергии не наблюдается, отсутствуют выраженные энергетические кульминации. Вариации наклона

графика повторяемости не демонстрируют экстремально высоких значений и четкой связи с временными профилями сейсмичности (Рис. 2).

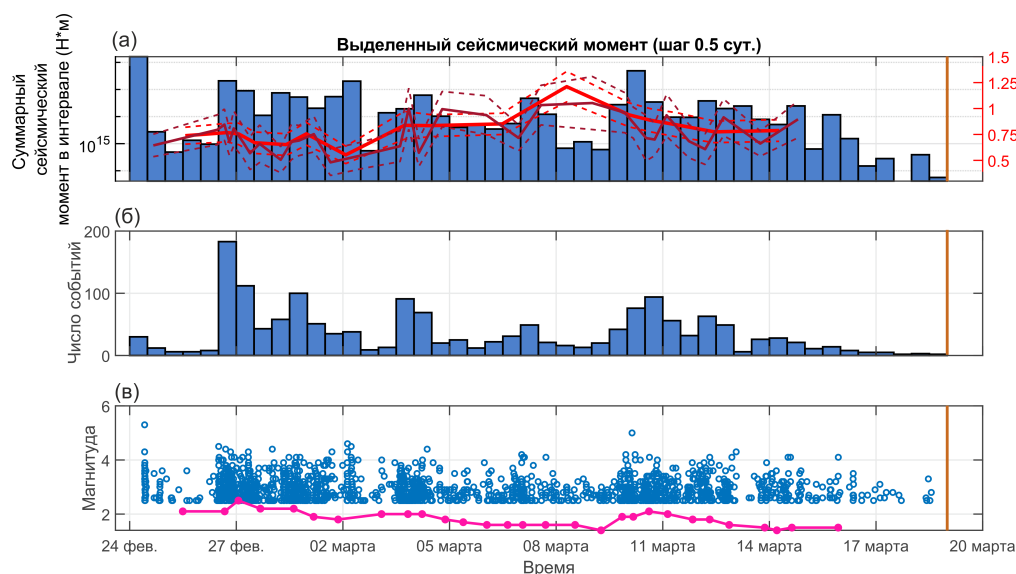


Рисунок 2 – Графики для роя интрузии вулкана Фаградалсфьядль: (а) – график высвобождения сейсмического момента во временном окне; (б) – число событий во времени; (в) – распределение событий во времени, розовая линия – вариации представительной магнитуды. На графике (а) красной и бордовой линиями показаны вариации b -value во времени с разной шириной окна, пунктирные линии – погрешность; оранжевая вертикальная линия – начало извержения

В главе 4 проводится обобщение полученных результатов и их физическая интерпретация. Диаграмма коэффициентов асимметрии для исследованных роев показана на рисунке 3(а). Случай Фаградалсфьядль отсутствует, так как там сейсмичность в период интрузии не имела выраженной кульминации. Выделена группа из пяти отрицательно-асимметричных роев, они обведены эллипсом на рисунке 3(а). Их временные профили показаны на рисунке 4.

