#### ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙУНИВЕРСИТЕТ имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ФИЗИКИ ЗЕМЛИ

#### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

### «ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА ВУЛКАНИЧЕСКОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ НА КАМЧАТКЕ»

Выполнил студент 429 группы Греков Е. М. Эрмев подпись студента

1

Научный руководитель: Заведующий кафедрой физики Земли, д.ф-м.н., Смирнов Виадимир Борисович подпись ихиногоруководителя

Допущена к защите Зав.кафедрой едрои\_\_\_\_\_ подпись зав.кафед 29.05.20

Москва 2020

ВВЕДЕНИЕ
Глава 1. Обзор литературы5
1.1 ЛНТ и тектоническая сейсмичность5
1.2 Лабораторные исследования7
1.3 Вулканическая сейсмичность
1.4 Строение вулкана Ключевская сопка9
Глава 2. Исходные данные и используемые методики 12
2.1 Исходные данные12
2.1 Описание используемых программ13
Глава 3. Анализ данных16
3.1 Анализ представительности данных16
3.2 Оценка наклона графика повторяемости
Глава 4. Результаты и их обсуждение25
4.1 Сравнение с лабораторным исследованием
4.2 Сравнение с исследованием вулкана Августина и других вулканов 34
ИТОГИ И ВЫВОДЫ
ЗАКЛЮЧЕНИЕ
Благодарности41
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ
ПРИЛОЖЕНИЕ

### ОГЛАВЛЕНИЕ

#### ВВЕДЕНИЕ

Одним из ключевых законов сейсмологии является закон Гутенберга-Рихтера [Gutenberg, Richter, 1944], который описывает зависимость логарифма числа событий с определённой магнитудой в некотором регионе 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, либо b-value. Этот параметр несёт смысл соотношения между числом событий с малыми и большими магнитудами. То есть, например, чем больше его значение, тем больше малых событий по сравнению с большими.

В данной работе исследуется значение наклона графика повторяемости, а также его изменения во времени для вулканической сейсмичности на основе каталога событий для Ключевской сопки с 1963 года по 2019. Известно, что возможно использовать параметр *b-value* для оценки сейсмической опасности и прогноза сильных землетрясений в сейсмоактивных регионах. Известно также, что величина параметра *b*-value зависит от тектонического напряжения изменений температуры, порового давления в среде, И степени неоднородности среды и, соответственно может нести в себе информацию об этих величинах. Поэтому подобные исследования актуальны с точки зрения изучения природы сейсмичности, а также процессов, происходящих в недрах.

Исследование сейсмических параметров уже неоднократно проводились для различных тектонических режимов, одно из них, например, [Попандопуло, 2018], основным результатом этих исследований является факт изменения *b*value перед крупными событиями. Это явление, возможно, объясняется фрактальной природой образования трещин в коре, их слиянием и ростом, а также изменениями напряжений в области подготовки очага землетрясения. Также проводились исследования параметров сейсмического режима для так называемых «сейсмических роёв» [Потанина, Смирнов, Бернар, 2011], предполагаемой причиной которых является диффузия флюида в породы, для которых также была выявлена аномалия *b-value*. Аналогичные «рои» присутствуют и в вулканической сейсмичности.

Вулканическая сейсмичность имеет довольно значительные отличия от тектонической, заключающиеся в иной природе сейсмичности: здесь вместо механизма накопления и сброса напряжений имеет место разрушение породы под давлением магмы, низкочастотные сейсмические волны, возникающие изза колебаний большого объёма магмы, а также события имеющие взрывной характер, когда раскалённые газы резко вырываются на поверхность. Целью данной работы является установление наличия или отсутствия аномалий значений наклона графика повторяемости во время или до извержения, а также выявления связи этих аномалии, при их наличии, с известными источниками вулканической сейсмичности.

Проведение анализа осложняется тем, что данному типу сейсмичности характерны большие значения активности, что значительно усложняет запись сейсмических событий, это, в свою очередь, приводит к падению качества каталога в периоды интенсивных извержений. Также стоит отметить, что, например, указанные выше аномалии *b-value* в тектонической сейсмичности могут иметь длину порядка нескольких лет, в то время, как в зонах вулканической активности извержения зачастую происходят с разницей во времени менее года, что также усложняет задачу. Для достижения цели работы необходимо сперва проанализировать каталог на однородность, оценить его качество, то есть то, насколько он отражает действительность, затем построить графики повторяемости для различных промежутков времени, содержащих достаточное количество событий для достоверной оценки значения наклона графика повторяемости, и наконец провести анализ результатов.

#### Глава 1. Обзор литературы

#### 1.1 ЛНТ и тектоническая сейсмичность

Для тектонической сейсмичности графика аномалии наклона повторяемости довольно хорошо изучены, например, известно [Касахара, 1985], что константа b в большинстве случаев принимает значения около 0.9, то есть отношение числа малых и крупных событий одинаково для событий любого масштаба, однако иногда наблюдаются сильные отклонения параметра b от стандартных величин (аномалии), эти отклонения могут предшествовать крупным землетрясениям, или наблюдаются во время сейсмических роёв. Аномалии параметра b, как предвестники крупных событий, подробно описаны в статье [Попандопуло, 2018]. В этой работе было проведено исследование временных вариаций *b-value* закона Гутенберга-Рихтера по данным сейсмологических наблюдений на Гармском полигоне, в результате которого было обнаружено несколько аномалий длительностью в несколько лет (Рис.1), которые выражались в



Рисунок 1. Примеры аномалий *b-value* из работы [Попандопуло, 2018]. Стрелочками указаны моменты времени, когда произошли крупные события (M≥4).

