

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Шакировой Александры Альбертовны

«СЕЙСМИЧНОСТЬ ВУЛКАНА КИЗИМЕН (П–ОВ КАМЧАТКА) ПРИ ИЗВЕРЖЕНИИ В 2010–2013 ГОДАХ»,

представленной на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

Диссертация А.А.Шакироваой посвящена особенностям сейсмических эффектов, предварявших и сопровождавших извержение вулкана Кизимен. Работа представляет большой интерес, так как извержение этого вулкана впервые было зарегистрировано сетью сейсмических станций. Анализ сейсмических записей, сопровождавших извержение, позволил выделить особый сейсмический режим «drumbeats», ранее не регистрировавшийся при извержениях вулканов полуострова Камчатка.

Актуальность работы заключается в сопоставлении сейсмических сигналов с этапами подготовки и извержения вулкана. Мониторинг эруптивной активности вулкана, осуществляемый по спутниковым данным, данным фотосъемки на ближайшей сеймостанции, а также по данным полевых исследований, совмещенный с инструментальными данными позволяет дифференцировать физические механизмы, приводящие к разным типам сейсмических сигналов. Для объяснения режима «drumbeats» в работе предлагается механизм генерации, связанный с движением лавового потока по склону вулкана, что определяет **научную новизну** диссертации, поскольку ранее считалось, что этот режим характеризует только лишь выжимание экструзивных куполов на вулканах с андезитовым и дацитовым составом лав.

Теоретическая и практическая значимость работы не вызывает сомнений. Результаты работы могут быть использованы при анализе извержений не только вулкана Кизимен, но и других вулканов, характеризующихся вязкими лавами.

Материалы и методы. В основу работы положены записи региональной сети сейсмических станций и данные системы комплексного мониторинга вулканов Камчатского филиала Федерального исследовательского центра Единая Геофизическая служба РАН. А.А.Шакирова принимала участие в установке временной сейсмической станции вблизи вулкана Кизимен во время его извержения. Соискателем освоены основные методы обработки сейсмических записей, среди которых локализация гипоцентров, локализация слабых землетрясений поляризационным методом, анализ представительности каталога, анализ временных вариаций b-value, кросс-корреляционный анализ волновых форм, определение их спектрального состава.

Фактический материал является представительным, что позволило сделать обоснованные выводы. **Защищаемые положения** сформулированы весьма кратко:

1. Детальный анализ последовательности вулcano–тектонических землетрясений перед извержением вулкана Кизимен в 2010–2013 годах выявил уменьшение наклона графика повторяемости с 1.1 до 0.85 в течение 11 месяцев, что интерпретируется, как увеличение напряжений в среде в районе вулкана.
2. Выделены две пространственные области слабых землетрясений с энергетическими классами $K_s < 5$, возникшие перед извержением вулкана Кизимен, отражающие подъем магмы на глубинах менее 8 км.
3. Выделен тип сейсмического режима «drumbeats», обусловленный движением вязкого лавового потока во время извержения вулкана Кизимен в 2010–2013 гг., в отличие от известного ранее типа, генерируемого выжиманием вершинной экструзии.

В защищаемых положениях в качестве замечания следует отметить весьма расплывчатое выражение «увеличение напряжений». Кроме того, материал, проанализированный в диссертации, гораздо богаче и, на взгляд оппонента, предполагает возможность вынести на защиту и другие выводы.

Основные результаты исследования были **представлены** на международных сейсмологических школах и совещаниях, семинарах Геофизической Службы и Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, а также **опубликованы** в 7 статьях, в том числе в 4 статьях в ведущих научных рецензируемых журналах, входящих в перечень журналов ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и двух приложений, содержит 156 страниц текста, включая 57 рисунков и 12 таблиц. Список литературы включает в себя 149 наименований. Диссертация написана хорошим языком, легко читается, имеет логичную структуру.

Анализ диссертационной работы.

Глава 1 посвящена типизации вулканических землетрясений и описанию сейсмического режима «drumbeats». Приводится классификация землетрясений по данным наблюдений на вулканах мира, предложенная разными авторами. Рассматриваются особенности сейсмических сигналов на разных стадиях подготовки и извержения вулканов, даются объяснения генерирующих их механизмов. Особое внимание в главе уделяется режиму «drumbeats», поскольку именно этот тип землетрясений рассматривается далее как особенность при извержении вулкана Кизимен. Автор утверждает, что по литературным данным известно семь вулканов с андезитовым и дацитовым составом лав, на которых наблюдался сейсмический режим «drumbeats». В разделе 1.2 приводится описание этих вулканов, а в разделе 1.3 – проявления этого режима во время их извержений. Возможно,

целесообразно было бы объединить эти два раздела, чтобы для каждого вулкана была информация в одном месте. В целом, глава свидетельствует о тщательной проработке автором имеющихся публикаций и умении вычлнять и резюмировать основные результаты проведенных ранее исследований.