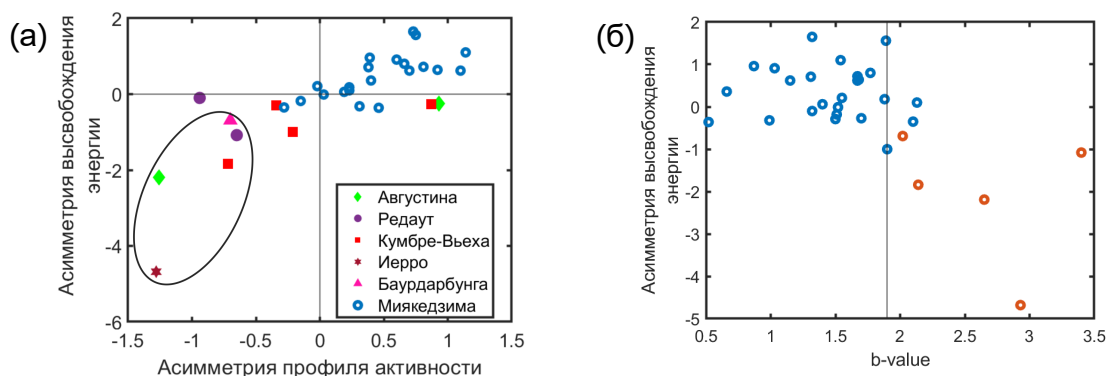


Рисунок 3 – (а) – диаграмма коэффициентов асимметрии роев, эллипсом выделена группа отрицательно-асимметричных роев, (б) – график зависимости максимального b -value во временных вариациях роев от их энергетической асимметрии, оранжевые кружки – пять отрицательно-асимметричных роев, вертикальная линия – порог 1.90

