

Особенности режима вулканической сейсмичности на примере извержения исландского вулкана Бардарбунга 2015-го года

Е. М. Греков*

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики Земли*

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 14.07.2022; подписана в печать 30.12.2022)

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 из-за колебаний большого объема магмы, а также события, имеющие взрывной характер, когда раскаленные газы резко вырываются на поверхность. Поэтому изучение режима вулканической сейсмичности представляет особый интерес. В работе исследовался сейсмический каталог Исландии с 1995 по 2019 гг. Сейсмический режим исландского вулкана Бардарбунга во время извержения значительно выделяется на фоне остальной сейсмичности региона. Благодаря подробным отчетам исландской метеорологической службы удалось установить, что это обусловлено в основном двумя процессами, приуроченным к извержению: обрушением центральной кальдеры, а также истечением лавы по рою трещин вулкана. Таким образом удалось идентифицировать природу части событий каталога как вулканическую. В результате анализа вариаций наклона графика повторяемости для процесса раскрытия трещин под давлением магмы была выявлена известная из литературы аномалия параметра b , характерная для так называемых вулканических роев. Тем самым было получено свидетельство в пользу гипотезы, о том, что подобные аномалии, часто предшествующие извержениям, связаны именно с процессами такого типа. Также с помощью метода ближайшего соседа Бен-Зиона–Заляпина было проанализировано группирование событий, приуроченных к извержению, и обнаружена значительно более низкая кластеризация событий по сравнению с тектоническими режимами, что, вероятно, также объясняется различием в природе этих сейсмичностей.

PACS: 91.30.Dk, 91.30.Px

УДК: 550.34.013.2

Ключевые слова: вулканическая сейсмичность, наклон графика повторяемости, закон продуктивности землетрясений, вулканические рои.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных теоретических задач сейсмологии является исследование механизмов реализации землетрясений. Для этого изучается сейсмический режим — совокупность землетрясений некоторого региона, распределенных во времени и пространстве. Сейсмический режим описывается большим количеством различных статистических параметров, которые называются параметрами режима сейсмичности. Сейсмические параметры косвенно несут информацию о физических параметрах среды, таких как температура, пористость, водонасыщение, трещиноватость, упругие модули и прочее, позволяя количественно сравнивать сейсмические режимы для различных времен и регионов, тем самым давая возможность строить гипотезы о механизмах процессов, происходящих в недрах.

Известно, что вулканическая сейсмичность сильно отличается от тектонической из-за своей природы — движения магматических расплавов, под действием которых возникают напряжения в среде, вырывающихся через поры пепела и вулканических газов, то есть к вулканической сейсмичности можно отнести земле-

трясения, которые инициируются вулканической активностью. В [1] указывается, что на активных вулканах присутствует множество сейсмических сигналов, отличающихся от сигналов тектонических землетрясений. В [2] разделить эти сигналы по характерным особенностям предлагается на несколько типов:

1. А-тип (вулcano–тектонические). Высокочастотные тектонические сигналы с гипоцентрами, локализованными на глубине в несколько десятков километров под вулканом, связанные с разрушением среды под давлением магмы. Присутствуют Р- и S- волны.
2. Б-тип. Сигналы с гипоцентрами, находящимися около поверхности вблизи кратера. Представлены в основном поверхностными волнами. Отсутствуют вступления S- волн. Частотный состав 1–3 Гц.
3. Взрывные. Сигналы, сопровождающие взрывы в кратере, отличаются высокой интенсивностью.
4. Вулканическое дрожание. Возникает при непрерывном истечении газо–пепловых потоков или лавы, продолжающемся длительное время. Запись такого сигнала имеет форму длительных непрерывных сигналов. Присутствует непосредственно во время извержения.

* grekov.em16@physics.msu.ru

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 в [1] отмечается, что вулcano-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 ее 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 предсказания извержения используется непосредственный контроль передвижения магмы с помощью гибридных землетрясений: предполагается, что они представляют собой вулcano-тектонические землетрясения (высокочастотная компонента) с последующими объемными колебаниями магмы (низкочастотная компонента).

Однако стоит отметить, что, используя только классический сейсмический каталог, разделить вулканические землетрясения по этим типам практически невозможно, поскольку в каталоге не содержится необходимой для этого информации о вступлениях сейсмических волн. Для распределения же событий по этим типам, вероятно, необходимо исследовать волновые формы для каждого землетрясения в каталоге, в данной работе такого исследования не проводится.

В данной работе по данным каталога землетрясений Исландии исследуются такие параметры режима сейсмичности как: наклон графика повторяемости (b -value) и продуктивность землетрясений (Λ).

Одним из ключевых законов сейсмологии является закон Гутенберга–Рихтера [3], который описывает зависимость логарифма числа событий с определенной 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 параметр b — наклоном графика повторяемости, либо b -value. Этот параметр несет смысл соотношения между числом событий с малыми и большими магнитудами. То есть чем больше его значение, тем больше малых событий по сравнению с большими. Известно, что возможно использовать b -value для оценки сейсмической опасности и прогноза сильных землетрясений в сейсмоактивных регионах. Известно также, что величина параметра b зависит от тектонического напряжения в среде, изменений температуры, порового давления 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.

Исследования сейсмических параметров уже неоднократно проводились для различных тектонических режимов, например [4], основным результатом этих исследований является факт наличия аномального повышения b -value перед крупными событиями.

Это явление, возможно, объясняется фрактальной природой образования трещин в коре, а также механизмом землетрясений, который заключается в накоплении напряжений и их последующим сбросом. Также проводились исследования параметров сейсмического режима для так называемых «сейсмических роев» [5], для которых также была выявлена аномалия b -value. Предполагается, что причиной подобной активности является диффузия флюида в среду, что приводит к уменьшению ее прочности. Аналогичные «рои» присутствуют и в вулканической сейсмичности.

Исследования временных вариаций b -value для вулканической сейсмичности также уже проводились. Например, в работе [6] анализируются параметры сейсмических роев, наблюдавшихся перед извержением 2006-го года., в ходе которого происходили взрывы, выбросы лавы и пепла (стромболианская и вулканская активности). Было выделено два сейсмических роя: длинный, который завершался вторым — коротким. Также отмечается, что явление подобных роев присутствует перед многими другими извержениями. В результате оценки параметра b было выяснено, что перед извержением наблюдается сперва плавное падение значения (на 17%) 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), резкое возрастание и падение (на 48% фонового значения), связанные с коротким роём.

Похожее поведение параметра также наблюдалось перед извержением вулкана Этна 1983-го года [7] и 1981-го года [8], а также для извержения 2001-го года вулкана Попокатепетль [9]. А также в работе [10] для вулкана Симмоэ (Shinmoedake) в Японии для нескольких извержений.

С физической точки зрения это явление, предположительно, объясняется тем, что перед извержением магма, ищущая путь на поверхность, наполняет полости в породе и своим давлением заставляет их «трещать», порождая множество маленьких событий, что означает повышение значения параметра b . Затем лава пробивает канал и течет по нему беспрепятственно, и сейсмичность затухает.

Другое явление, характерное для вулканической сейсмичности, — бимодальные графики повторяемости, которые также встречаются во многих работах [6]. Однако в большинстве случаев его объясняют особенностями записи данных, а не физическими причинами.

Вопрос о связи между землетрясениями и механизмами инициации является одним из самых актуальных в сейсмологии не только с теоретической точки зрения, но и с практической — необходимо предсказывать число афтершоков после сильного события, поэтому большое внимание уделяется анализу афтершоковых последовательностей. Одним из новых подходов к изучению этого вопроса является исследование продуктивности землетрясений. Продуктивность землетрясения может быть определена как число инициированных событий в заданном диапазоне относительных магнитуд. При этом предполагается, что каждое землетрясение может инициировать несколько связанных с ним толчков, но каждый толчок может быть инициирован лишь одним определенным землетрясением. Понятие продуктивности землетрясений тесно связано с понятием количества афтершоков, вызванных основным толчком. Отличие состоит в том, что в количестве афтершоков могут учитываться также вторичные афтершоки, вызванные не непосредственно основным толчком, а его афтершоком [11].

Закон продуктивности землетрясений утверждает, что общее количество событий, возникающих в результате возмущения напряженного состояния, вызванного другим более ранним землетрясением, подчиняется экспоненциальному распределению.

В работе [12] установлено, что вид распределения не зависит от метода выбора кластеризованных событий, нижнего порога магнитуд рассматриваемых инициированных событий, а также от магнитуд и глубин событий-триггеров. В этой же работе была показана справедливость закона на примере глобального каталога ANSS ComCat Геологической службы США, а также каталогов некоторых регионов, в том числе вулканических: Байкал, Италия, Япония, Камчатка, Северная Калифорния, Южная Калифорния, Новая Зеландия.

Экспоненциальное распределение означает, что землетрясения с меньшим числом афтершоков относительной магнитуды, в том числе вообще без афтершоков, встречаются чаще, чем землетрясения с большим числом афтершоков [11].

Параметр распределения — средняя продуктивность — варьируется от региона к региону, а также уменьшается с глубиной, что свидетельствует о том, что параметр является характеристикой состояния среды. Это можно использовать и на практике, например рассчитывая продуктивность в реальном времени для микросейсмичности.

Также следует отметить, что закон продуктивности опровергает распространенную модель ETAS (Epidemic-type aftershock sequence — Последовательность афтершоков эпидемического типа), которая описывает афтершоковый процесс как совокупность независимых последовательностей, подчиняющихся закону Омори–Утсу, при этом каждое событие инициирует свою последовательность [11]:

$$\lambda(t) = r + \sum_{i, t_i < t} \frac{K_1 10^{\alpha(M_i - M_{min})}}{(t - t_i + c)^p},$$

где t_i и M_i — время и магнитуда i -го события; r — частота событий так называемой фоновой сейсмичности; K_1 , α — константы; c , p — параметры закона Омори–Утсу. Параметры модели r , K_1 , α , c , p одинаковы для всех событий из каталога. В модели предполагается, что число афтершоков постоянно для каждого значения магнитуды, в таком случае на практике продуктивность будет иметь распределение Пуассона (случайные отклонения от среднего). В таком случае продуктивность является параметром модели и оценивается по данным каталога для рассматриваемого региона. Согласно же обсуждаемому закону продуктивность является характеристикой каждого землетрясения в отдельности и не зависит от его магнитуды, отражая общую прочность породы. Таким образом, каждое землетрясение может характеризоваться двумя этими независимыми параметрами (магнитуда и продуктивность), имеющими схожие законы повторяемости [11].

