

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук Грекова Евгения Михайловича на тему:
«Закономерности режима вулканической сейсмичности в периоды
магматических интрузий»
по специальности 1.6.9. Геофизика

Диссертационная работа Е.М. Грекова посвящена изучению закономерностей режима вулканической сейсмичности в периоды магматических интрузий. Основная идея работы состоит в том, чтобы использовать события вулканической сейсмичности как инструмент для изучения фундаментального процесса разрушения пород и инициации извержений. Магматическая интрузия рассматривается автором как природный аналог лабораторного эксперимента по воздействию на образец горной породы, где в роли нагрузки выступает давление, создаваемое в магматической системе, а в роли акустического отклика — рои сейсмических событий. Такой подход представляется оригинальным и продуктивным, поскольку он позволяет перенести закономерности, установленные в лабораторных условиях, на натурные геофизические наблюдения.

Актуальность избранной темы не вызывает сомнений. Вулканические рои являются одним из ключевых индикаторов готовящегося извержения, однако их диагностика до сих пор остается сложной и неоднозначной задачей. Существующие классификации роев носят во многом качественный характер, а природа экстремально высоких значений наклона графика повторяемости (b -value) в вулканической сейсмичности остается предметом активной научной дискуссии. В этом контексте работа Е.М. Грекова, в которой предпринята попытка количественного описания формы временных профилей роев и установления их связи с поведением b -value, является своевременной и востребованной.

Научная новизна работы заключается в следующем.

Первое. Впервые предложена и обоснована классификация вулканических роев, основанная на совместном анализе коэффициентов асимметрии высвобождения сейсмического момента и временного профиля активности. Использование двух коэффициентов одновременно, а не по отдельности, позволило выделить особый тип роев, обладающих наибольшей отрицательной асимметрией по обоим критериям, то есть таких, у которых длительная фаза активизации с постепенным ростом активности и максимальных магнитуд сменяется кульминацией в самом конце последовательности. Именно согласованное поведение обоих коэффициентов, а не значение каждого из них в отдельности, лежит в основе предложенной классификации.

Второе. Впервые установлена закономерная связь между формой временного профиля роя и временной эволюцией наклона графика повторяемости. Показано, что именно для выделенного типа отрицательно-асимметричных роев характерен спад b -value от экстремально высоких значений (более 1.9) в начале роя до повышенных или нормальных (от 0.8 до 1.7) к моменту кульминации, причём независимо от длительности роя — от нескольких суток (Редаут, Кумбре-Вьеха) до нескольких месяцев (Августин, Эль-Йерро). Тем самым впервые показано, что экстремально высокие значения параметра не распределены по роям случайно, а приурочены к конкретной стадии — фазе активизации роев определённой формы.

Третье. Впервые для ряда вулканических роев рассчитаны временные вариации наклона графика повторяемости (два роя перед извержением вулкана Редаут 2009 года, рой перед извержением вулкана Фаградальсфьядль 2021 года, 21 рой в период интрузии вулкана Миякедзима). Для длинного роя перед извержением вулкана Августин 2006 года известные результаты пересчитаны более современными методами, что частично изменило картину

и возможную интерпретацию: значения b-value в фазе активизации оказались существенно выше, чем в оригинальной работе, что позволило связать их с предложенной классификацией.

Четвёртое. Впервые с применением унифицированной по четырём ключевым аспектам методики (оценка b-value методом Бендера, оценка представительной магнитуды методом LLS, оценка погрешности бутстрэпом, выбор порога представительности в скользящем окне) построены вариации наклона графика повторяемости во времени для большого числа роев, приуроченных к семи разным вулканам из четырёх зон с различной природой вулканизма и геодинамическими обстановками. Это обеспечило методологическую однородность и сопоставимость результатов между вулканами, что ранее не достигалось.

Пятое. На основе унифицированного анализа показано, что выделенный тип роев присутствует только на одном вулкане из трёх, находящихся в зонах тектонического рифтового растяжения, и на каждом из четырёх вулканов, не находящихся в таких условиях. Это позволило впервые сформулировать и обосновать гипотезу о том, что наблюдаемый сейсмический отклик связан с условиями стагнации интрузии перед барьером, а в зонах растяжения, где эффективный предел прочности пород снижен, вероятность реализации такого сценария существенно меньше.