повышении значения наклона графика повторяемости относительно среднего по региону с последующим спадом, и было замечено, что на этом спаде

происходило крупное землетрясение. Причём была отмечена тенденция увеличения длительности аномалии в зависимости от силы готовящегося события. Там же, [Попандопуло, 2018], было приведено описание модели, объясняюшей возникновение данных аномалий. Предполагается, что постоянная нагрузка в зонах соприкосновения тектонических плит приводит к накоплению напряжений в этих зонах, что в свою очередь выражается в наличии постоянной деформации среды, и объясняет ЧТО фоновую сейсмичность, определяющей средний уровень сейсмичности в регионе. Затем при относительном движении плит некоторые большие блоки могут сцепиться значит, что действующих упругих напряжений друг с другом, ЭТО дальнейшего недостаточно ДЛЯ ИХ относительного движения («проскальзывания»), таким образом в этой зоне будет накапливаться деформация. дополнительная упругая Из-за заклинивания блоков относительное движение плит по большим разломам будет затруднено, что приведёт к тому, что они начнут трескаться и ломаться, то есть будет появляться много мелких разломов, а это приведёт к росту числа слабых событий относительно крупных, то есть к увеличению значения наклона графика повторяемости. Далее после накопления достаточной величины напряжения, превышающей предел прочности среды, начнётся разрушение по крупным разломам, что приведёт к увеличению числа относительно сильных землетрясений, то есть к спаду значений наклона графика повторяемости, при этом крупные блоки могут резко «соскочить», что и приведёт к, упомянутому выше, крупному землетрясению. Этот процесс называется лавиннонеустойчивым трещинообразованием (ЛНТ). Однако, было отмечено, что описанная выше аномалия *b-value* позволяет только выделить промежутки времени, в которые возрастает вероятность большого события, но, как следует из описанного выше механизма, оно может и не произойти, то есть это попрежнему случайное событие.

Сейсмические рои, описаны, например, в статье [Потанина, Смирнов, Бернар, 2011]. Рои землетрясений – это особый вид проявления сейсмической

активности, когда за достаточно короткое время, в течение нескольких суток от 1 до 5-15 суток (редко более длительное время), в одном и том же месте, на ограниченной площади, происходит большое количество землетрясений, как малых энергетических классов, характерных фоновой правило. для сейсмичности региона. В работе проводились исследования сейсмических роёв в коринфском рифте, в результате были обнаружены вариации наклона графика повторяемости: на стадии развития роевой активности OH уменьшался, а на стадии спада активности – увеличивался. Предполагается, что причиной подобной активности является диффузия флюида в среду, что приводит к уменьшению её прочности.

#### 1.2 Лабораторные исследования

Для исследования сейсмических параметров в лабораторных экспериментах обычно используются акустико-эмиссионные методы [Казначеев, Майбук, Пономарев, Смирнов, Бондаренко, 2017] – это методы контроля разрушения образца, которые позволяют диагностировать состояния материала, как при нагрузках, много меньших критической, так и вблизи критического предела. В лабораторных экспериментах исследуется характер разрушения в образце горных пород при различных условиях, что затем позволит сделать какие-то предположения относительно природной сейсмичности в схожих условиях. Например, исследуется разрушения в материалах при термическом воздействии – нагреве и охлаждении. Понимание процессов разрушения в горных породах при термическом и механическом воздействиях, имеет физики землетрясений (температурное поле в очаге), значение для вулканологии (движение горячей магмы по каналам), тектонофизики (реконструкция напряжений) и изучения метаморфизма (фазовые переходы).

Например, в работе [Потанина, Смирнов, Пономарев и др., 2015] описан эксперимент, в котором бетонный образец подвергался длительной одноосной нагрузке, а сверху из резервуара в образец поступала вода. Было замечено, что диффузия воды в образец сопровождалась развитием разрушения, приведшего

впоследствии к образованию макротрещины. Выявленные в этом эксперименте вариации статистических параметров разрушения сходны с вариациями, обнаруженными при исследовании естественных невулканических роёв, что подтверждает предположение о природе их возникновения – диффузия флюида в породе.

#### 1.3 Вулканическая сейсмичность

Известно, что вулканическая сейсмичность сильно отличается от тектонической из-за своей природы – движение магматических расплавов, под давлением которых возникают напряжения в среде, вырывающиеся через поры пепел и вулканические газы. В [Гордеев, 2007] указывается, что на активных вулканах присутствует множество сейсмических сигналов, отличающихся от сигналов тектонических землетрясений. В [Мinakami, 1960] разделить эти сигналы по характерным особенностям предлагается на несколько типов:

- А-тип. Высокочастотные тектонические сигналы с гипоцентрами, локализованными на глубине в несколько десятков километром под вулканом, связанные с разрушением среды под давлением магмы. Присутствуют Р- и S- волны.
- Б-тип. Сигналы с гипоцентрами, находящимися около поверхности, вблизи кратера. Представлены в основном поверхностными волнами. Отсутствуют вступления S- волн. Частотный состав 1-3 Гц.
- Взрывные. Сигналы, сопровождающие взрывы в кратере, отличаются высокой интенсивностью.
- Вулканическое дрожание. Возникает при непрерывном истечении газопепловых потоков или лавы, продолжающееся длительное время. Запись такого сигнала имеет форму длительных непрерывных сигналов. Присутствует непосредственно во время извержения.
- 5) Гибридные землетрясения. Низкочастотный сигнал, имеющий в начале записи высокочастотную компоненту.