Поскольку, как уже отмечалось выше, вулканическая сейсмичность отличается по природе от тектонической, имеет смысл проверить закон продуктивности для нее.

Цель данного исследования: на примере Исландии оценить параметры режима вулканической сейсмичности, выявить особенности режима, прояснить связи параметров с особенностями процессов генерации землетрясений.

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДИКИ

1.1. Объект исследования

Исландия представляет собой платформу размером 300×500 км, расположенную по обе стороны границы расходящейся плиты и над горячей точкой, предположительно питаемой глубинным мантийным плюмом. Эта наземная платформа является частью большей платформы, также включающей в себя шельфовую зону шириной 450×750 км, ограниченную четко выраженным краем шельфа. Восточная часть этой массы находится на Евразийской плите, а западная часть — на Североамериканской плите. Граница срединно-атлантической плиты относительно проста в большинстве частей северо-востока Атлантики и состоит из рифтовых и трансформных сегментов, разделяющих две основные плиты, Евразию и Северную Америку. Граница четко определяется эпицентрами землетрясений, которые показывают узкую зону деформации [13].

Скорость движения плит от Срединно-Атлантического хребта в Исландии на основе моделирования глобального движения плит оценивается

примерно в 2 см/год. Простираясь через Исландию, линия хребта отклоняется к востоку исландским мантийным плюмом, корни которого достигают глубины более 400 км [14]. Исследование показывает, что Исландия представляет собой наклонно расходящуюся границу плиты с характеристиками как рифтовой зоны, так и трансформного разлома [15]. Также известно, что исландская кора в основном состоит из базальтов [16].

Большая часть извержений в Исландии сопровождается роями землетрясений, ощущающихся от нескольких часов до нескольких дней перед извержением. Замечено, что рои, приуроченные к извержениям, вероятно, имеют большую глубину, чем тектонические рои [15].

Рассматриваемый в работе каталог был получен с сайта метеорологической службы Исландии (<https://en.vedur.is>), в нем содержится 461316 записей за период с 1995 по 2019 гг., содержащих информацию о временах, координатах гипоцентров и магнитудах сейсмических событий (в каталоге представлены моментные и локальные магнитуды, далее в исследовании везде используется моментная магнитуда, диапазон значений в каталоге: от -1.80 до 5.67 , представительная магнитуда $M_c \approx 1.5$). По данным метеорологической службы Исландии за указанный период в Исландии произошло 10 извержений на пяти вулканах.

Система Бардарбунга расположена в Восточной вулканической зоне и имеет длину около 190 км и ширину до 25 км, состоящую из центрального вулкана, возвышающегося до 2000 м над уровнем моря, и роев трещин, частично прикрытых ледяной шапкой Ватнайокудль. Меньший второй центральный вулкан, Хамаринн, расположен в 20 км к юго-западу от Бардарбунга. Центральный вулкан имеет заполненную льдом кальдеру площадью 65 км². Характерной активностью являются эксплозивные базальтовые извержения, происходящие на центральных склонах вулканов или в ряях трещин. Координаты: 64° 38' северной широты, 17° 30' западной долготы. Рой трещин простирается примерно на 55 км на северо-восток до плато Холухраун, а также на 150 км на юго-запад от центрального вулкана (рис. 1).

Как геофизические, так и геохимические данные событий 2014–2015 гг. предполагают наличие области источника магмы на глубине более 10 км под кальдерой. Бардарбунга сейсмически активен: ежегодно регистрируется порядка 100 землетрясений ($1.5 < M < 5$). Активность в основном связана с центральным вулканом Бардарбунга. В период с августа 2014-го года по февраль 2015-го года произошло крупное трещинное извержение на свободной ото льда северной части трещинного роя (район Холухраун). Оно сопровождалось значительным обрушением кальдеры Бардарбунга. После извержения сейсмичность все еще несколько повышена [17].

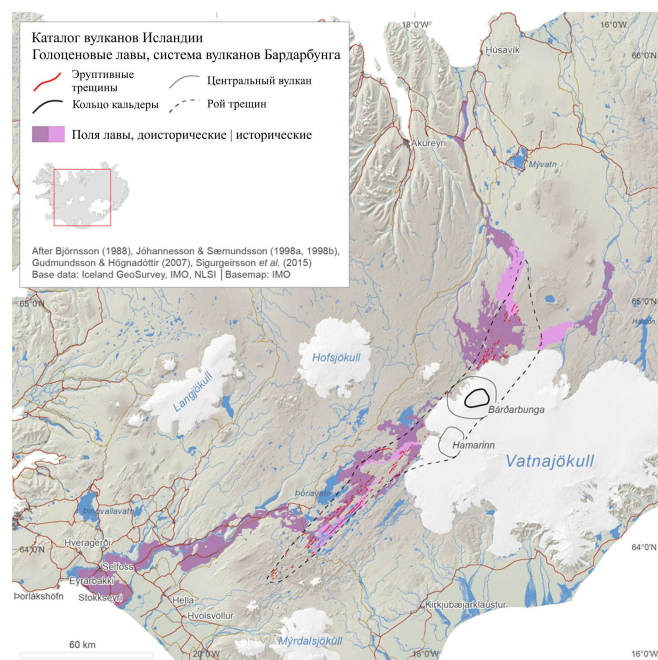


Рис. 1. Частично покрытая льдом вулканическая система Бардарбунга с подледниковым центральным вулканом и большим роем трещин [17]. Черная жирная линия — центральная кальдера, тонкая черная линия охватывает вулканические постройки, темные фиолетовые области — зоны застывшей древней лавы, светлые фиолетовые области — зоны современной застывшей лавы, красные линии — эруптивные трещины, пунктирная линия охватывает рой трещин вулканической системы

1.2 Расчет наклона графика повторяемости

Из общего каталога по координатам визуально и по доступной информации об устройстве вулкана были выделены участки вокруг вулканической системы, охватывающие сейсмические события, приуроченные к ним.

Качество каталога зависит от чувствительности и разрешающей способности сети [18]. 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.

Известно, что во время извержений из-за большого числа вулканических землетрясений могут наблюдаться проблемы с записью событий, что приводит к сильной неоднородности (значительные изменения представительной магнитуды во времени) вулканических каталогов. Поэтому для анализа вариаций наклона графика

повторяемости представительная магнитуда определялась визуально по графикам повторяемости отдельно для нескольких временных периодов: во время извержения, а также до и после извержения для оценки фоновых значений региона. При этом стоит отметить, что обычно времена начала и конца извержения, судя по всему, определяются по поверхностным явлениям, например по истечению лавы. В данном же исследовании границы периодов «во время» извержения определялись по сейсмической активности. Значения наклона графика повторяемости рассчитывались методом максимального правдоподобия для негруппированной выборки в скользящем по событиям окне.

1.3 Расчет продуктивности землетрясений

Для анализа продуктивности каталога, то есть распределения числа инициированных событий, необходимо установить связи между событиями, то есть выделить кластеры. В данной работе, как и в работе [12], для этого используется метод ближайшего соседа Бен-Зиона–Заляпина [19].

Суть метода заключается в том, что вводится некоторая функция близости, характеризующая силу связи между событиями. Для каждого события рассчитывается значение этой функции связи с каждым предыдущим событием, а затем из полученного набора значений выбирается наименьшее, то есть соответствующее самой сильной связи (чем меньше значение функции близости между событиями, тем более вероятно они связаны друг с другом).

В данной работе, как и в работе [12], в качестве функции близости выбрано следующее выражение:

$$\eta_{ij} = \begin{cases} t_{ij} r_{ij}^{d_f} 10^{-bm_i}, & t_{ij} > 0 \\ +\infty, & t_{ij} \leq 0 \end{cases},$$

где t_{ij} — время между событиями i и j , r_{ij} — пространственное расстояние между ними, m_i — магнитуда события i . b — параметр закона Гутенберга-Рихтера; d_f — фрактальная размерность распределения гипоцентров или эпицентров землетрясений. Более раннее из пары событий, называется «родителем», а более позднее — его «потомком».

Ниже приведено теоретическое обоснование, почему можно выбрать такое выражение в качестве функции близости в соответствии с работой [20]. Согласно известным статистическим закономерностям землетрясений можно записать среднее число событий с магнитудами в интервале $[m - \Delta m, m + \Delta m]$, происходящих в области радиуса r за временной интервал τ :

$$\bar{n} = C \tau r^{d_f} \Delta m 10^{-bm},$$

где C — константа, зависящая от общей сейсмичности в регионе и рассматриваемого временного интервала.

Для любого события j в сейсмическом регионе можно определить описанное выше число, выбрав в качестве размера области расстояние до некоторого события i в прошлом $r = l = l_{ij}$, а в качестве временного периода — расстояние между этими событиями по времени $\tau = t = t_{ij} = T_j - T_i$:

$$n_{ij} = C t l^{d_f} \Delta m 10^{-bm_i}.$$

Это значение является числом событий с магнитудами $[m - \Delta m, m + \Delta m]$, которое ожидается в области радиуса l за период времени t относительно события j . Или, другими словами, оно характеризует вероятность того, что в области радиуса l вокруг события j за период времени t произойдет событие с магнитудой $[m - \Delta m, m + \Delta m]$. Далее можно найти некоторое событие i^* с минимальным значением n_{i^*j} , то есть наименее вероятное событие, которое тем не менее произошло. Таким образом, это событие наиболее вероятно связано с событием j . Если далее это значение n_{i^*j} окажется значительно меньше большинства парных расстояний в каталоге или меньше некоторого порога, с которого мы считаем события связанными, то можно объединить эту пару событий в кластер.

Расстояние до ближайшего соседа связано с интенсивностью потока событий (число событий в единицу времени в некоторой области пространства). При высокой интенсивности на один и тот же объем приходится больше событий, чем при низкой, следовательно чем выше интенсивность, тем меньше расстояние между событиями. Поскольку интенсивность кластеризованных событий выше, чем фоновых, образующих пуассоновский поток, то расстояние до ближайшего соседа между первыми меньше, чем между последними [11]. Это было проиллюстрировано модельным экспериментом в работе [19].