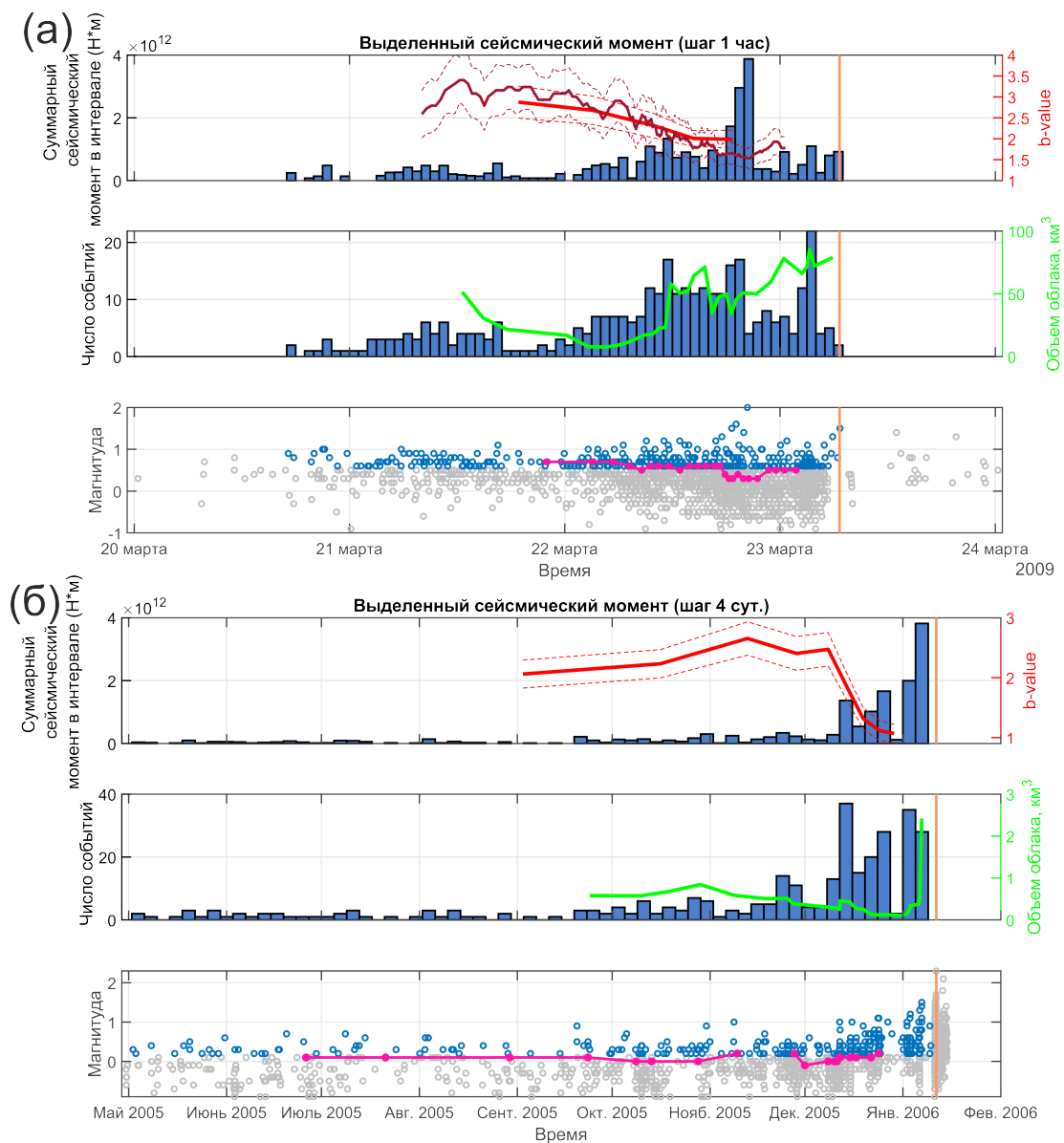
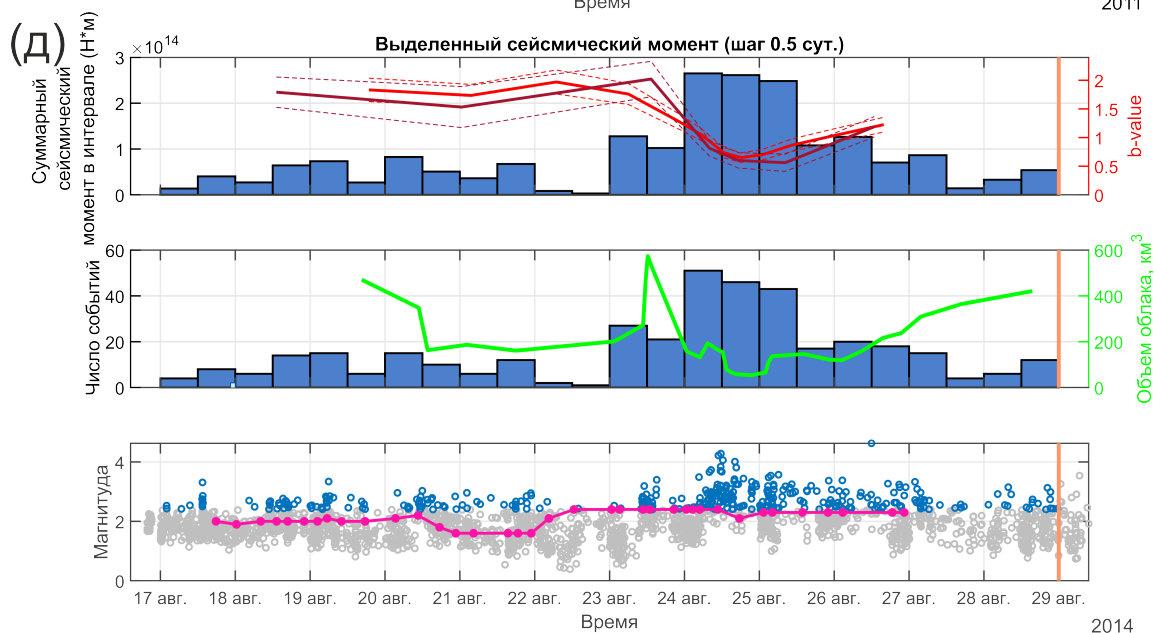