Последние два типа имеют одинаковый спектральный состав, что указывает на то, что они имеют одинаковую природу.

Также Гордеев, 2007] В отмечается, ЧТО вулкано-тектонические землетрясения более всего похожи на обычные тектонические землетрясения, так как тоже являются результатом разрыва среды, просто не в результате длительного накопления напряжений средой, а в результате разогрева магмой и внедрения её расплавов в трещины и поры. Как раз этот тип землетрясений образует длительные вулканические рои, так как они сопровождают движение магмы, по их появлению, можно предсказать активизацию вулкана. Также для непосредственный извержения используется предсказания контроль передвижения магмы с помощью гибридных землетрясений: предполагается, собой что представляют вулкано-тектоническое землетрясение они (высокочастотная компонента) с последующими объёмными колебаниями магмы (низкочастотная компонента).

# 1.4 Строение вулкана Ключевская сопка

Для изучения внутреннего строения среды и контроля положения магмы может использоваться метод сейсмической томографии [Кулаков, 2018], то есть изучение внутреннего строения среды на основании данных о скоростях прохождения продольных и поперечных сейсмических волн через среду, источником этих волн в данном случае являются частые вулканотектонические землетрясения. Таким образом на глубине 25-30 км (толщина континентальной коры – 35-45 км) был обнаружен магматический очаг, питающий вулканы Ключевской группы, а также вертикальный канал, соединяющий этот очаг с Ключевской сопкой (Рис. 2).



Рисунок 2. Картинка взята из [Кулаков, 2018], чёрные точки – землетрясения, красные кружки – граниты, фиолетовые кружки – базальты, жёлтая область с чёрным контуром – магматический канал. Ключевская сопка обозначена буквами КЛЮ. Разным цветом отмечены аномалии сейсмических скоростей поперечных волн (красные – пониженные, синие – повышенные).

Аналогичные результаты были получены и в более ранних исследованиях [Хубуная, Гонтовая, Соболев, 2007], [Хубуная, Гонтовая, Москалева, 2008].



Рисунок 3. График взят из [Хубуная, Гонтовая, Соболев, 2007]. На нём представлен разрез Ключевской сопки в двух направлениях: ЮЗ и ЮВ. На сечениях приведены изолинии абсолютных значений скорости продольных волн и проекции гипоцентров землетрясений на эти сечения. Разным цветом отмечены аномалии сейсмических скоростей волн (светлые – пониженные, тёмные – повышенные).



Рисунок 4. График взят из [Хубуная, Гонтовая, Москалева, 2008]. На нём представлен вертикальный разрез Ключевской. На сечениях приведены изолинии абсолютных значений скорости поперечных волн и проекции гипоцентров землетрясений на эти сечения. Разным цветом отмечены аномалии сейсмических скоростей волн (светлые – пониженные, тёмные – повышенные).

# Глава 2. Исходные данные и используемые методики 2.1 Исходные данные

Данные об извержениях Ключевской сопки (Приложение, Таблица 1) предоставлены О.А.Гириной (к.г.-м.н., ведущий научный сотрудник Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН), они также могут быть найдены на сайте http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/volc?name=Klyuchevskoy.

Каталог данных по сейсмическим событиям Ключевской сопки предоставлен В.Б.Смирновым. Данные получены в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН <u>http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php</u>.

Каталог содержит следующую информацию о 80905-ти сейсмических событиях, произошедших в районе Ключевской сопки с 1963 года по 2019: дату и время землетрясений, географические координаты (диапазон значений в каталоге: по широте от 56.01° до 56.13°, по долготе от 160.54° до 160.76°) и глубину гипоцентров (диапазон значений в каталоге: от -5 км до 38.8 км от уровня моря, шкала глубины направлена к центру Земли), энергетический класс (диапазон значений в каталоге: от 2.2 до 9.3).

#### 2.1 Описание используемых программ

Качество чувствительности каталога зависит от И разрешающей способности сети [Смирнов, 2009]. Чувствительность характеризуется представительной магнитудой – магнитудой, выше которой регистрируются все события, то есть запись происходит без потерь. Разрешающая способность - это погрешность определения времени, координат гипоцентра и магнитуд событий, то есть характеристика того, насколько мало отличающиеся по этим параметрам события, сеть сможет различить. Эти величины неоднородны, как во времени из-за развития сетей, так и в пространстве, так как эти параметры различаются в центре и на краю сети. Поэтому анализ однородности каталога довольно актуален.

Для автоматического определения представительной магнитуды во времени использовалась программа «CompleteMag.exe», предоставленная В.Б.Смирновым. Она реализует методику, разработанную В.Ф.Писаренко [Писаренко, 1989; Садовский, Писаренко, 1991], и осуществляет оценку указанной величины в скользящем по времени окне. В ней программно осуществлён алгоритм (Рис. 5), представленный в [Смирнов, 2009].



Рисунок 5. Схема взята из работы [Смирнов, 2009]. На рисунке представлен алгоритм автоматической оценки представительной магнитуды.