В реальных каталогах присутствуют как фоновые события, так и кластеризованные, поэтому, как правило, распределение расстояний до ближайшего соседа бимодальное и является совокупностью двух распределений. Чтобы разделить эти распределения используется следующий метод [11]. Сперва строится распределение расстояний до ближайшего соседа для полного каталога $\rho_{real}(\eta)$, затем левый (кластеризованный) пик грубо обрезается, события оставшейся правой части распределения перемешиваются: для каждого времени землетрясения случайным образом выбираются координаты гипоцентра и магнитуды. Далее строится распределение $\rho_{random}(\eta)$ для ближайших соседей в полученном каталоге. Предполагается, что такое распределение аппроксимирует фоновый пик реального распределения. Тогда можно провести декомпозицию бимодального распределения на две части:

$$\rho_{real}(\eta) = (1 - k)\rho_{clustred}(\eta) + k\rho_{random}(\eta)$$

Чтобы оптимизировать вес k , ищется наилучшее совпадение $k\rho_{random}(\eta)$ с правой ветвью $\rho_{real}(\eta)$ в диапазоне от положения 80% от максимума до бесконечности.

Пороговое значение η_0 находится из условия равенства интенсивностей (число событий в единицу времени) потоков кластеризованных землетрясений с ближайшими соседями $\eta \leq \eta_0$ и некластеризованных событий с ближайшими соседями $\eta > \eta_0$:

$$1 - F_{clustered}(\eta_0) = 1 - \frac{F_{real}(\eta_0) - kF_{random}(\eta_0)}{1 - k} = F_{random}(\eta_0).$$

Далее выберем минимальную магнитуду событий-триггеров M_m и относительную магнитуду ΔM , при этом необходимо обратить внимание на то, чтобы $M_m - \Delta M$ было больше представительной магнитуды M_c . Наконец для каждого события-триггера, то есть для событий с магнитудами более M_m , рассчитывается продуктивность — количество инициированных событий на нижнем иерархическом уровне с магнитудами $M \geq M_{родителя} - \Delta M$, среднее значение продуктивности при заданной относительной магнитуде ΔM обозначается $\Lambda_{\Delta M}$.

Входными данными для метода являются: сейсмический каталог, содержащий информацию о времени, координатах и магнитуде событий; представительная магнитуда M_c ; значение наклона графика повторяемости b ; фрактальная размерность каталога d_f . Варьировать можно следующие параметры: пороговое значение для магнитуд триггеров M_m , а также значение диапазона магнитуд ΔM , в котором будет рассчитываться относительная продуктивность.

Краткие шаги алгоритма:

1. Расчет необходимых входных параметров для исследуемого каталога (M_c , b -value, d_f).
2. Вычисление расстояний до ближайшего соседа для всех событий в каталоге с магнитудами больше M_c .
3. Построение гистограммы распределения расстояний до ближайшего соседа и определение порогового значения, с которого мы будем считать события статистически связанными.
4. Удаление связей со значениями расстояний ниже порогового.
5. Расчет для каждого события с магнитудой больше M_m (события-триггеры) числа прямых потомков с магнитудами $M \geq M_{родителя} - \Delta M$.

Более подробно шаги описаны в книге [11]. В данной работе описанный алгоритм был реализован программно.

Для примера в работе представлен результат анализа каталога Новой Зеландии за временной промежуток 1991–2018 гг., каталог Geonet, <https://quakesearch.geonet.org.nz>. На рис. 2 представлена декомпозиция распределений расстояний до ближайшего соседа.

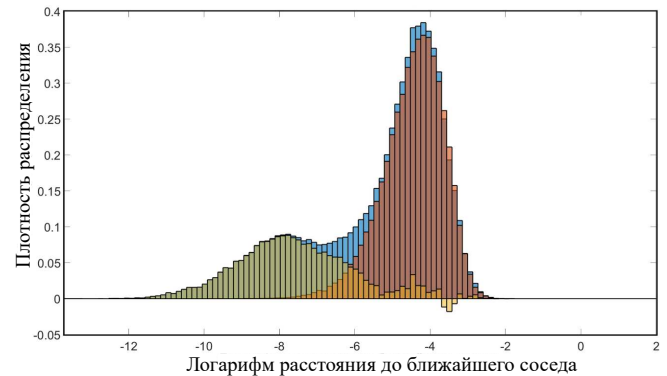


Рис. 2. Декомпозиция распределения расстояний до ближайшего соседа на фоновый и кластеризованный пики для каталога Новой Зеландии. Голубая гистограмма — плотность реального распределения, красная гистограмма — аппроксимирует фоновый пик, желтая — кластеризованный

На рис. 2 красная и желтая гистограммы в сумме дают голубую. Стоит отметить, что в таком случае формально плотностью распределения является только голубая гистограмма, поскольку две других не нормированы на единицу. Отрицательные значения желтой гистограммы являются результатом неточности аппроксимации фонового пика и не несут математического смысла. Также следует отметить, что для каталога Новой Зеландии время, входящее в функцию близости, бралось в годах, а для исследования каталога Исландии оно будет браться в сутках, поэтому в среднем значения расстояний до ближайшего соседа для Исландии будут расположены правее.

Пороговое значение функции близости определяется по пересечению зеленой и фиолетовой линий на графике (рис. 3).

На рис. 4 показан пример выделенных кластеров в каталоге Новой Зеландии.

В табл. 1 представлено сравнение значений, полученных в этом исследовании и в работе [11] для каталога Новой Зеландии при одинаковых входных параметрах.

Значения порога могут отличаться, так как в методе используется случайно перемешанный каталог для аппроксимации фонового пика. Как следствие, значения продуктивности также отличаются.

Расчет фрактальной размерности d_f для каталога Исландии был проведен методом BoxCounting.

Представительная магнитуда каталога оказалась неоднородна, как это часто бывает для вулканической сейсмичности, поэтому анализ полного каталога проводился для нескольких значений M_c . Однако сильных отклонений в результатах для различных значений не наблюдается, вероятно поскольку, как показано в [21], алгоритм устойчив к вариациям параметров b -value, d_f , M_c .

Полученные оценки для входных параметров для полного каталога Исландии представлены в табл. 2. Однако, для отдельных частей каталога параметры бу-

Таблица 1. Сравнение значений для каталога Новой Зеландии, полученных в этом исследовании и в работе [11]

	M_m	b	d_f	$\lg(\eta_0)$	Λ_2
Значения из работы [11]	5	1.1	1.78	-5.66	3.72
Значения, полученные в этой работе	5	1.1	1.78	-5.14	3.35

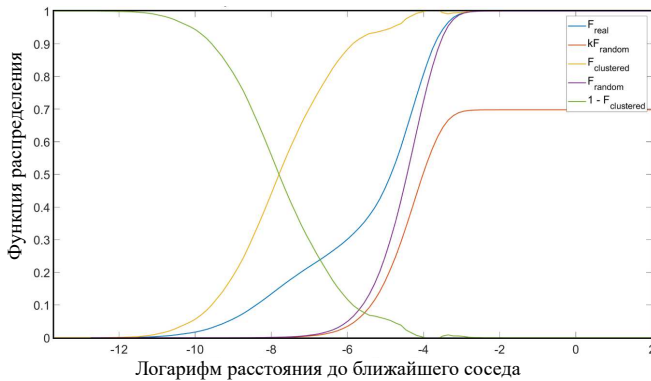


Рис. 3. График функции распределения расстояний до ближайшего соседа для определения порогового значения каталога Новой Зеландии. Голубая линия — функция реального распределения, красная линия — функция распределения аппроксимирующего фоновый пик, желтая — функция распределения аппроксимирующего кластеризованный пик, деленная на коэффициент $1 - k$, фиолетовая линия — функция нормированного распределения аппроксимирующего фоновый пик, зеленая линия — отраженная желтая линия

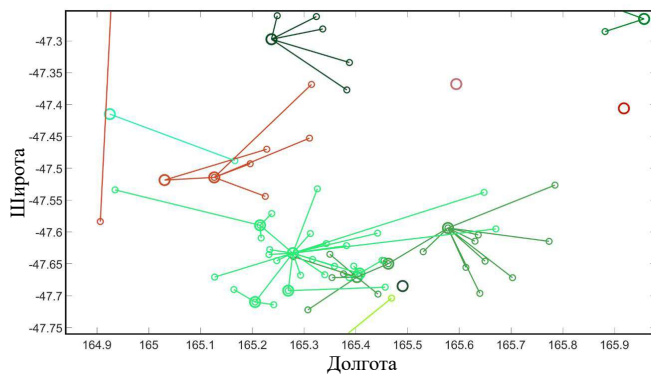


Рис. 4. Пример выделенных кластеров. Большие кружки — события-триггеры, маленькие — события-потомки, двойной кружок означает, что событие является одновременно триггером одного события и потомком другого. События одного цвета принадлежат одному кластеру, цвет кластера определяется временем самого главного события (событие без родителя) в кластере

дут рассчитаны заново.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Аномалии наклона графика повторяемости

Извержение вулкана Бардарбунга (BAR) 2015-го года, согласно отчетам исландской метеорологической службы, можно разделить на два процесса: обрушение центральной кальдеры и движение магмы по рою трещин на северо-восток к плато Холухраун (HOL). Эти два процесса хорошо различаются пространственно по событиям, поэтому рассматривались отдельно (рис. 5).

Для процесса в центральной кальдере наблюдается бимодальность графика повторяемости (рис. 6) с ярко выраженным «провалом» на значении около 3-х.

Полученное значение: $b = 0.87$, стандартная ошибка: $SE = 0.06$.

Данное явление можно объяснить тем, что во время извержения вокруг вулкана была установлена локальная сеть, результаты работы которой затем были объединены с общим каталогом. Однако похожие бимодальные графики наблюдались в работе [6], в той же работе указано еще три подобных случая на других вулканах: вулкан Усу (Япония), Фернандина (Галапагосские острова) и вулкан Сент-Хеленс (США). Причем для вулкана Августино в работе [6] удалось разделить частотно-магнитудное распределение на две моды, выделив события, излучающие на низких частотах.