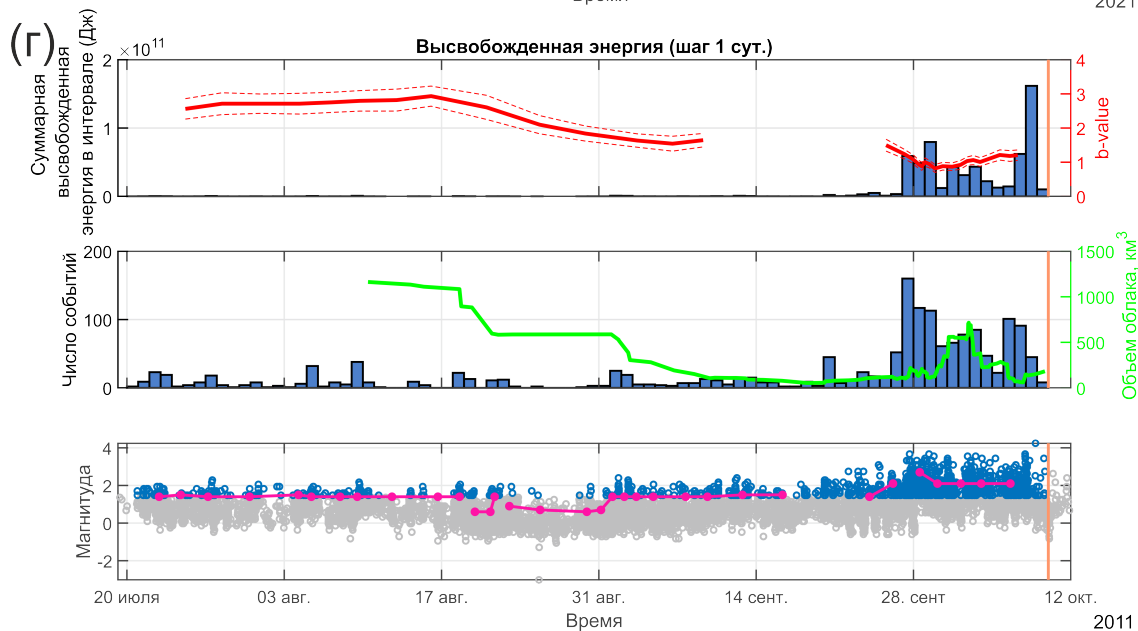
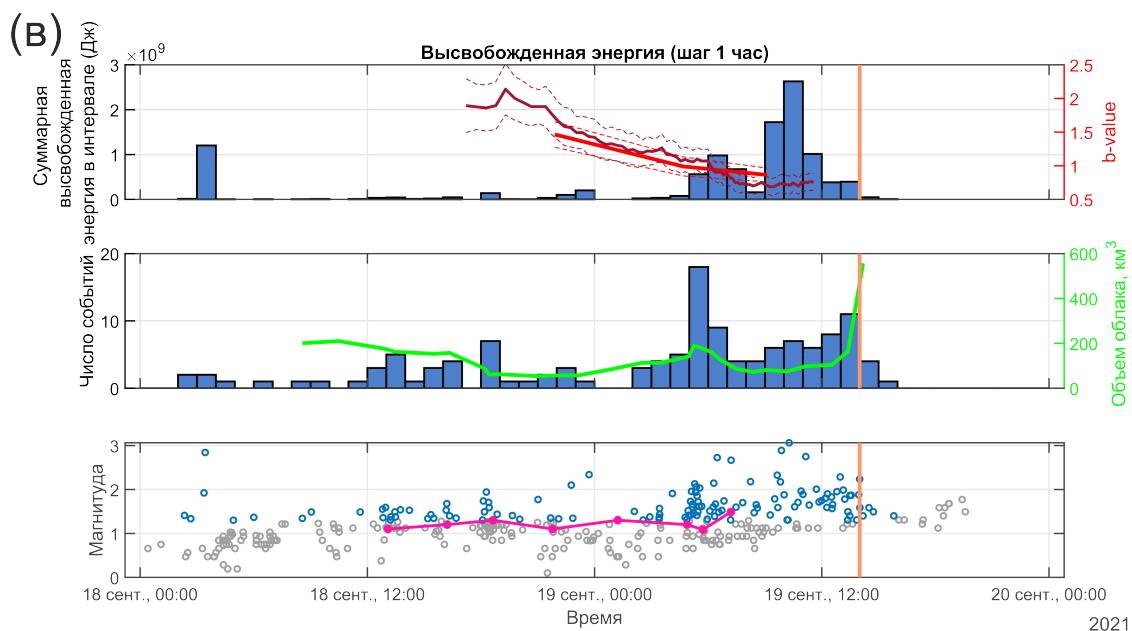