Однако, из-за наличия участков времени с малым количеством событий, и нелинейностью графиков повторяемости вулканических землетрясений, в работе также использовался визуальный метод оценки представительной магнитуды, который будет подробно описан ниже.

Программа b\_value, предоставленная В.Б.Смирновым, написана в среде программирования MatLab<sup>1</sup>, по входным данным (каталог с указанием времени событий, координат гипоцентров, магнитуд; начало и конец исследуемого временного промежутка; представительная магнитуда для указанного временного промежутка; ширина окна по количеству событий; величина смещения окна на каждой итерации), используя метод максимального правдоподобия [Aki, 1965], вычисляет значения *b-value* в скользящем по времени окне.

Для визуализации всех зависимостей использовалась программа «Origin».

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Программа написана ассистентом кафедры физики Земли М.Г.Потаниной.

#### Глава 3. Анализ данных

#### 3.1 Анализ представительности данных

Как уже было сказано выше, сначала необходимо проанализировать каталог на предмет числа событий, достаточного для достоверного определения параметра b, а также исследовать величины представительных магнитуд.

В первую очередь события в каталоге были разделены по глубине на два очага, так как они, возможно, имеют различия в природе сейсмичности и, следовательно, в параметрах сейсмического режима, то есть это было сделано с целью отделить пространственные вариации наклона графика повторяемости от временных. Ниже представлен разрез Ключевской сопки вдоль меридиана (Рис. 6).



Рисунок 6. Разрез Ключевской сопки вдоль меридиана 160.6° с нанесёнными событиями из каталога.

После этого была построена зависимость времени событий OT ИХ идентификационного чтобы убедиться в номера, отсутствии потерь фрагментов отсутствии дублей фрагментов каталога, каталога, либо нарушении их временной последовательности (Рис.7). Предполагается, что если в каталоге некий фрагмент при копировании, например, случайно попал не на своё место, то на этих графиках будет «провал», в ином случае, график должен быть неубывающий.



Рисунок 7. Зависимости времени событий от их номера для очагов малой и большой глубин.

Затем были построены графики распределения всех известных событий для этих двух очагов во времени (Рис. 8). Также на этих графиках были выделены временные промежутки, соответствующие извержениям.



Рисунок 8. Распределения всех событий и извержений во времени, слева – для малой глубины, справа – для большой. По оси ординат отложен энергетический класс, серые точки – события, красная линия – активность, синие участки – извержения.

Известно, что распределение числа сейсмических событий по магнитудам подчиняется закону Гутенберга-Рихтера, однако на практике наблюдается отклонение графика повторяемости от линейного (Рис. 9), как уже было сказано выше, это объясняется несовершенством сейсмических сетей.



Рисунок 9. Примеры «качественных» графиков повторяемости (треугольные точки) и кумулятивных графиков повторяемости (кружки), взяты из статьи [Попандопуло, 2018]. *Мс* – представительная магнитуда, *b* – наклон графика повторяемости, *r* – коэффициент корреляции экспериментальной кривой с прямой, соответствующей закону Гутенберга-Рихтера.

Чем меньше магнитуда события, тем меньше станций смогут его зарегистрировать, поэтому число зарегистрированных событий падает с уменьшением магнитуды, из-за этого наблюдается изгиб графика повторяемости на определённой магнитуде. От этого же зависит однородность каталога, то есть то на сколько меняется качество записи во времени или пространстве.

Поэтому далее были построены графики повторяемости для относительно больших промежутков времени, чтобы оценить общее качество каталога.

Однако, при построении графиков повторяемости по данным Ключевской сопки за разные промежутки времени наблюдались нехарактерные графики с двумя пиками (Рис. 10).







б)

Рисунок 10. На рисунке (а) представлены три графика повторяемости: зелёный соответствует временному промежутку, содержащему зелёные события на графике (б), красный – красные события, чёрный зелёные и красные вместе. Чёрный график повторяемости имеет два пика, так как является суммой двух других графиков с сильно различающимися представительными магнитудами.

Похожие графики были получены в работе [Галина, 2019] при исследовании длиннопериодных сигналов вулканической сейсмичности, в ней также наблюдались отклонения частотно-магнитудного распределения от закона Гутенберга-Рихтера (Рис. 11), там предполагалось, что это может иметь физическую природу и является особенностью вулканической сейсмичности.



Рисунок 11. Графики взяты из работы [Галина, 2019]. "а" – аппроксимация двумя прямыми линиями с разными наклонами; "б" – аппроксимация прямой линией (Закон Гутенберга-Рихтера).

В этой же работе причина возникновения подобных графиков повторяемости скорее заключается в сильной неоднородности каталога, которая обусловлена пропусками данных, возникающими из-за того, что во время извержений сейсмических событий становится слишком много и они происходят слишком часто друг за другом (более одного события в несколько минут), поэтому сейсмическая сеть перестаёт их фиксировать. Это приводит к сильному возрастанию значения представительной магнитуды (Рис. 12).



Рисунок 12. Пример графика изменения представительной магнитуды (бирюзовая линия) во времени. Серые точки – события, синяя область – извержение.

Есть и такие извержения, где запись событий исчезает практически полностью после начала извержения (Рис. 13). Причины подобных пробелов пока неизвестны, это может быть связано, как и с «забиванием» сейсмической сети, так и с реальным физическим исчезновением сейсмичности, которая может быть связана, например, с сильным разогревом большого объёма пород.



Рисунок 13. Примеры пробелов в данных.