Обрушение в центральной кальдере вулкана Бардарбунга (BAR), вероятно, связано с понижением давления в приповерхностной магмовой камере под вулканом в следствие того, что магма направилась в рой трещин [22]. Такое явление неоднократно наблюдалось и других на вулканах и, видимо, характеризуется довольно необычным сейсмическим режимом [23], что в совокупности с процессом внедрения магмы в породы может объяснять аномальную форму графика повторяемости. Однако неполнота знаний в этом вопросе не позволяет однозначно рассматривать события левого пика как представительные, поэтому в этой работе мы будем придерживаться гипотезы о том, что такая форма графика повторяемости является следствием проблем с записью событий и будем выбирать представительную магнитуду по правому пику.

Также можно отметить, что большая часть событий с магнитудой более 3-х в области вокруг вулкана приходится на извержение, что также, видимо, связано с процессом обрушения кальдеры.

На рис. 7 представлен результат анализа временных вариаций наклона графика повторяемости для центральной кальдеры.

Таблица 2. Полученные входные параметры для оценки продуктивности каталога Исландии

	M_c	b	d_f
Значения для полного каталога Исландии	1.5-2.0	0.95	1.03

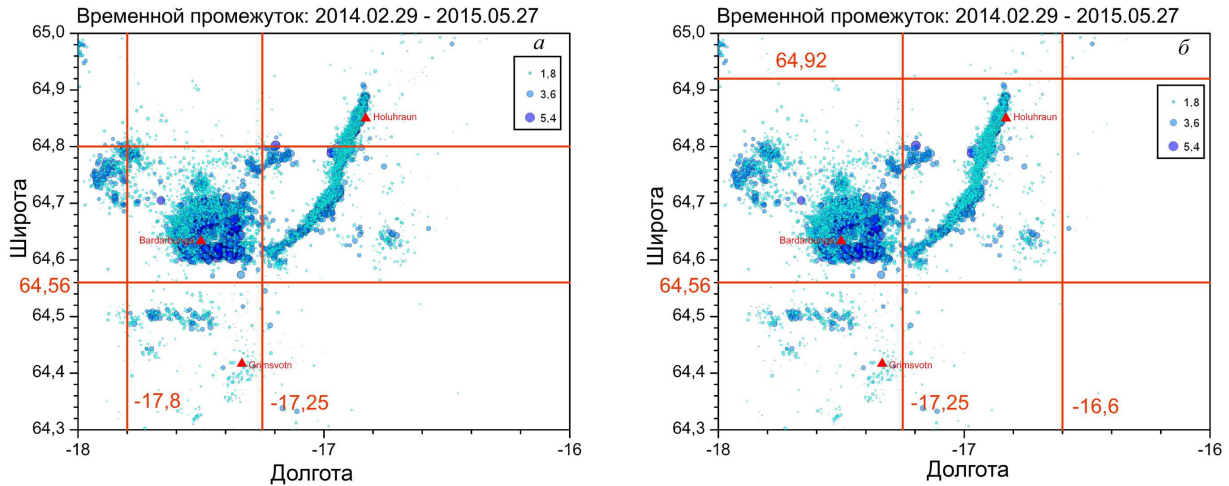


Рис. 5. Пространственное распределение сейсмических событий, приуроченных к извержению вулкана Бардарбунга (BAR) 2015-го года. Чем больше размер кружка и темнее цвет, тем больше магнитуда события, *a* — события, приуроченные к процессу в центральной кальдере, *б* — к течению магмы по каналам

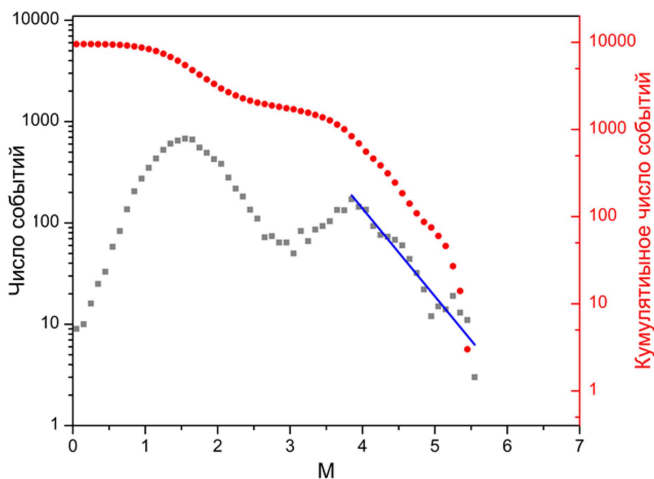


Рис. 6. График повторяемости для событий вокруг центральной кальдеры во время извержения вулкана Бардарбунга (BAR) 2015 г.

Видно (рис. 7, *з*), что значение довольно велико задолго до извержения ($b = 1.5 \pm 0.5$), а затем непосредственно перед ним значительно падает ($b = 0.19 \pm 0.04$), после чего наблюдается постепенный рост с течением извержения, а затем медленный спад после окончания извержения до среднего значения $b = 0.57 \pm 0.16$.

Теперь рассмотрим второй процесс — течение магмы по рою трещин к плато Холухраун (HOL). Согласно отчетам исландской метеорологической службы, сейсмическая активность в рою трещин стала нарастать примерно 17-го августа, а 29 августа началось истечение лавы на поверхность в районе плато Холухраун (HOL), ознаменовав начало извержения, после чего активность пошла на спад (рис. 8).

Это объясняется тем, что с 17 августа магма под давлением начинает «искать» путь к поверхности сквозь породы, разламывая поры и каналы, заставляя их «трещать», а затем, как только она пробилась к поверхности и начинается истечение лавы (29 августа), давление падает, и магма относительно спокойно поднимается к поверхности по уже раскрытым каналам. Следуя классификации вулканических сейсмических сигналов, приведенной в обзоре литературы, вероятно можно сказать, что сейсмичность первой стадии относится к А-типу.

Такая интерпретация процесса также хорошо подтверждается по гипоцентрам землетрясений. Сотрудниками исландской метеорологической службы была создана трехмерная анимация движения гипоцентров землетрясений, показывающее соответствующее движение магмы (<https://en.vedur.is/earthquakes-and-volcanism/articles/nr/2947>). Таким образом, события с 17 августа по 29 августа представляют особый интерес, поскольку можно с большой уверенностью определить их природу, как вулканическую. Для этого временного периода наблюдается «подково-

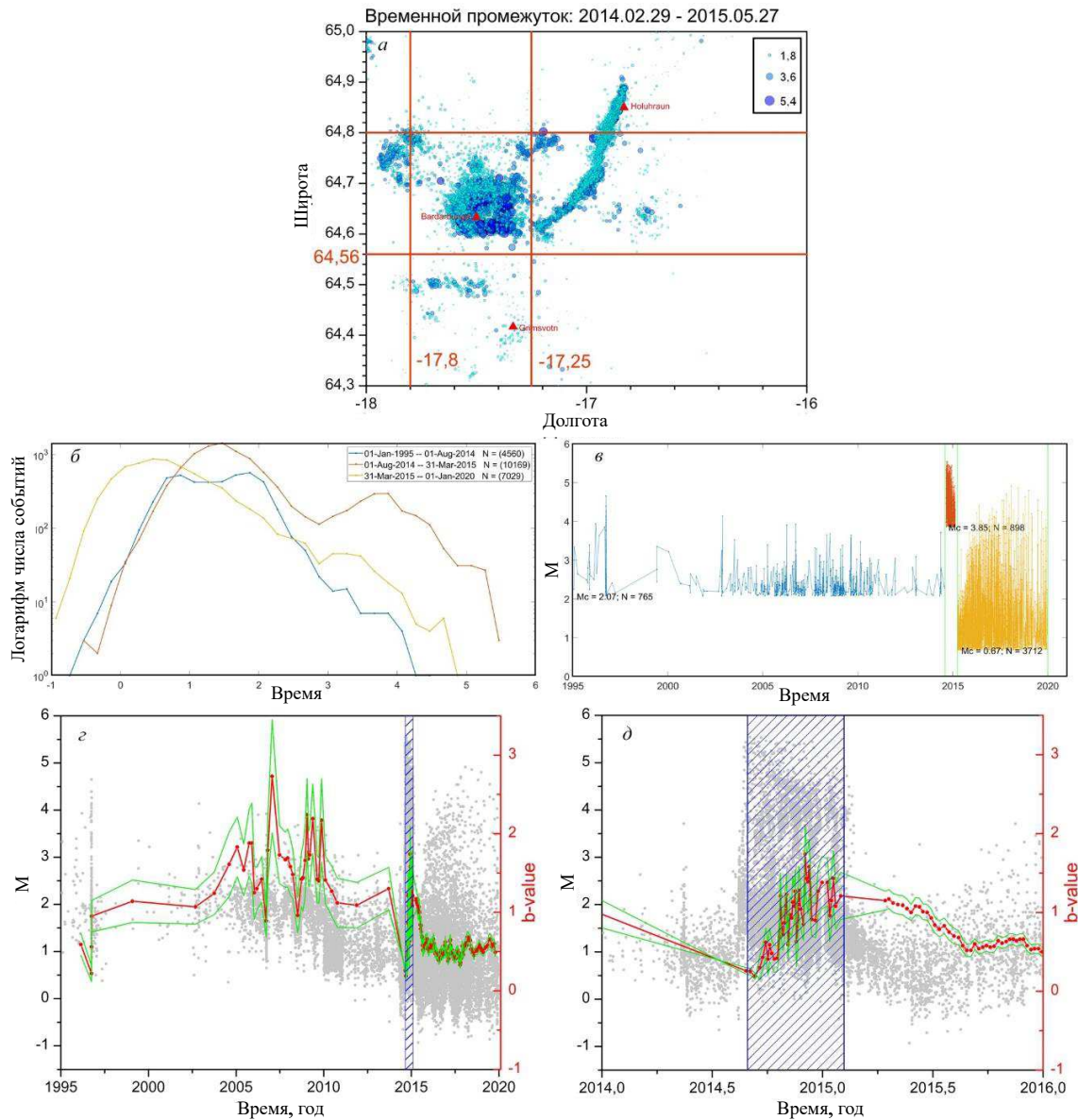


Рис. 7. На графиках (а) – (е) представлен подробный анализ временных вариаций наклона графика повторяемости (*b-value*) для событий в центральной кальдере, приуроченных к извержению исландского вулкана Бардарбунга (BAR) 2015-го года (29.08.2014–27.02.2015). а – события, относящиеся к центральной кальдере вулкана Бардарбунга (BAR), чем больше размер кружка и темнее цвет, тем больше магнитуда события. Черные точки – землетрясения. Красными линиями обозначены границы рассматриваемого региона. б – графики повторяемости за промежутки до, во время и после извержения для оценки представительности. в – распределение представительных событий во времени, по которым оценивается *b-value* в рассматриваемых промежутках времени. M_c – представительная магнитуда в выбранном промежутке времени, N – число событий с магнитудой большей M_c . г – временные вариации *b-value*. Серые точки – сейсмические события, красная линия – наклон графика повторяемости (*b-value*), зеленые линии – погрешность наклона графика повторяемости (*b-value*), синим обозначено извержение. д – временные вариации *b-value*, приближен период перед извержением

образный» график повторяемости (рис. 9), что также может говорить о бимодальности распределения, если пики расположены достаточно близко друг к другу.