Рисунок 4 – временные профили для пяти отрицательно-асимметричных роев: (а) – второй рой вулкана Редаут, (б) – длинный рой вулкана Августина, (в) – четвертый рой вулкана Кумбре-Вьеха, (г) – рой вулкана Иерро, (д) – рой вулкана Баурдарбунга. Для каждого роя приведено три панели: верхняя показывает энергетический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



Продолжение рисунка 4

Для формулирования физической интерпретации результатов было проведено сопоставление с акустическими откликами в лабораторных экспериментах. Обратим особое внимание на эксперимент с нагружением с обратной связью по активности акустической эмиссии (АЭ) (Рис. 5(а)), который призван моделировать растянутый во времени процесс формирования макроразрыва [Смирнов, Пономарев, 2020].

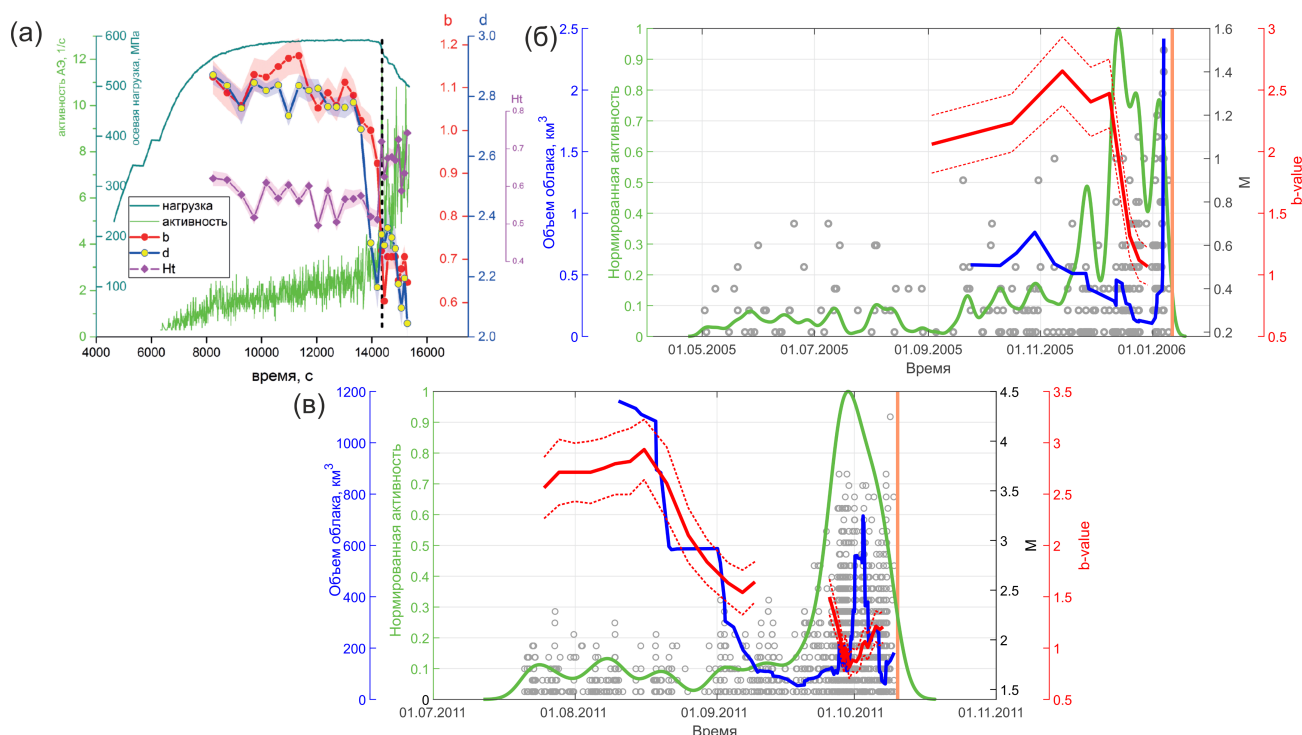


Рисунок 5 – (а) – акустический отклик в эксперименте с нагружением с обратной связью по активности АЭ из книги [Смирнов, Пономарев, 2020], зеленая линия – активность АЭ, голубая линия – осевая нагрузка, красная линия – наклон графика повторяемости, синяя линия – фрактальная размерность гипоцентров, фиолетовая линия – показатель Херста, вертикальная пунктирная линия – начало формирования разломной зоны. (б) – сейсмичность предэруптивного периода извержения вулкана Августина 2006 года. (в) – сейсмичность предэруптивного периода извержения вулкана Иерро 2011 года. Зеленая линия – нормированная огибающая активности, серые кружки – события выше порога представительности, красная линия – временные вариации наклона графика повторяемости, синяя линия – изменения объема облака землетрясений во времени, оранжевая линия – момент начала извержения

Можно выделить 5 основных закономерностей такого отклика:

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 Херста в момент кульминации (это означает увеличение степени временной кластеризации).
5. На «плоской» части кривой нагружения, то есть на стадии активизации, 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)».

На рисунке 4 видно, что первая, вторая и пятая закономерности наблюдаются для всех пяти отрицательно-асимметричных роев. Тенденция сжатия облака землетрясений (центральные панели, зеленые линии) отчетливо прослеживается в 3 из 5 случаев (Редаут, Августина, Иерро), косвенно указывая на процесс нуклеации. Анализ статистики времен между последовательными событиями выявил значительное увеличение степени кластеризации в период кульминации также в 3 из 5 случаев, наиболее выраженное для Августина [Grekov et al., 2025; Греков, Шебалин, 2025].