В **Главе 2** изложены данные о системе сейсмического мониторинга вулканов Камчатки, а также о методике обработки сейсмических записей. Дано подробное описание Камчатской региональной сети станций, а также пунктов комплексных наблюдений на вулканах. Отдельно рассматривается регистрация сейсмических событий в районе вулкана Кизимен в 2010-2013 гг. На стр.38 сноска под номером 2 в тексте читается как квадрат после скобок. Лучше было бы ее поставить не после скобок или рядом с обозначением класса K_s , а после слов «энергетического класса», чтобы не вводить в заблуждение читателей. Необычно представление региональной скоростной модели для Камчатки, где вместо V_s или V_p/V_s приводятся значения V_{s-p} .

Глава 3 посвящена описанию вулкана Кизимен: его геолого-тектоническому положению, глубинному строению, извержению и формированию лавового потока в 2010-2013 гг. Глава легко читается, в ней нет излишне подробного описания геологического строения и тектонического положения вулкана, но в то же время дается ясное представление об истории развития вулкана, а также об этапах подготовки и извержения в 2010-2013 гг.

В **Главе 4** описывается сейсмичность вулкана Кизимен до и во время извержения. В данной главе рассматриваются вулcano-тектонические землетрясения, их локализация и частотно-магнитудное распределение. Соискатель анализирует пространственно-временное распределение эпицентров и гипоцентров и выделение энергии по данным каталога КФ ФИЦ ЕГС РАН. Выявлен сейсмогенный объем до извержения и погружение сейсмогенной зоны в ЮЗ направлении до глубины 8 км во время основного этапа извержения. Результаты локализации слабых землетрясений ($K < 5$) поляризационным методом по данным только ближайшей к вулкану станции показали две зоны сейсмичности под вулканом. При этом оценка глубины осуществлялась по формуле 2.1, а ошибка определения глубины очага принята 2 км, исходя из сравнения решений гипоцентров слабых землетрясений и толчков с $K > 9$ по стандартной методике. Непонятно, ошибка 2 км это систематическая ошибка? При описании стандартной методики локации гипоцентров, кстати, не был указан доверительный интервал. Кроме того, в Табл.4.1 приводятся квадратичное отклонение в определении координат очагов района влк.Кизимен за 2009-2013 гг. Обращает на себя внимание большая по величине ошибка для горизонтальных координат по сравнению с глубиной гипоцентра. Обычно, эпицентр определяется с меньшей ошибкой, а тут наоборот. Чем обусловлен этот факт?

На стр.67 дается неподтвержденное и достаточно общее утверждение о формировании сейсмогенной зоны под действием регионального и локального полей напряжений, при этом автор отмечает, что СВ направление (направление чего?) отражает субрегиональное напряжение. Когда речь идет о полях напряжений, то дается ориентация главных осей тектонических напряжений и их соотношение, характеризующее режим напряженно-деформированного состояния (растяжение, сжатие, сдвиговый режим и т.д.). В работе же не приводится никаких сведений о региональном и локальном полях напряжений. Абзац с аналогичным текстом повторяется и на стр.79. Вполне достаточно было оставить утверждение о том, что возникшая сейсмогенная зона обусловлена началом интрузивного процесса на глубине не более 8 км и не привлекать поля напряжений.

Раздел 4.3 посвящен изменению во времени угла наклона графика повторяемости. Использование изменения *b*-value в качестве косвенного индикатора уровня напряжений достаточно широко используется в мировой практике, хотя в научной среде до сих пор нет консенсуса по статистической значимости пространственно-временных вариаций этого параметра: отражают ли они артефакты каталога (Amorese et al., 2010; Frohlich and Davis, 1993; Kagan, 1999, 2002, 2010; Shi and Bolt, 1982) или же действительно обусловлены физическими процессами в земной коре (Bachmann et al., 2012; Mogi, 1962; Mori and Abercrombie, 1997; Scholz, 1968; Schorlemmer et al., 2005; Wiemer and Wyss, 1997, 2002). Надежность определения *b*-value определяется, в том числе, и размером выборки. В диссертационной работе выборки состоят из 1000 событий с перекрытием 200 землетрясений, что более чем достаточно. В результате было выявлено значимое уменьшение наклона графика повторяемости перед извержением. На стр.74 дана неудачная формулировка «Уменьшение значения *b* приводило к хрупкому разрушению горных пород и миграции вязкой лавы на поверхность». Очевидно, изменение угла наклона только лишь косвенно отражает процессы, связанные с движением магмы и лавы, но не вызывает его. Далее, на стр.76 делается предположение, что геомеханические процессы в районе вулкана сопровождалось сжатием массива горных пород и определяли сейсмичность и деформацию недр. Данное предположение обосновывается ссылками на лабораторные опыты, в которых показана связь пониженного значения *b*-value с увеличением напряжений. Однако, возрастание напряжений или скорости деформации не определяет тип поля напряжений, поэтому в данном контексте говорить именно о сжатии горных пород не совсем корректно. Если речь идет именно о режиме сжатия, то как тогда объясняется механизм очага сбросового типа для сильнейшего землетрясения 27.11.2010 г. с $M_L=5.2$?