Также следует отметить, что график повторяемости для событий после начала истечения лавы (29 августа) имеет классическую форму (рис. 10), что удовле-

творяет предположению о том, что «подковообразные» графики повторяемости характерны для вулканической сейсмичности А-типа, образующей вулканические рои.

На рис. 11 представлен анализ временных вариаций наклона графика повторяемости для этой части ката-

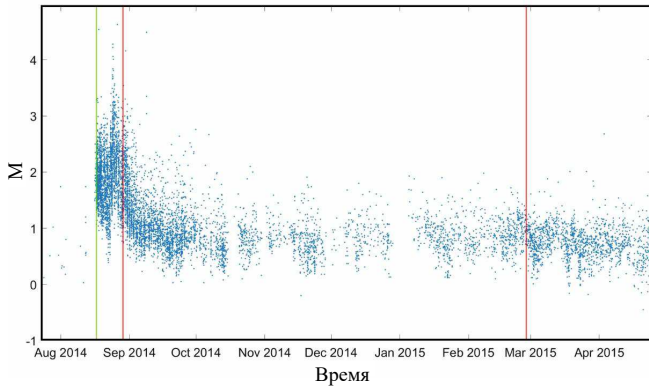


Рис. 8. Распределение событий во времени для процесса, связанного с движением магмы по рою трещин к плато Холухраун (HOL) во время извержения вулкана Бардарбунга 2015-го года. Красными линиями показаны времена начала и конца извержения. Зеленая линия соответствует дате 17.08.2014 — начало процесса

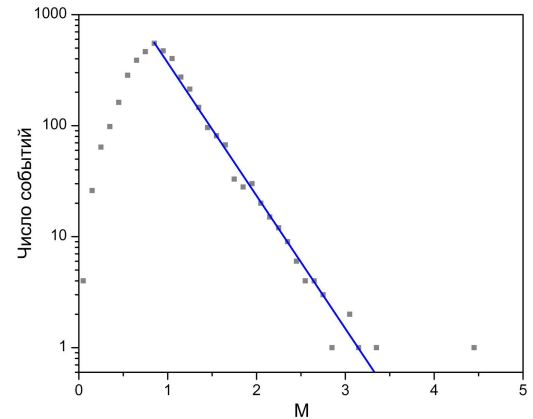


Рис. 10. График повторяемости для событий после начала истечения лавы на плато Холухраун (HOL) во время извержения вулкана Бардарбунга (BAR), временной период 29.08.2014 — 01.03.2015. Полученное значение: $b = 1.20$, стандартная ошибка: $SE = 0.03$

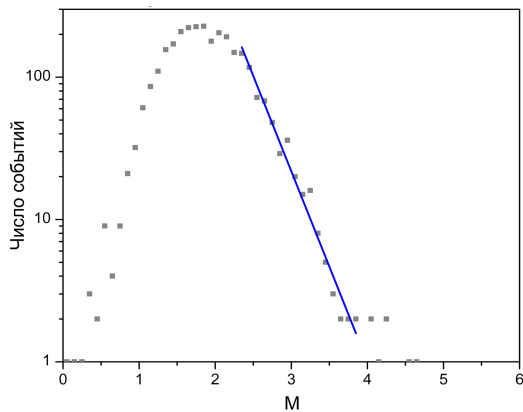


Рис. 9. График повторяемости для событий, приуроченных к выходу магмы на поверхность по рою трещин вулкана Бардарбунга (BAR), временной период 17.08.2014–29.08.2014. Полученное значение: $b = 1.34$, стандартная ошибка: $SE = 0.05$

лога.

На графике рис. 11, d примерно за 4.5 суток до начала извержения наблюдается ярко выраженная аномалия b -value, характерная для вулканических роев — резкое падение значения (среднее фоновое значение до извержения: $b = 1.5 \pm 0.4$, падение до значения $b = 0.52 \pm 0.10$, среднее значение после извержения $b = 1.56 \pm 0.26$). Большие колебания значений с 2005-го года по 2010-го год, вероятно, обусловлены малым числом событий в период до извержения 2015-го года.

Таким образом получено еще несколько свидетельств довольно известного явления — вулканических роев, а также показано, что это явление, вероятно, приурочено к движению магмы сквозь породы с раскрытием каналов под давлением.

2.2. Закон продуктивности

С использованием описанного выше метода была проанализирована продуктивность каталога Исландии. Так как удалось установить, что события извержения вулкана Бардарбунга (BAR) 2015-го года, в отличие от других извержений Исландии вносят значительный вклад в общую продуктивность каталога и искажают распределение (рис. 12), отдельно была рассмотрена часть каталога до 2014-го года, которую в большей степени можно считать отражающей тектоническую сейсмичность региона.

На рис. 12 видно, что влияние событий, приуроченных к извержению, приводит к отклонению от экспоненциального закона в сторону распределения Пуассона. Поэтому затем эти события исследовались отдельно. Для первой части каталога были получены результаты, аналогичные тем, что описаны для других регионов в книге [11]. А именно, наблюдается экспоненциальное распределение продуктивности при различных значениях магнитуд триггеров и относительных магнитуд (рис. 13). При этом наклон кумулятивного графика сохраняется при изменении магнитуд триггеров при постоянной относительной магнитуде ΔM , а при уменьшении ΔM наклон увеличивается.

Значение средней продуктивности для $\Delta M = 2$ $\Lambda_2 = 4.317$ сравнимо со значениями для других регионов, например, для глобального каталога ANSS ComCat $\Lambda_2 = 4.32$ [11]. Хотя в этой части каталога и преобладает, видимо, тектоническая сейсмичность, все же в ней может присутствовать сейсмичность и вулканической природы, поскольку эта часть выделена по времени, а не по пространству. Поэтому также был пространственно выделен регион Исландии, расположенный вдалеке от действующих вулканов, в котором не было вулканической активности за последние несколько тысячелетий (рис. 14).