Таким образом, полностью или частично воспроизводятся 4 из 5 закономерностей (кроме падения фрактальной размерности, анализ которой не проводился). Идея о существенном различии режимов сейсмичности на стадиях активизации и кульминации таких роев выдвигалась нами в [Grekov et al., 2025; Греков, Шебалин, 2025] на примере вулкана Августина.

На рисунках 5(б, в) представлены самые яркие примеры совпадения закономерностей. В случае вулкана Иерро предполагается, что сперва в течение 140 суток магма оставалась на границе мантии и коры [González et al., 2013], а затем произошел быстрый подъем магмы к поверхности за 20 суток. Можно предположить, что на первой стадии происходит накопление дефектов (стадия активизации с экстремально высоким b -value), а на второй начинается формирование макроразрыва, сопровождаемое падением b -value. Такая идея в общих чертах была предложена в [Konstantinou, 2022], однако автор не объясняет высокие значения параметра b на стадии активизации.

В таком случае фаза активизации соответствует медленному накоплению дефектов при недостаточном для интрузии давлении магмы. В условиях сниженного предела прочности пород к внедрению (например, из-за регионального растяжения) вероятность стагнации интрузии, а с ней и вероятности наблюдения экстремально высоких b -value и отрицательно-асимметричных роев, снижаются. Такими случаями среди рассмотренных, предположительно, являются интрузии вулканов Фаградалсфьядль и Миякедзима.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В **заключении** приводятся результаты обосновывающие положения, выносимые на защиту.

Первое защищаемое положение основано на анализе временных профилей вулканических роев. На рисунке 3(а) видно, что большинство рассмотренных вулканических роев либо симметричны, либо положительно-асимметричны. На их фоне можно выделить группу из 5 обособленных роев, обладающих наибольшей отрицательной асимметрией. На тех пяти вулканах, где наблюдался такой тип роя, его кульминация предвещала начало извержения.