Степень обоснованности положений, выносимых на защиту, научных выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность обеспечиваются комплексным применением современных методик анализа сейсмических данных, верификацией результатов независимыми методами и согласуемостью с результатами других исследований. Исследование основано на анализе большой выборки из 32 вулканических роев, наблюдавшихся на семи разных вулканах из четырех вулканических зон, что обеспечивает репрезентативность исследовательского

материала. Автор самостоятельно реализовал алгоритмы оценки представительной магнитуды и наклона графика повторяемости, провел все вычисления и построил все графики, что подтверждает его личный вклад в полученные результаты.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии представлений о механизме инициации вулканических роев, в демонстрации подобия сейсмических откликов в натурных условиях при магматических интрузиях акустическим откликам, моделируемым в лабораторных экспериментах с различными сценариями нагружения, что позволяет рассматривать выявленные закономерности как проявление единых физических механизмов, действующих в широком диапазоне пространственно-временных масштабов.

Отдельно следует отметить вклад работы в разграничение конкурирующих интерпретаций наклона графика повторяемости. В литературе высокие значения b -value объясняются по меньшей мере четырьмя различными механизмами: стадией распределённого микротрещинообразования (много слабых событий, отсутствие условий для накопления и сброса больших напряжений), повышенной гетерогенностью среды (трещины быстро останавливаются на неоднородностях, не успевая вырасти в крупные), ростом порового давления (облегчающим раскрытие и скольжение по трещинам), а также логнормальным распределением толщин даек (преобладание мелких даек над крупными). Эти интерпретации предсказывают разное поведение параметра во времени, и разделить их по одним лишь абсолютным значениям b -value зачастую невозможно. Работа Е.М. Грекова показывает, что анализ временной эволюции b -value в связке с формой временного профиля роя позволяет существенно сузить круг возможных объяснений: закономерное падение параметра от экстремально высоких значений в фазе активизации к нормальным или повышенным в момент кульминации, сопровождающееся сжатием облака событий и ростом

временной кластеризации, согласуется именно с моделью эволюции процесса разрушения — перехода от распределённого трещинообразования к локализации, — тогда как статические характеристики среды (гетерогенность, распределение толщин даек) сами по себе не могли бы обеспечить столь согласованное изменение всех параметров режима в ходе одного и того же роя. Тем самым работа не только подтверждает одну из гипотез, но и демонстрирует методологический подход, позволяющий различать физические механизмы, стоящие за вариациями b -value.

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.

Следует отметить, что выборка вулканов, рассмотренная в диссертации, включает ряд объектов, с которыми мне довелось работать лично: Кумбре-Вьеха, Редаут, Августин и Эль-Йерро. По всем этим вулканам мной были построены томографические модели и проанализировано пространственное распределение сейсмичности, что позволяет мне судить о качестве исходных данных и корректности их интерпретации в рецензируемой работе, а также формулировать замечания, основанные не только на тексте диссертации, но и на собственном опыте обработки данных по этим объектам.

При общей высокой оценке работы, по тексту диссертации можно сделать следующие замечания.

Первое замечание касается вопроса о влиянии типа магнитуды на получаемые оценки b -value и, шире, на сопоставимость результатов между разными вулканами. В работе используются данные нескольких разных сетей

и каталогов: для Редаута и Августина — каталог вулканической обсерватории Аляски (AVO), для Кумбре-Вьехи и Эль-Йерро — каталог Национального географического института Испании (IGN), для Баурдарбунги и Фаградалсфьядля — каталог сети SIL, для Миякедзимы — каталог Японского метеорологического агентства (JMA). Автор сам отмечает (раздел 3.6.1), что в каталоге JMA для событий интрузии Миякедзимы в первом столбце приведены магнитуды типа MV/M_v , а для некоторых сильнейших событий — MD/M_d и MJ , и что вопрос о сводимости этих шкал остаётся открытым. Для каталога SIL (раздел 3.5.1) автору пришлось восстанавливать тип магнитуды по публикациям, поскольку официальной документации найти не удалось, и он использует магнитуду MLW , полученную по формулам пересчёта из работы [Panzera et al., 2015]. Очевидно, что разные типы магнитуд (локальная, моментная, displacement, velocity) по-разному оценивают силу события и имеют разные систематические смещения, особенно для слабых вулканических событий с магнитудами ниже 2, которые составляют основную часть анализируемых роев. Эти смещения могут достигать 0.3–0.5 единицы магнитуды, что при представительном диапазоне порядка одной единицы составляет существенную долю и может напрямую влиять на оценку b -value. При этом в главе 2 декларируется унифицированная методика оценки b -value (метод Бендера, оценка M_c методом LLS, бутстрэп для погрешности), однако вопрос о том, насколько сами входные магнитуды сопоставимы между вулканами, не обсуждается. Это важно, поскольку центральный результат работы — выделение роев с экстремально высокими b -value (до 3.40) — опирается на сравнение абсолютных значений параметра между разными вулканами, и систематические различия в шкалах магнитуд могут частично объяснять наблюдаемый разброс. Хотелось бы, чтобы автор прокомментировал, как он оценивает возможный вклад этого фактора и насколько устойчивы его выводы к переходу на единую шкалу магнитуд.