Анализ каталога выявил его сильную неоднородность, которая заключается в сильных колебаниях представительного класса с течением времени, его резком увеличении во время извержений, а также в малом количестве событий или полном их отсутствии на некоторых промежутках времени.

#### 3.2 Оценка наклона графика повторяемости

Далее производилась оценка наклона графика повторяемости ДЛЯ избранных извержений. Временной промежуток для оценки выбирался таким образом, чтобы он охватывал не только само извержение, но и промежуток длиной, примерно, полгода пред ним, чтобы была возможность наблюдать относительные изменения *b-value*. Сперва планировалось использовать специальную программу, предоставленную В.Б.Смирновым (профессор кафедры Физики Земли, д.ф.-м.н.), написанную в среде Matlab, описанную выше. Однако, из-за сильной неоднородности каталога эта программа не всегда пригодна для использования, так как она принимает только одно значение представительной магнитуды для всего временного промежутка, поэтому для оценки *b-value* были вручную также построены графики повторяемости для подходящих временных промежутков, при выборе этих промежутков приходилось обращать внимание на два фактора: количество событий и их однородность (то есть одинаковая представительная магнитуда), желательно найти баланс между этими характеристиками. Также вместе с ними были построены кумулятивные графики повторяемости для удобства оценки представительной магнитуды. Затем выбирался наиболее линейный участок графика, ограниченный сверху и снизу по магнитуде, и с помощью линейной регрессии в программе Origin производилась оценка параметра b (Рис. 14).



Рисунок 14. «Ручное» оценивание наклона графика повторяемости.

Также после этого для уточнения результата было принято решение дополнительно произвести оценку в программе, написанной в среде *Matlab*, но в одном окне (то есть ширина окна и сдвиг выставлялись равными полному числу событий во временном промежутке) с использованием, оценённых ранее в *Origin* представительных магнитуд.

24

# Глава 4. Результаты и их обсуждение

#### 4.1 Графики повторяемости и оценки b-value

В результате анализа данных каталогов вулканических землетрясений Ключевского вулкана были получены значения *b-value* двумя способами для нескольких извержений, пригодных для этого (достаточное количество событий, то есть пиковая активность около 0.1 суток<sup>-1</sup>, относительная однородность данных) (Рис. 15).



(1a), 1



(16), 1



(2a), 2



(26), 2





















(5a), 8

(56), 8



(6a), 13





(7a), 1

(7б), 1



(8a), 6









![](_page_27_Figure_6.jpeg)

![](_page_27_Figure_7.jpeg)

Графики повторяемости для извержения 2017-2018, большая глубина

![](_page_27_Figure_9.jpeg)

(10a), 11

#### (106), 11

![](_page_28_Figure_2.jpeg)

(11a), 12

(116), 12

![](_page_28_Figure_5.jpeg)

(12a), 14

(126), 14

Рисунок 15. Слева представлены графики изменения b-value, оценённого двумя способами, описанными выше, с соответствующими графиками повторяемости (справа). Графики повторяемости построены по временным промежуткам, выделенным вертикальными зелёными линиями на левых графиках. Под каждым графиков сперва указан его номер в рамках рисунка

15, а затем индекс извержения, соответствующий индексу в таблице 1 (приложение)

На рисунке 15 видно, что закономерной разницы в поведении графиков повторяемости на малых и больших глубинах нет. Также на большинстве графиков повторяемости (Рис. 15.1(б), 15.4(б) – 15.9(б), 15.11(б)) не наблюдается значительных отличий на промежутках времени до, во время и после извержений, кроме роста активности во время извержений. Для некоторых извержений (Рис. 15.2(б), 15.3(б), 15.10(б), 15.12(б)) присутствует увеличение наклона графика повторяемости во время извержения.

Для извержения 2005 года (Рис. 15.2(б)) это может объясняться малой активностью на временном промежутке перед извержением. Однако, следует отметить, что в подробном отчёте вулканологов об этом извержении [Гирина, Маневич, Мали, 2007] отмечается факт резкого исчезновения сейсмичности на глубине 30 км в начале извержения, в этот же момент времени над вулканом стала отмечаться термальная аномалия. Это исчезновение хорошо видно на графике (Рис. 16), построенном в этой работе, и также косвенно подтверждает предположение о физической природе подобных пропусков в данных.

![](_page_30_Figure_0.jpeg)

Рисунок 16. Исчезновение сейсмичности на большой глубине с началом извержения 2005 года.

В остальном, никаких примечательных особенностей этих извержений не обнаружено.

Результаты этой работы логично сравнивать с результатами лабораторных экспериментов и результатами аналогичных исследований других вулканов.

4.1 Сравнение с лабораторным исследованием

В лабораторном эксперименте [Смирнов В.Б. и др., 2015] изучалось инициирование разрушения в образцах горных пород при повышении давления жидкости, заполняющей поровое пространство образцов. Это в какой-то степени можно рассматривать как модель инициации вулканической активности, инициированной повышением давления в трещинах постройки вулкана при внедрении в трещины магмы.