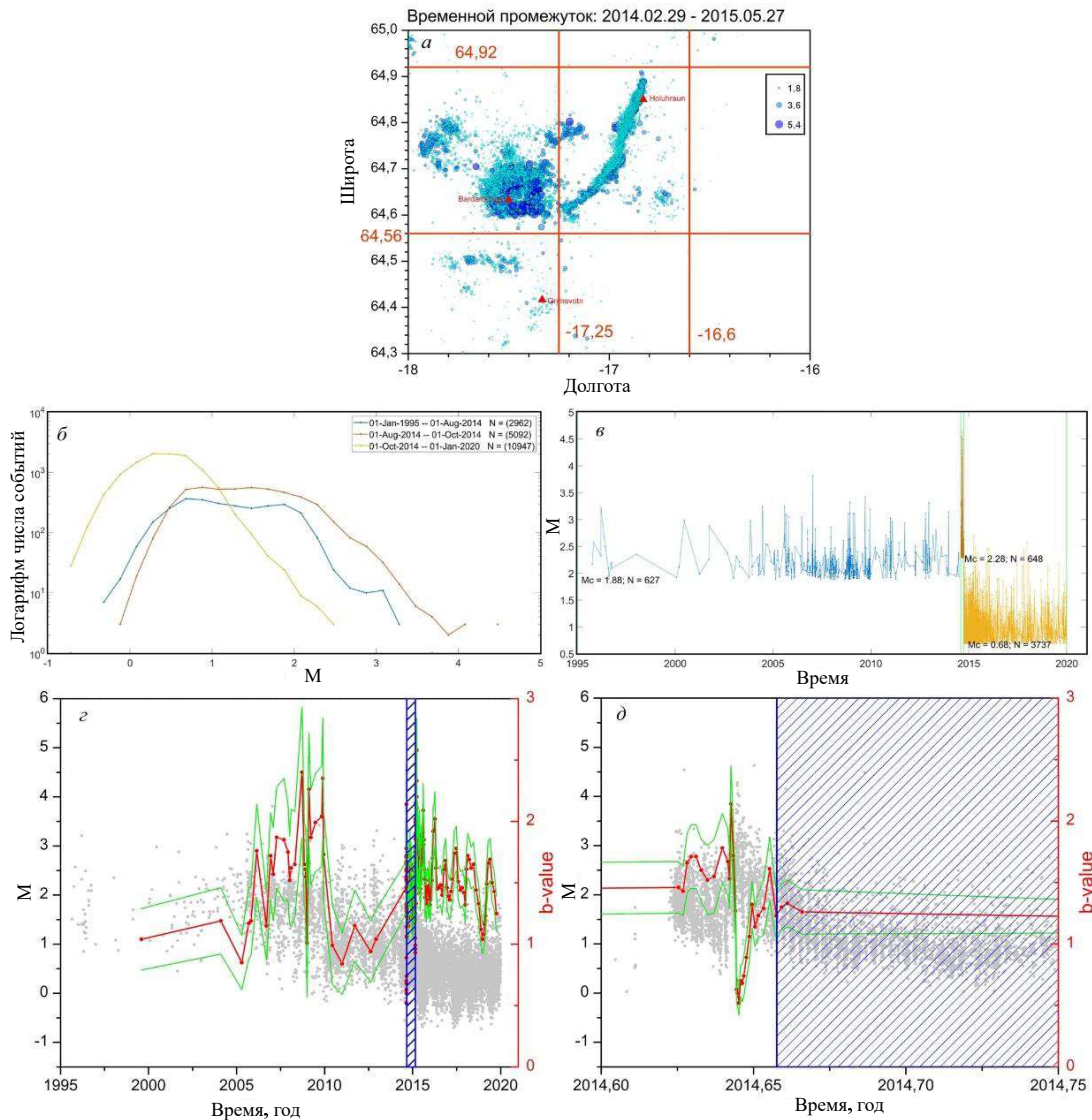


Рис. 11. На графиках (а — (г) представлен подробный анализ временных вариаций наклона графика повторяемости (*b-value*) для событий, приуроченных к движению магмы по рюю трещин во время извержения исландского вулкана Бардарбунга (BAR) 2015-го года (29.08.2014–27.02.2015). а — События, относящиеся к движению магмы по рюю трещин вулкана Бардарбунга (BAR). Черные точки — землетрясения. Красными линиями обозначены границы рассматриваемого региона. б — Графики повторяемости за промежутки до, во время и после извержения для оценки представительности. в — Распределение представительных событий во времени, по которым оценивается *b-value* в рассматриваемых промежутках времени. M_c — Представительная магнитуда в выбранном промежутке времени, N — число событий с магнитудой большей M_c . г — Временные вариации *b-value*. Серые точки — сейсмические события, красная линия — наклон графика повторяемости (*b-value*), зеленые линии — погрешность наклона графика повторяемости (*b-value*), синим обозначено извержение. д — Временные вариации *b-value*, приближен период перед извержением

Ниже представлена декомпозиция распределения расстояний до ближайшего соседа для этого региона (рис. 15).

Из рис. 15 видно, что для данной части каталога Исландии закон продуктивности также выполняется, причем пороговое значение близко к значению, полученному для части каталога за период времени до 2014-го года (с исключением влияния извержения вулкана Бардарбунга (BAR) 2015-го года).

Таким образом режим тектонической сейсмичности Исландии, видимо, удовлетворяет закону продуктивности и повторяет закономерности, полученные для других регионов.

Теперь перейдем к рассмотрению извержения Бардарбунга (BAR) 2015-го года. Как уже обсуждалось выше (разд. 2.1), при анализе вариаций *b-value* это извержение имеет смысл разбить на два процесса — обрушение кальдеры центрального вулкана и течение магмы

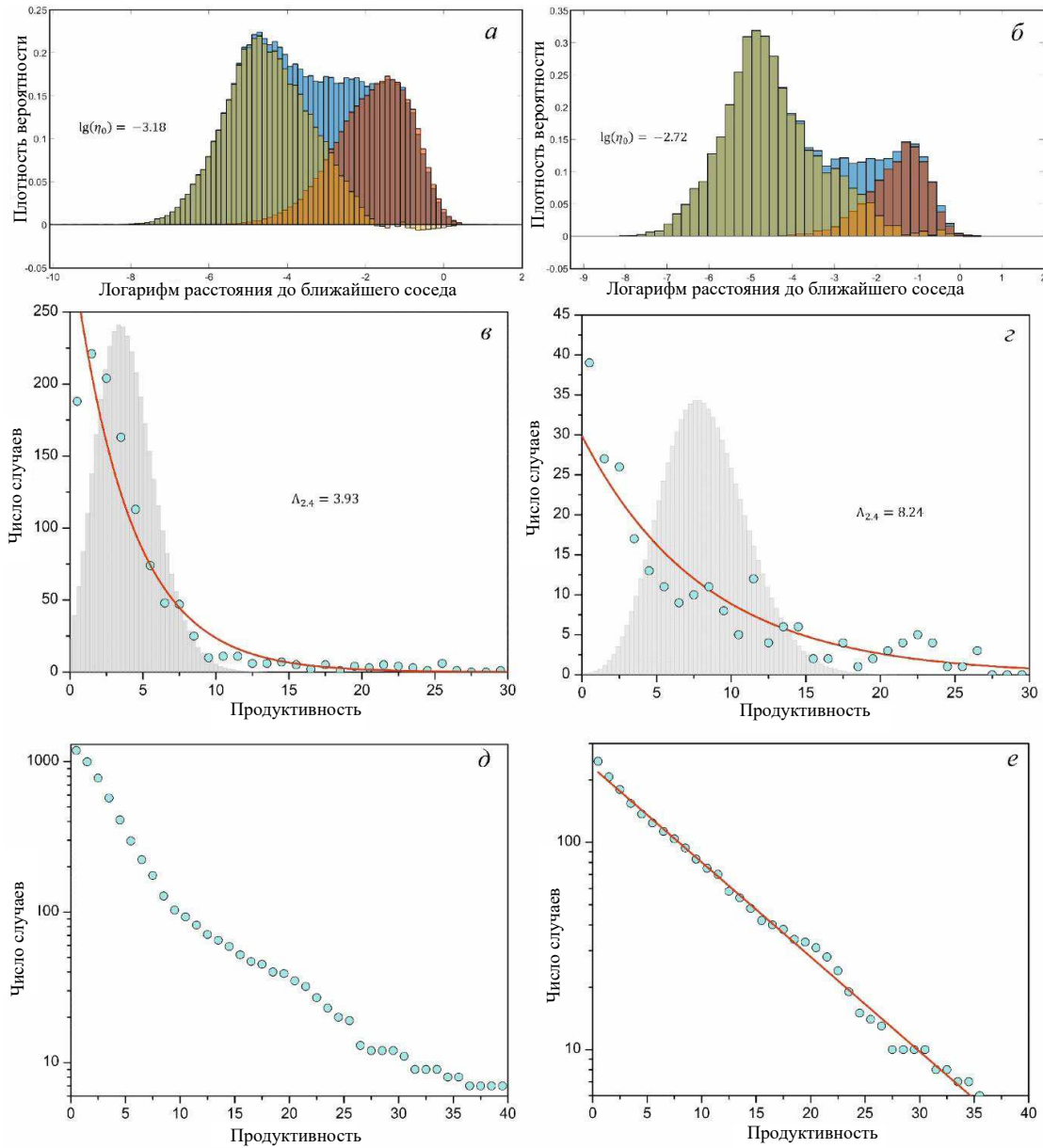


Рис. 12. *a, б* — декомпозиция распределений расстояний до ближайшего соседа: *a* — для полного каталога Исландии, *б* — для части каталога до 2014 года (исключено влияние извержения вулкана BAR), текстом на графиках указаны полученные пороговые значения функции близости. *в, г* — распределения продуктивности для тех же случаев, бирюзовые точки — реальные данные, красная линия — аппроксимация экспоненциальным распределением со средним значением равным реальному, серая гистограмма — распределение Пуассона с тем же средним значением. *д, е* — кумулятивные графики распределений *в, г* соответственно

по рою трещин к плато Холухраун (HOL) (рис. 5).

Для событий в кальдере, как уже описывалось в разд. 2.1, было принято решение рассматривать как представительный только правый пик графика повторяемости (рис. 6), следовательно представительная магнитуда $M_c = 3.85$, а $b = 0.87$.

Далее было построено распределение расстояний до ближайшего соседа для событий в период извержения вокруг центральной кальдеры, оказалось, что оно не имеет ярко выраженной бимодальности (рис. 16).

Также стоит отметить, что распределение расстояний до ближайшего соседа в этом же регионе вокруг центральной кальдеры за весь период времени в каталоге имеет два пика (рис. 17).

Это может свидетельствовать о том, что отсутствие второго пика — явление, связанное с выбранным периодом времени (период извержения), а не выбранной областью пространства.

Отсутствие второго пика может являться следствием того, что расстояния между кластеризованными со-

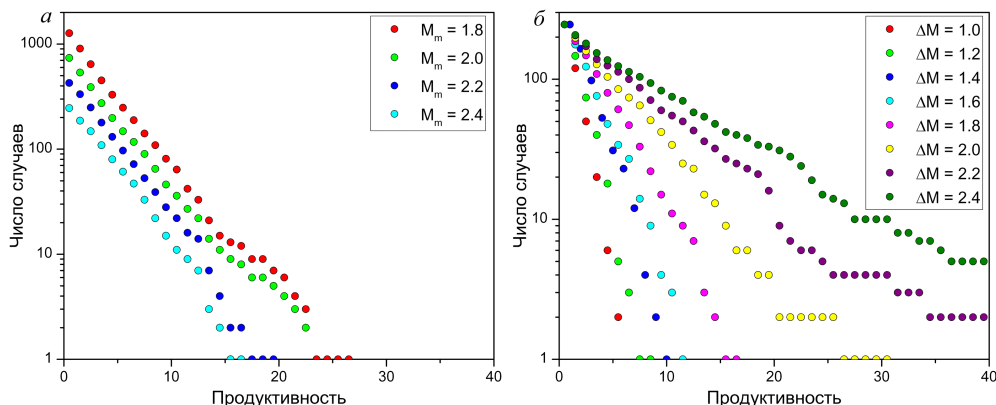


Рис. 13. Результаты анализа продуктивности для тектонической части каталога Исландии. *a* — изменения распределения продуктивности для разных магнитуд триггеров при постоянной относительной магнитуде $\Delta M = 1.8$. *b* — изменения распределения продуктивности для разных относительных магнитуд при постоянной магнитуде триггеров $M_m = 3.9$

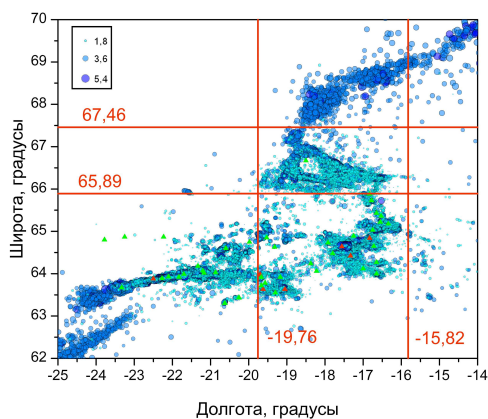


Рис. 14. События для региона Исландии с тектонической сейсмичностью. Красными линиями обозначены граница рассматриваемого региона. Кружки — землетрясения за весь период времени в каталоге, чем больше размер кружка и темнее цвет, тем больше магнитуда события; зеленые треугольники — вулканы, которые не извергались за последние несколько тысячелетий; красные треугольники — вулканы, на которых зафиксированы извержения в течение последнего тысячелетия

бытиями и фоновыми имеют близкие значения, и два пика сливаются в один, что не позволяет использовать описанную ранее методику определения порогового значения функции близости, и распределение продуктивности в таком случае получить затруднительно.