Второе защищаемое положение основано на анализе временных вариаций наклона графика повторяемости в вулканических роях. Показано, что для каждого из 5 таких роев характерно экстремально высокое (более 1.9) значение наклона графика повторяемости на стадии активизации и снижение значения в период кульминации. Максимальные значения временных вариаций таких роев лежат в диапазоне от 2.02 до 3.40, среди прочих 27 роев только в двух достигается значение 2.10.

Третье защищаемое положение основано на анализе тектонических условий, в которых происходили рассмотренные вулканические рои. Видно, что для роев в периоды интрузий вулканов Миякедзима и Фаградалсфьядль не характерна значительная отрицательная асимметрия; в обоих случаях отсутствует и паттерн временной эволюции *b-value*, описанный во втором положении, а экстремально высокие значения *b* встречаются значительно реже. Оба случая связаны с тектоническим рифтовым растяжением – задуговым спредингом [Passarelli et al., 2015] и рифтингом Исландии соответственно. Однако обнаружено и исключение – интрузия вулкана Баурдарбунга, происходившая в условиях рифтинга Исландии, но проявившая паттерны первого и второго положений.

Таким образом, обозначенные в первом и втором положениях паттерны наблюдаются в конце предэруптивной фазы на всех 4 вулканах вне зон тектонического рифтового растяжения и лишь на одном из 3 вулканов, находящихся в таких зонах; в совокупности по трем последним лишь 1 рой из 23 демонстрирует описанные закономерности.

Перспективными **направлениями дальнейших исследований** являются расширение выборки роев и переход от качественного к количественному описанию закономерностей, в частности установление зависимости максимальных значений *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 ее экстраполяция на интрузивные процессы позволит получать информацию об их характеристиках.

Сопоставление с закономерностями других переходных режимов [Смирнов, Пономарев, 2020] также открывает возможность разработки более строгой физической модели инициации вулканических роев различной формы.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 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).
- 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).
- 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 ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1) Смирнов В.Б. Прогностические аномалии сейсмического режима. I. Методические основы подготовки исходных данных // Геофизические исследования. – 2009. – Т. 10, № 2. – С.7–22
- 2) Смирнов В.Б., Пономарев А.В. Физика переходных режимов сейсмичности. М.: РАН. – 2020. – 412 с. – ISBN 978-5-907036-90-1
- 3) Bender B. Maximum likelihood estimation of b values for magnitude grouped data // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1983. – Vol. 73, № 3. – pp. 831–851. – DOI: 10.1785/bssa0730030831.
- 4) 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., Peréz 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>
- 5) 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>

6) *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](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117685).

7) *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>

8) *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). – pp. 4361–4377. – DOI: <https://doi.org/10.1002/jgrb.50289>

9) *Gutenberg B., Richter C.* Frequency of earthquakes in California // *Nature*. – 1944. – Vol. 156 – pp. 371–371.

10) *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. – pp. 59–75. – DOI: <https://doi.org/10.3133/pp17693>

11) *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](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107572).

12) *Martí J., Pínel V., López 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. – pp. 823–839. – DOI: [10.1002/jgrb.50087](https://doi.org/10.1002/jgrb.50087).

13) *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](https://doi.org/10.4401/ag-9156).

14) *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. – pp. 4130–4145. – DOI: [10.1002/2014JB011504](https://doi.org/10.1002/2014JB011504).

15) *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. – pp. 127–141. – ISSN 0377-0273. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.10.021>

16) *Roland E., McGuire Jeffrey J.* Earthquake swarms on transform faults // *Geophys. J. International*. – 2009. – V. 178. – pp. 1677–1690.

17) *Sigmundsson F., Hooper A., Hreinsdottir S., Vogfjörð K., Ofeigsson B., Heimisson E., Dumont S., Parks M., Spaans K., Gudmundsson G., Drouin V.,*

Árnadóttir T., Jonsdóttir K., Gudmundsson M., Högnadóttir T., Fridriksdóttir 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. – pp. 191–195.

18) *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. – pp. 684-698. – DOI: 10.1785/0120040007.

19) *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. – pp. 231–242. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00445-004-0406-2>