В экспериментах через образцы горных пород, насыщенные проводящим водным раствором NaCl, пропускался электрический ток. К торцам образца прикладывалась разность потенциалов в течение заданных интервалов времени, между которыми выдерживались паузы, отмечается, что прохождение электрического тока через пропитанный проводящим раствором образец приводит к существенному (на порядок) возрастанию интенсивности акустической эмиссии в образце, при выключении тока интенсивность акустической падает (Рис. 17a). При эмиссии этом В отсутствие гальванической связи между электродами (образцы не пропитаны проводящим раствором) корреляции между интенсивностью акустической эмиссии и наличием-отсутствием разности потенциалов не наблюдается. Предполагается, что такой механизм инициации акустической эмиссии имеет термическую природу, и происходит за счёт нагрева и расширения флюида в порах, при этом его тепловая энергия расходуется в том числе на разогрев образца (исходя из предположения, что вся энергия разогретого флюида идёт на нагрев образца, в работе было оценено, что его температура увеличится на 14.5 °С) и развитие микротрещин. Значимых вариаций наклона графика повторяемости, в периоды активизации разрушения, обнаружено не было (Рис. 176), в отличие от случая образования макротрещины – момент времени между 9000 – 10000 секундами на графике, где значение *b-value* резко падает. Последнее – резкое падение *b-value* перед реализацией крупного события, соответствует механизму ЛНТ, где происходит уменьшение наклона графика повторяемости на стадии активизации разрушения и его увеличение на стадии релаксации. Эти замечания позволяют сделать вывод о том, что характер активизации разрушения В таком эксперименте отличается ОТ предполагаемого механизмом ЛНТ. Отсутствие ярких вариаций наклона графика повторяемости при увеличении и уменьшении порового давления при нагреве и охлаждении поровой жидкости схоже с результатами, полученными нами при анализе вулканической сейсмичности Ключевской сопки.

![](_page_32_Figure_0.jpeg)

Рисунок 17. Графики взяты из [Смирнов В.Б. и др., 2015]. "а" – изменение температуры образца, при пропускании тока; "б" – изменение наклона графика повторяемости при пропускании тока. Синим выделены периоды пропускания тока, красным – периоды без воздействия.

# 4.2 Сравнение с исследованием вулкана Августина и других вулканов

Исследование аналогичное данной работе известно для вулкана Августина, который находится на Аляске [Jacobs, McNutt, Power, 2010]. В нём анализировались параметры сейсмических роёв, наблюдавшихся перед извержением 2006 года, в ходе которого наблюдались взрывы, выбросы лавы и пепла (стромболианская<sup>1</sup> и вулканская<sup>2</sup> активности). Было выделено два сейсмических роя – длинный, который завершался вторым – коротким. Также отмечается, что явление подобных роёв замечено перед многими другими извержениями. В результате оценки параметра b было выяснено, что перед извержением наблюдается сперва плавное падение значения (на 17% фонового значения) относительно фонового, которое было рассчитано по сейсмическому каталогу для этого района за промежуток в пять лет перед извержением, затем, непосредственно перед извержением (за 13 часов), резкие возрастание и падение (на 48% фонового значения), связанные с коротким роем (Рис. 18). Эти аномалии параметра b авторы связывают с движением магмы, то есть с тем, что магма перед извержением подходит ближе к поверхности.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Стромболианская активность – тип вулканической активности, сопровождающейся взрывными выбросами лавы из жерла.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Вулканская активность – тип вулканической активности, сопровождающейся выбросам пепла и газов.

![](_page_34_Figure_0.jpeg)

Рисунок 18. График взят из работы [Jacobs, McNutt, Power, 2010]. На нём представлена зависимость параметра *b* от времени для двух роёв, выделенных перед извержением вулкана Августина 2006 года.

В этой работе сравнение с фоновым значением не проводилось, так как по данному каталогу трудно достоверно его оценить из-за плохого качества и изза того, что извержения происходят слишком часто, например, оценка *b* за период 1995-2000 даёт значение 0.4, близкое к классическому 0.55, однако, за этот период зафиксировано 4 извержения. Поэтому сравнение проводилось для значений, вычисленных за промежутки до, во время, и после извержения.

Также авторы отмечают странную форму частотно-магнитудного распределения для короткого роя, замечая, что оно имеет два отдельных значения угла наклона (Рис. 19а). Выше уже отмечалось подобное в работе [Галина, 2019], и похожие графики были получены и данной работе для некоторых извержений (Рис. 19б).

![](_page_35_Figure_0.jpeg)

Рисунок 19. "а" – график повторяемости для короткого роя (за 13 часов перед извержением), взятый из работы [Jacobs, McNutt, Power, 2010]; "б" – график повторяемости за временной промежуток длиной 24 суток перед извержением 2017 года Ключевской сопки (извержение номер 11), полученный в этой работе.

Также известны другие похожие исследования вулканической сейсмичности, например, [Gresta, Patanè, 1983], в котором тоже фиксировались изменения *b-value* перед извержением вулкана Этна 1983 года. Или исследование вулкана Попокатепетль [Novelo-Casanovaa, Martínez-Bringasb, Valdés-Gonzáleza, 2006] с аналогичными результатами. В работе [Chiba, Keita & Shimizu, Hiroshi, 2018] для вулкана Симмоэ (Shinmoedake) опять же наблюдалось падение значения b непосредственно перед извержениями и во время них (Рис 20.).

![](_page_36_Figure_0.jpeg)

Рисунок 20. Графики взяты из работы [Chiba, Keita & Shimizu, Hiroshi, 2018]. "a" – график изменения *b* во времени для региона, находящегося непосредственно под вершиной вулкана. "b" – график изменения *b* во времени для региона, находящегося на 7-8 км северо-западнее вершины, где предположительно, находится магмовая камера, питающая вулкан.