Аналогичный результат наблюдается для второго процесса — течения магмы по каналам. Причем распределение имеет только один пик для событий с 17 августа до начала истечения лавы (29 августа), но на распределении для последующих событий второй пик снова появляется (рис. 18).

Для распределения на (рис. 18, *z*) для расчета продуктивности можно использовать описанную методи-

ку. Для этой части событий отклонений от закона продуктивности не наблюдается (рис. 19).

Таким образом, причина отклонения от закона продуктивности для общего каталога заключалась в значительном отличии распределений расстояний до ближайшего соседа для извержения Бардарбунга (BAR) 2015-го года и остального каталога и, как следствие, не применимости порогового значения, определенного для общего каталога. Хотя продуктивность уже исследовалась для вулканически-активных регионов [11] подобного влияния извержений нигде не наблюдалось, точно также, как и другие извержения Исландии не искажают картины для общего каталога, это можно объяснить тем фактом, что в каталоге Исландии значительная часть событий с магнитудами более 3-х приходится на обсуждаемое извержение (рис. 20), поэтому при постепенном увеличении магнитуд триггеров эти события вносят все больший вклад в общую картину, а при условии, что к ним неприменимо пороговое значение, оцененное по полному каталогу, это приводит к отклонению от экспоненциального распределения.

2.3 Основные результаты работы

2.3.1 Вариации наклона графика повторяемости (*b* – value)

Получены свидетельства наличия вулканических роев, приуроченных к извержениям для вулканов Исландии, выражающиеся в характерных аномалиях *b-value*, согласующиеся с результатами других работ. Предположительно, удалось идентифицировать часть событий во время извержения вулкана Бардарбунга (BAR) 2015-го года, как вулканические события А-типа — события, происходящие при разрушении пород под давлением магмы, и обнаружить приуроченную к ним ярко выраженную аномалию *b-value*, характерную для вулканических роев.

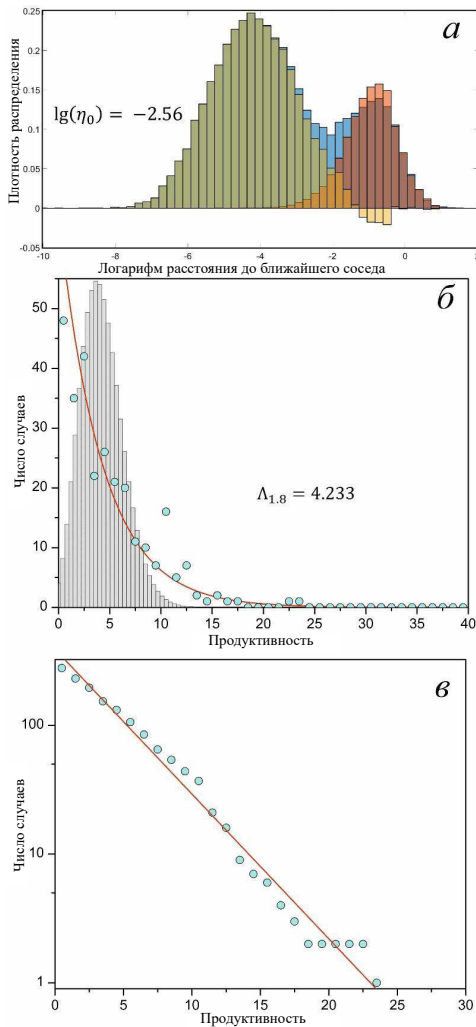


Рис. 15. Анализ продуктивности для части каталога с тектоническим режимом сейсмичности. а — декомпозиция распределений расстояний до ближайшего соседа на фоновый и кластеризованный пики. Голубая гистограмма — плотность реального распределения, красная гистограмма — аппроксимирует фоновый пик, желтая — кластеризованный. Текстом на графике указано полученное пороговое значение функции близости. б — распределение продуктивности при $\Delta M = 1.8$, бирюзовые точки — реальные данные, красная линия — аппроксимация экспоненциальным распределением со средним значением равным реальному, серая гистограмма — распределение Пуассона с тем же средним значением. в — кумулятивный график того же распределения

2.3.2 Продуктивность землетрясений

За период времени, покрываемый качественным сейсмическим каталогом, значительное влияние на общую картину оказывало только извержение вулкана Бардарбунга (BAR) 2015-го года, поэтому каталог был разделен на две части: первая — события за исключением событий, приуроченных к этому извержению, вторая — только события, приуроченные к извержению.

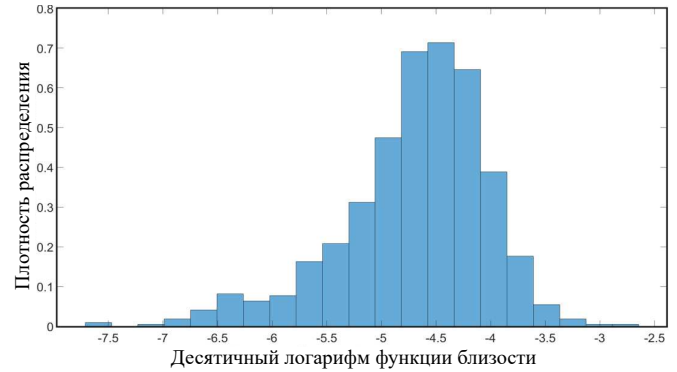


Рис. 16. Распределение расстояний до ближайшего соседа для событий вокруг центральной кальдеры в период извержения вулкана Бардарбунга (BAR) 2015-го года

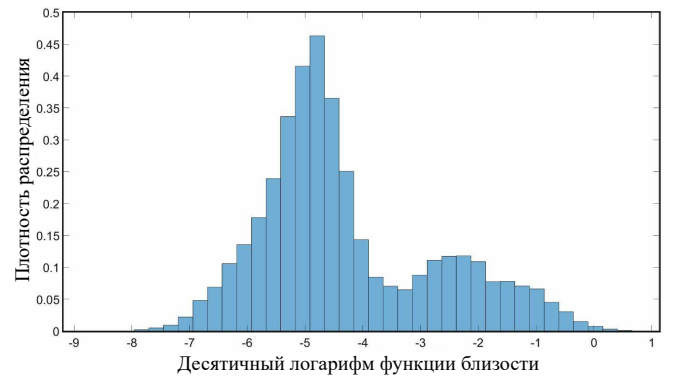


Рис. 17. Распределение расстояний до ближайшего соседа для событий вокруг центральной кальдеры вулкана Бардарбунга (BAR) за весь период времени в каталоге

Первая часть, предположительно, в основном отражает тектоническую сейсмичность региона, вторая является совокупностью нескольких процессов, из которых удалось выделить составляющую вулканической сейсмичности. Показано, что распределение расстояний до ближайшего соседа значительно отличается для тектонической и вулканической сейсмичностей Исландии. Последняя, видимо, не имеет ярко выраженной бимодальности распределения, что не позволяет достоверно произвести декомпозицию распределения на фоновую и кластеризованную части, используемым в работе методом. Это не дает сделать однозначного вывода о выполнении закона продуктивности собственно для вулканических землетрясений Исландии.

На другой части каталога показано, что закон продуктивности землетрясений, выполняется для тектонической сейсмичности Исландии, а также воспроизводятся закономерности, полученные для других регионов. Это также было дополнительно подтверждено на части каталога, относящейся к области Исландии, где отсутствовала вулканическая активность за последние несколько тысячелетий.

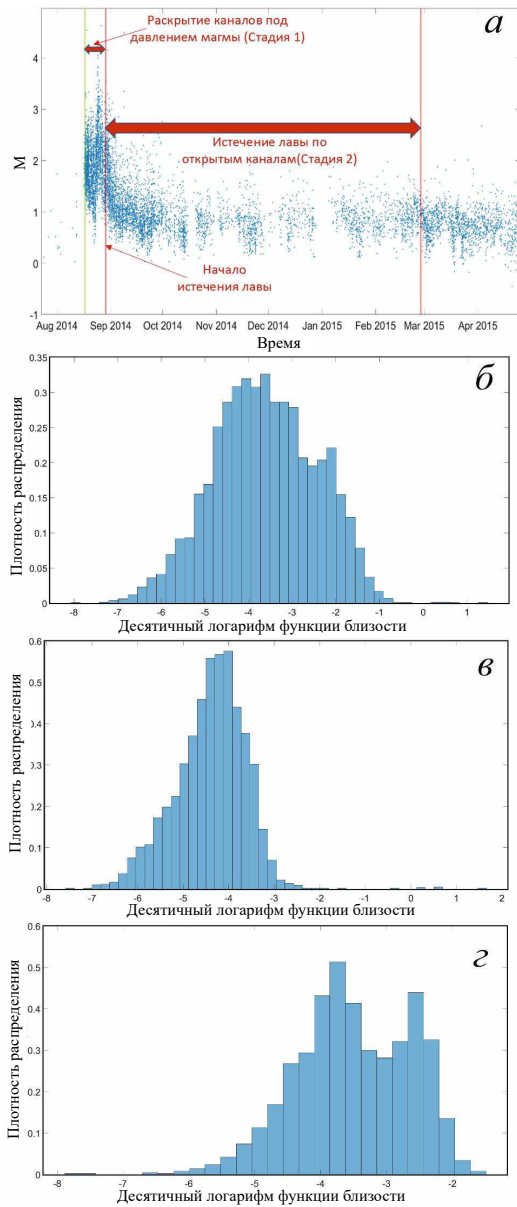


Рис. 18. *a* — распределение событий во времени для рассматриваемой области пространства. Красными линиями показаны времена начала и конца извержения. Зеленая линия соответствует дате 17.08.2014 — начало процесса. *б* — распределение расстояний до ближайшего соседа для событий в рое трещин за весь период извержения (17.08.2014 — 01.03.2015). *в* — только за период, связанный с выходом магмы по каналам (17.08.2014–29.08.2014), *г* — за период после начала истечения лавы до конца извержения (29.08.2014–01.03.2015)