Второе замечание связано с критериями разделения сейсмичности на отдельные рои в случаях сложных, наложенных друг на друга или квазинепрерывных эпизодов активности. В работе для выделения роев используется порог по числу событий в скользящем временном окне (например, 15 событий в 4 часа для Кумбре-Вьехи, 10 событий в 4 часа для второй фазы того же вулкана, 25 событий в 4 часа для третьего интервала Миякедзимы), причём, как прямо указано в разделе 3.3.1, этот порог выбирался вручную. Такой подход даёт формализуемые границы роев, что важно для корректного расчёта коэффициентов асимметрии, однако остаётся не до конца ясным, насколько устойчивы выделенные границы и связанные с ними параметры (длительность, N , N_s , коэффициенты асимметрии) к изменению порога. Для Баурдарбунги автор сам обосновывает рассмотрение периода как единого роя, и это обоснование выглядит убедительным — сегментированный характер роста дайки действительно не позволяет надёжно разделить отклики на прохождение отдельных сегментов. Однако в других случаях, например для Кумбре-Вьехи, где первые три роя разделены относительно короткими паузами, а четвёртый отделён более длительным затишьем, критерий разделения мог бы быть проверен на устойчивость. Хотелось бы видеть в работе хотя бы краткий анализ чувствительности результатов к выбору порога разделения, поскольку это напрямую влияет на значения коэффициентов асимметрии, которые лежат в основе предложенной классификации.

Третье замечание касается влияния глубины гипоцентров и связанного с ней порога регистрации на оценки b -value. Как известно, порог представительной магнитуды систематически растёт с глубиной: событие с магнитудой 0.5 на глубине 10 км может быть не зарегистрировано, тогда как то же событие на глубине 2 км будет уверенно выделено. В работе рассматривается ряд случаев, где сейсмичность мигрирует по глубине в ходе интрузии. Наиболее показателен пример Кумбре-Вьехи (раздел 3.3), где

первые три роя происходят на глубинах около 9.5, 9.0 и 7.6 км, а четвёртый — на глубине около 4.0 км, и именно в четвёртом рое наблюдается падение b -value от 2.14 до 0.70. Аналогичная картина на Эль-Йерро (раздел 3.4), где сейсмичность мигрирует с глубин 10–15 км к приповерхностным очагам, а b -value падает от 2.93 до 0.82. Автор использует оценку M_c в скользящем окне (не менее 150 событий) методом LLS, что частично отслеживает изменения порога во времени, и для ряда случаев (например, для Эль-Йерро на рисунке 6) приводит вариации M_c . Тем не менее в работе не обсуждается явно вопрос о том, как разделяются физические изменения режима разрушения и инструментальные эффекты, связанные с подъёмом гипоцентров и улучшением условий регистрации. Для случая Эль-Йерро, где, по данным [González et al., 2013], магма сначала накапливается на границе мантии и коры, а затем быстро поднимается к поверхности, этот вопрос особенно актуален. Было бы полезно, если бы автор показал, что наблюдаемый спад b -value не является артефактом изменения порога регистрации, связанного с миграцией кластера вверх, — например, продемонстрировав устойчивость результата при фиксированном пороге или при раздельном анализе по глубинным интервалам.

Четвёртое замечание относится к методике оценки b -value при узком диапазоне представительных магнитуд и к связанной с этим проблеме достоверности экстремально высоких значений. Как следует из обзора (раздел 1.3), в литературе существует требование к ширине диапазона магнитуд, используемого для оценки b -value: в частности, [Konstantinou, 2022] обосновывает необходимость диапазона не менее двух единиц магнитуды и ставит под сомнение значения $b > 1.20$. Тем не менее в рецензируемой работе для ряда роев представительный диапазон магнитуд может быть существенно уже двух единиц. Например, для второго роя Редаута (таблица 1 раздела 3.1) при $M_c = 0.6$ и $M_{\max} = 2$ диапазон составляет 1.4 единицы; для четвёртого роя Кумбре-Вьехи (таблица 3 раздела 3.3) при $M_c = 1.3$ и $M_{\max} = 3.06$ — около 1.7