#### ИТОГИ И ВЫВОДЫ

Ниже представлен рисунок (Рис. 21), на котором совмещены основные результаты работы.

![](_page_37_Figure_2.jpeg)

Рисунок 21. На рисунке представлены результаты оценки *b-value* для извержений вместе с их некоторыми характеристиками, предоставленными О.А.Гириной, соответствующая таблица представлена в приложении (табл. 1); прямоугольником для каждого номера извержения изображен максимальный разброс значений b на промежутке времени до, во время и после извержения: голубые — для больших глубин, зеленые — для малых. На каждом прямоугольнике горизонтальным отрезком помечено значение b в период извержения. 1 – максимальная высота эруптивной колонны, 2 – максимальная величина вулканического дрожания, 3 – длительность извержения, 4 – средняя активность во время извержения на большой глубине, 5 – средняя активность во время извержения на малой глубине.

Также буквами "S" помечены извержения, у которых была зафиксирована стромболианская активность, буквами "V" – извержения с вулканской активностью, буквами "L" – извержения, которые сопровождались истечением лавы.

Не наблюдается явной корреляции изменения параметра *b* ни с одним из параметров извержений, однако, следует отметить, что к этим рассчитанным значениям следует относиться с осторожностью, так как некоторые из них могут быть обусловлены плохой статистикой, особенно для извержений с малой активностью или малой длительностью. Например, для извержения 12 на большой глубине получается неправдоподобно большое значение: 3.53 (обычное фоновое значение для тектонических землетрясений, примерно, 0.55, если использовать энергетические классы).

Извержения под номерами 10, 11, 12, 13, 14 сопровождались только вулканской деятельностью, и имеют высокую сейсмическую активность на большой глубине, при практически полном отсутствии сейсмичности на малой глубине (за исключением извержения 12), однако, из-за малой длительности этих извержений и факта, что максимальное значение *b-value* обнаружено именно во время извержения (см. рис. 15), можно предположить, что большие изменения *b-value* связаны с малым количеством событий в промежутке времени, по которому проводилась оценка, что приводит к завышению значения. Также можно заметить, что извержения, сопровождавшиеся истечением лавы, имеют низкую сейсмическую активность на большой глубине. В остальном, корреляции изменений *b-value* с типами вулканической активности не наблюдается: для некоторых извержений с наличием стромболианской, вулканской деятельностями и лавовыми потоками наблюдаются сильные изменения b (номера 2 и 5), а для некоторых слабые (номера 3 и 8).

Основные результаты работы:

- Были рассмотрены 14 извержений Ключевской сопки с 2003 года по 2019, для 6 из них получены оценки наклона графика повторяемости на малой и большой глубине. Остальные извержения были исключены из рассмотрения из-за большого количества пропусков в записи.
- 2) Чтобы нивелировать плохое качество каталогов предложены два способа оценки параметра b: вручную, путём аппроксимации в программе Origin линейных участков, ограниченных сверху и снизу значениями магнитуд, а также в программе, написанной в среде Matlab, в которой реализован метод максимального правдоподобия, с помощью оцененных визуально представительных магнитуд.
- 3) По итогам работы не было обнаружено ярких закономерных изменений угла наклона графика повторяемости при инициации разрушения породы магмой в вулканической постройке. Не наблюдается явной корреляции изменения параметра *b* ни с одним из параметров извержений.
- 4) Ни для одного из извержений не было обнаружено резких падений значения *b* непосредственно перед извержением, в отличие от результатов работы [Jacobs, McNutt, Power, 2010], однако, наблюдалась похожая странная форма частотно-магнитудного распределения.
- 5) Корреляции изменений *b-value* с типами вулканической активности не наблюдается.
- 6) Отсутствие закономерных изменений угла наклона графика повторяемости также наблюдалось в лабораторном исследовании при пропускании тока через насыщенные флюидом образцы горных пород [Смирнов В.Б. и др., 2015], которое позволяет производить резкий нагрев флюида, содержащегося в порах, ведет к увеличению давления в порах и трещинах, что в некоторой степени схоже с условиями генерации вулканической сейсмичности в период извержений.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были проанализированы изменения угла наклона графика повторяемости для всех извержений Ключевской сопки с 2003 года по 2020, для которых это позволяло качество сейсмического каталога. Плохое качество данных не позволило использовать автоматические методы оценки параметра *b*, поэтому были использованы более грубые, но более устойчивые "ручные" методы. Несмотря на разнородную достоверность полученных оценок, некоторые результаты оказались сходными с результатами лабораторных экспериментов. И в тех, и в других исследованиях не выявлено явных характерных изменений наклона графика повторяемости в периоды существенной – в разы и на порядки – увеличений сейсмической активности. Это отличает исследованное явления от активизаций в тектонической сейсмичности, которые почти всегда сопровождаются изменениями наклона графика повторяемости.

Для дальнейшего развития затронутой темы имеет смысл расширить исследования графиков повторяемости по данным для других вулканов.