3. ВЫВОДЫ

1. Известные из литературы особенности режима вулканической сейсмичности — вулканические рои — наблюдаются также для вулкана Исландии Бардарбунга. Показано, что они, вероятно,

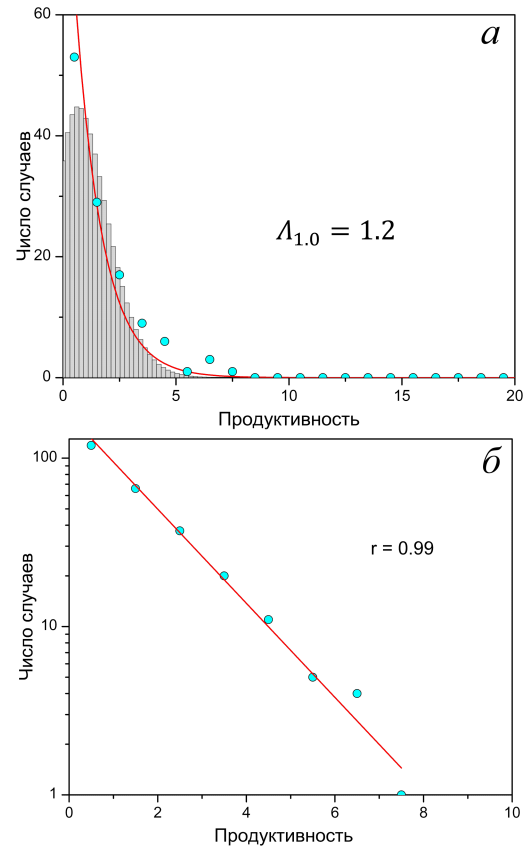


Рис. 19. *a* — распределение продуктивности для событий за период после начала истечения лавы до конца извержения на плато Холухраун (HOL) (29.08.2014–01.03.2015), *б* — кумулятивный график того же распределения

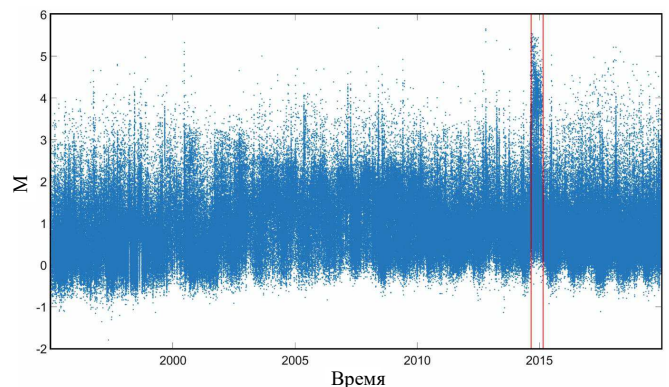


Рис. 20. Распределение всех событий в каталоге во времени. Красными линиями обозначено извержение вулкана Бардарбунга (BAR) 2015-го года

приурочены к процессу раскрытия трещин в породе под давлением магмы.

2. Выявленное в рифтовой зоне (Исландия) подчинение тектонической сейсмичности закону продуктивности землетрясений, установленному ранее для зон других тектонических типов, свиде-

тельствует о фундаментальности этого статистического закона.

3. Обнаруженное для собственно вулканической сейсмичности (приходящейся на интервал извержения) отсутствие характерной для тектонической сейсмичности бимодальности распределения обобщенных расстояний до ближайшего соседа свидетельствует об отличии режима группирования собственно вулканических землетрясений от группирования тектонических землетрясений. Вопрос о природе этого отличия требует проведения специального исследования, однако уже сейчас можно предположить, что отличие может быть обусловлено механизмами вулканических землетрясений, существенно отличающимися от механизма тектонических землетрясений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа носит характер натурального эксперимента в том смысле, что анализируются данные, полученные в естественных условиях, а ожидаемым результатом было получение новой «экспериментальной точки», по которой в совокупности с «точками» других

натурных и лабораторных экспериментов будет в дальнейшем строиться теория.

Подробная информация об извержениях с сайта геофизической службы Исландии позволила выделить по времени и пространству из исландского каталога части, в которых, вероятно, преобладает сейсмичность вулканической природы. Это позволило проанализировать тектонический и вулканический сейсмические режимы для одного и того же региона. В результате работы получены очередные свидетельства уже известных закономерностей (аномалии *b-value* вулканических роев); подтверждены результаты исследований других регионов на примере Исландии (закон продуктивности для тектонической сейсмичности); а также обнаружены новые явления (отсутствие бимодальности на распределении расстояний до ближайшего соседа для вулканической сейсмичности Исландии).

Выражается благодарность доктору физ.-мат. наук В.Б. Смирнову за помощь в получении данных и предоставление необходимого программного обеспечения, а также за руководство в проведении исследования, а также доктору физ.-мат. наук П. Н. Шебалину за консультирование в вопросах продуктивности землетрясений.

-
- [1] Гордеев Е.И. // Вестник Дальневосточного отделения РАН. 2007. № 2. С. 38.
 - [2] Minakami T. // Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo. 1960. **38**. P. 497.
 - [3] Gutenberg, B., Richter C.F. // Bull. Seismol. Soc. Am. 1944. **34**. P. 185.
 - [4] Попандопуло Г.А. // Физика Земли. 2018. № 4. С. 79.
 - [5] Потанина М. Г., Смирнов В. Б., Бернар П. // Физика Земли. 2011. № 7. С. 54.
 - [6] Jacobs K.M., McNutt S.R., Power J.A. // US Geol. Surv. Prof. Pap. 2010. **1769**. P. 1.
 - [7] Gresta S., Patanu G. // PAGEOPH 1983. **121**, P. 287.
 - [8] Gresta S., Patanu G. // PAGEOPH 1983. **121**. P. 903.
 - [9] Novelo-Casanova D.A., Martınez-Bringas A., Valdıs-Gonzbleza C., // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2006. **152**. P. 347.
 - [10] Chiba Keita, Shimizu Hiroshi // Earth, Planets and Space. 2018. **70**.
 - [11] Баранов С.В., Шебалин П.Н. Закономерности постсейсмических процессов и прогноз опасности сильных афтершоков, М.: РАН, 2019.
 - [12] Shebalin P.N., Narteau C., Baranov S.V. // Geophysical Journal International. 2020. **222**, Issue 2, August. P. 1264.
 - [13] Einarsson, Páll. // Jökull. 2008. **58**. P. 35.
 - [14] Ragnar Stefánsson. *Advances in Earthquake Prediction Research and Risk Mitigation*. Springer Berlin, Heidelberg, 2011. ISBN 978-3-540-47569-9.
 - [15] Björnsson, Sveinbjörn, Einarsson, Páll. *Seismicity of Iceland*. 1974.
 - [16] Freysteinn Sigmundsson *Iceland Geodynamics: Crustal Deformation and Divergent Plate Tectonics*. Springer Berlin, Heidelberg, 2006. eBook ISBN: 978-3-540-37666-8.
 - [17] Guðrún Larsen, Guðmundsson M.T. Institute of Earth Sciences - Nordvulk, University of Iceland. November 15, 2019.
 - [18] Смирнов В.Б. // Геофизические исследования. 2009. **10**, № 2. С. 7.
 - [19] Zaliapin I., Gabrielov A., Keilis-Borok V.I., Wong H. // Phys. Rev. Lett. 2008. **101**. 018501.
 - [20] Baiesi Marco, Paczuski Maya. // Phys. Rev. E. Statistical, nonlinear, and soft matter physics. 2004. **69**. 066106.
 - [21] Zaliapin I., Ben-Zion Y. // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2013. **118**. P. 2847.
 - [22] Riel B., Milillo P., Simons M. Lundgren P., Kanamori H., Samsonov S. // Geophysical Journal International. 2015. **202**. P. 446.
 - [23] Shuler A.E., Nettles M., Ekstrum G. // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2013. **118**. P. 138.
-

Features of the volcanic seismicity regime on the example of the eruption of the Icelandic volcano Bárðarbunga in 2015

E. M. Grekov

*Department of the Earth Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia
E-mail: grekov.em16@physics.msu.ru*

Volcanic seismicity has quite significant differences from tectonic seismicity, consisting in a different nature: here, instead of the mechanism of accumulation and release of stresses, there is destruction of the rock under the pressure of magma, low-frequency seismic waves arising from vibrations of a large volume of magma, as well as events of an explosive nature, when hot gases rush to the surface. Therefore, the study of the regime of volcanic seismicity is of particular interest.

The seismic catalog of Iceland from 1995 to 2019 was analyzed in the study. The seismic regime of the Icelandic volcano Bárðarbunga (BAR) during the eruption is significantly different from the rest of the seismicity of the region. Through detailed reports from the Icelandic meteorological service, it was possible to establish that this difference was mainly due to two processes timed to the eruption: the collapse of the central caldera and the outflow of lava along a fissure swarm. Thus, it was possible to identify the nature of some of the events in the catalog as volcanic.

As a result of the analysis of variations of *b-value* for the process of opening cracks under magma pressure, an anomaly of the *b-value* known from the literature was revealed, which is typical for so-called volcanic swarms. Thus, evidence was obtained in favor of the hypothesis that such anomalies, often preceding eruptions, are associated exactly with processes of this type.

Also, using the Zaliapin– Ben-Zion nearest neighbor method, the grouping of events associated with the eruption was analyzed, and a significantly lower clustering of events was found compared to tectonic regimes, which is probably also due to the difference in the nature of these seismicities.

PACS: 91.30.Dk, 91.30.Px.

Keywords: volcanic seismicity, *b-value*, earthquake productivity law, volcanic swarms.

Received 14 July 2022.

Сведения об авторе

Греков Евгений Михайлович — магистр кафедры физики Земли; e-mail: grekov.em16@physics.msu.ru.