единицы; для роя Баурдарбунги (таблица 2 раздела 3.5) при $M_c = 2.4$ и $M_{\max} = 4.6$ — около 2.2 единицы. При этом окна оценки b-value составляют от 50 до 150 событий, а оценка погрешности проводится бутстрэпом по 200 итерациям, что для таких объемов выборки может давать оптимистичные оценки точности. Кроме того, при выборках в 50–150 событий и представительном диапазоне порядка одной единицы магнитуды оценка b-value становится крайне чувствительной к отдельным событиям в хвосте распределения: добавление или удаление одного события с магнитудой, выбивающейся из общего распределения, может заметно изменить наклон аппроксимирующей прямой. Автор использует метод максимального правдоподобия, оценку погрешности бутстрэпом и визуальный контроль графиков повторяемости, что частично снимает эту проблему, однако для ряда роев (например, Миякедзима) представительный диапазон узок, а число событий в хвосте распределения измеряется единицами. Автор справедливо отмечает (раздел 3.1.2), что для второго роя Редаута значение 2.32 ± 0.21 получено по 352 представительным событиям с широким диапазоном магнитуд, и что оснований сомневаться в его истинности нет. Однако для других роев с меньшим числом представительных событий и более узким диапазоном магнитуд этот аргумент работает слабее. Хотелось бы, чтобы автор явно прокомментировал, как соотносятся получаемые им оценки с ограничением на ширину диапазона магнитуд, как он разделяет физические вариации параметра и флуктуации, связанные с малой выборкой, и насколько устойчивы выводы о вариациях b-value к изменению ширины представительного диапазона и порога представительности.

Пятое замечание носит характер пожелания и касается переносимости выявленных закономерностей на другие вулканы и другие геодинамические обстановки. В работе показано, что выделенный тип отрицательно-асимметричных роев присутствует на пяти из семи рассмотренных вулканов, и что он не характерен для интрузий в условиях тектонического рифтового

растяжения (Фаградалсфьядль, Миякедзима), за исключением Баурдарбунги, которую автор объясняет поступлением новой порции магмы от мантийного плюма. Это интересный и важный результат, однако выборка вулканов остаётся ограниченной: три вулкана приурочены к зонам субдукции (Редаут и Августин на Аляске, Миякедзима в Японии), два — к «горячим точкам» в пределах Канарского архипелага (Кумбре-Вьеха и Эль-Йерро), и ещё два — к Исландии, где плюмовый магматизм наложен на условия рифтового растяжения (Баурдарбунга и Фаградалсфьядль). За пределами рассмотрения остаются, например, интрузии в условиях континентального рифтинга (Эфиопия, Восточно-Африканская рифтовая система), для которых, как отмечает сам автор, есть косвенные свидетельства в пользу его гипотезы [Belachew et al., 2011, 2013], но данные не были доступны. По данным этих работ, средние значения b в роях Эфиопии не превышают 1.69, что косвенно согласуется с гипотезой автора о том, что в условиях рифтового растяжения экстремально высокие значения не наблюдаются. Было бы полезно, если бы автор в заключительной главе более развёрнуто обсудил, какие именно ограничения накладывает текущая выборка на обобщение результатов и какие конкретные наблюдения (например, данные по Эфиопии или по другим вулканам с известными интрузиями) могли бы подтвердить или опровергнуть предложенную гипотезу. Это позволило бы читателю лучше понять границы применимости предложенной классификации и физической интерпретации.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Работа выполнена на высоком методическом уровне, а её результаты представляют интерес не только для вулканологии, но и для физики землетрясений в целом. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.6.9. Геофизика (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о

присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Греков Евгений Михайлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.9. Геофизика.

Официальный оппонент:

доктор геолого-минералогических наук, профессор, член-корреспондент РАН, профессор Центра науки и технологий добычи углеводородов Автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования «Сколковский институт науки и технологий»

КУЛАКОВ Иван Юрьевич



(подпись)

15.09.2026 г.

Контактные данные:

тел.:



Специальности, по которым официальным оппонентом защищена диссертация: 25.00.03. Геотектоника и геодинамика; 25.00.10. Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Адрес места работы: 121205, г. Москва, территория инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, д. 30, стр. 1

Тел.: +7 495 280-14-81; E-mail: inbox@skoltech.ru

Подпись сотрудника Автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования «Сколковский институт науки и технологий»

Кулакова Ивана Юрьевича удостоверяю:

менеджер
по персоналу
Виктор Е.