#### Благодарности

Выражается благодарность заведующему кафедрой физики Земли В.Б. Смирнову за предоставление данных и необходимого программного обеспечения, и руководство в проведении исследования; ассистенту кафедры физики Земли М.Г. Потаниной и аспирантке кафедры физики Земли Т.И. Карцевой за консультирование в выполнении работы. Также автор признателен ведущему научному сотруднику института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН О.А. Гириной за предоставление подробной информации об извержениях Ключевской сопки.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Попандопуло Г. А. Детальные исследования временных вариаций параметра *b-value* закона Гутенберга-Рихтера по данным высокоточных сейсмических наблюдений на Гармском полигоне в Таджикистане // Физика Земли. — 2018. — № 4. — С. 79–99.
- Смирнов В. Б. [и др.] Лабораторное исследование воздействия электромагнитных полей на процесс разрушения горных пород: Отчет о НИР, Москва, 2015
- Касахара К. Механика землетрясений: Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 264 с., ил.
- Minakami T. Fundamental research for predicting volcanic eruptions, Part 1 // Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo. 1960. T. 38. C. 497–544.
- 5) Гордеев Е. И. Сейсмичность вулканов и контроль вулканической активности // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук, по. 2, 2007, pp. 38-45.
- Кулаков И. Ю. Камчатская вулканическая одиссея: от Безымянного до Авачи. // Наука из первых рук. – 2018. – т. 80 – № 5/6.
- 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.
- 8) Gutenberg, B., and C. F. Richter (1944). Frequency of earthquakes in California, Bull. Seismol. Soc. Am. 34, 185–188.
- Aki, K. (1965). Maximum likelihood estimate of b in the formula lgN=a-bM and its confidence limits, Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ. 43, 237–239.
- 10) Казначеев П. А., Майбук З.-Ю.Я., Пономарев А. В., Смирнов В. Б., Бондаренко Н. Б. Лабораторное исследование термостимулированных разрушений горных пород // Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 6—9 июня 2017 г.): материалы IV Всероссийской конференции

*с международным участием* / Под ред. В. В. Адушкина, Г. Г. Кочаряна. ИДГ РАН. — М.: ГЕОС, 2017. — С. 163—171.

- М. Г. Потанина, В. Б. Смирнов, А. В. Пономарев и др. Особенности акустической эмиссии при флюидной инициации разрушения по данным лабораторного моделирования // Физика Земли. — 2015. — № 2. — С. 126–138.
- 12) Галина Н.А. Изучение длиннопериодных землетрясений Ключевской группы вулканов: магистерская диссертация. МГУ, Москва, 2019.
- Смирнов В. Б. Прогностические аномалии сейсмического режима 1. Методические основы подготовки исходных данных // Геофизические исследования. — 2009. — Т. 10, № 2. — С. 7–22.
- 14) Jacobs K. M., McNutt S. R., Power J. A. Using seismic b-values to interpret seismicity rates and physical processes during the preeruptive earthquake swarm at Augustine Volcano 2005–2006 – Alaska: US Geol. Surv. Prof. Pap., 2010. – T. 1769. – C. 1-17.
- 15) Писаренко В.Ф. О законе повторяемости землетрясений // Дискретные свойства геофизической среды. М.: Наука, 1989. С.47–60.
- 16) Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука, 1991. 96 с.
- 17) О. А. Гирина, А. Г. Маневич, Н. А. Малик и др. Действующие вулканы Камчатки и Северных Курил в 2005 г // Вулканология и сейсмология. — 2007. — № 4. — С. 29–40.
- 18) Хубуная С.А., Гонтовая Л.И., Москалева С.В. Малоглубинный очаг вулкана Ключевской // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога, Петропавловск-Камчатский, 27-29 марта 2008 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2008. С. 291-304.
- 19) Хубуная С.А., Гонтовая Л.И., Соболев А.В., Низкоус И.В. Магматические очаги под Ключевской группой вулканов // Вулканология и сейсмология. 2007. № 2. С. 1-23.

- 20) Gresta, S., Patanè, G. Changes in *b* values before the Etnean eruption of March–August 1983. *PAGEOPH* 121, 903–912 (1983).
- Novelo-Casanovaa, D.A., Martínez-Bringasb, A., Valdés-Gonzáleza, C., 2006. Temporal variations of Qc-1 and b-values associated to the December 2000-January 2001 volcanic activity at the Popocatepetl volcano, Mexico. Journal of Volcanology and Geothermal Research 152, 347-358.
- 22) Chiba, Keita & Shimizu, Hiroshi. (2018). Spatial and temporal distributions of b-value in and around Shinmoe-dake, Kirishima volcano, Japan. Earth, Planets and Space. 70. 10.1186/s40623-018-0892-7.

# ПРИЛОЖЕНИЕ

Номер извержения	День, месяц, год начала	День, месяц, год окончания	Максимальная величина вулканического дрожания, мкс/с	Максимальная высота эруптивной колонны, км н.у.м
1	11.05.2003	28.01.2004	20,5	7,5
2	15.01.2005	10.04.2005	39,5	9
3	15.02.2007	26.07.2007	83,8	12
4	13.10.2008	27.01.2009	53,9	8
5	16.09.2009	09.12.2010	65	9
6	14.10.2012	10.01.2013	0,6	0
7	15.08.2013	15.12.2013	312,4	12
8	01.01.2015	24.03.2015	6,6	8
9	03.04.2016	06.11.2016	52,2	8
10	02.03.2017	25.08.2017	2,95	8
11	05.12.2017	18.01.2018	0,48	7
12	07.05.2018	14.05.2018	0,36	10,5
13	21.04.2019	22.04.2019	0,37	7
14	12.06.2019	01.07.2019	0,8	6

Таблица 1. Извержения Ключевской сопки.