В Главе 5 рассматриваются сейсмические сигналы, сопровождавшие извержение вулкана Кизимен, за исключением вулcano-тектонических землетрясений, которым была посвящена предыдущая глава. Среди таких сигналов выделяются спазматическое

вулканическое дрожание, эксплозивные землетрясения, сейсмические события от пирокластических потоков и обвалов, а также режим «drumbeats». Несомненными достоинствами Главы 5 являются иллюстрации, показывающие непосредственно сейсмические записи выделенных сигналов, а также сопоставление сейсмических сигналов с данными акустического мониторинга и кадрами фото- и видеонаблюдения, что позволило надежно увязать тип сигнала с вулканическими событиями. Кроме того, для всех видов сейсмических сигналов приведены спектрограммы.

Для вулканического дрожания различия в спектральном составе в разные периоды времени объясняются разной степенью вязкости магмы и выжимающихся блоков лавы. Не подвергая сомнению вывод о влиянии механических параметрах магмы на излучаемый сигнал, следует отметить, что вариативность спектрального состава вулканического дрожания может объясняться также эффектами прохождения сейсмических волн через гетерогенные вулканические структуры (Ereditato, Luongo, 1994; Ferrazzini et al., 1991; Konstantinou and Schlindwein, 2002; Wegler, Seidl, 1997 и др.). Помимо сейсмических записей пирокластических потоков, соискателю удалось выделить и охарактеризовать сейсмические сигналы от автоэксплозивных каменных лавин и обвалов, характеризующих обрушение части экструзивного купола и блоков лавы с лавового потока.

Большая часть Главы 5 посвящена характеристике сейсмического режима «drumbeats», который характеризуется мультиплетами квазипериодических землетрясений с почти постоянной энергией и длительностью от нескольких минут до нескольких часов. Выделено три типа режима «drumbeats» в зависимости от генерирующего источника. Для обоснования этого вывода необходима надежная локализация источников. К сожалению, в диссертации не обсуждается локализация землетрясений режима «drumbeats III», хотя бы на завершающем этапе извержения, после ввода в эксплуатацию станции TUMD, чтобы подтвердить приуроченность очагов к вершине вулкана. Основное внимание сосредоточено на землетрясениях режимов «drumbeats I» и «drumbeats II», предположительно связанных с продвижением фронта двух лавовых потоков. Здесь опять возникают вопросы к точности определения гипоцентров, при этом вертикальная ошибка меньше в два раза горизонтальной. Вытянутость области эпицентров в направлении ЮВ-СЗ диссертант объясняет значительной ошибкой в определении гипоцентров землетрясений и систематической ошибкой вследствие отсутствия детальной скоростной модели. Судя по Главе 4, эпицентры вулканотектонических землетрясений, локализованные по такому же набору станций и той же скоростной модели, вытягивались в направлении ЮЗ-СВ, тогда непонятно, почему при локализации очагов режима «drumbeats» автор говорит о возможной систематической ошибке, а в предыдущей главе – нет. Релокализация землетрясений мультиплета № 10 с использованием скоростной модели для вулканических районов привела к более компактной

области эпицентров, также вытянутой в направлении ЮВ-СЗ, но по гораздо меньшему числу событий. Для режима «drumbeats II» по данным временной станции вообще локализовано только три землетрясения. Полоса эпицентров действительно «подсекает» фронт лавового потока, но остается неясным вопрос с ее вытянутостью и протяженностью, выходящей за пределы потока - артефакт это или реальное распределение эпицентров. В защиту соискателя следует сказать, что сложности в локализации гипоцентров в данных обстоятельствах носят объективный характер. Кроме того, связь между режимами «drumbeats I» и «drumbeats II» и продвижением фронта лавового потока обосновывается также на разнице времен вступлений t_S - t_P на станциях KZV и TUMD и разнице вступления волны P на этих станциях, расположенных на разные стороны от вулкана. При сопоставлении суточной скорости смещения лавового потока по сейсмическим данным и по реперным точкам при натурных измерениях наблюдается соответствие величин (таблица 5.6, последний столбец), что также свидетельствует в пользу связи землетрясений «drumbeats» с продвижением фронта потока. Однако, расчеты параметров очагов и величины подвижки через энергетические классы вызывают сомнение в обоснованности использования корреляционных соотношений. Приведенные формулы из работы (Гусев, Мельникова, 1990) были получены для диапазона классов 11-14, тогда как в рассматриваемой работе оцениваются параметры очагов слабых землетрясений ($K=4-7$), кроме того, не учитывался коэффициент, характеризующий механизм очага.

В последнем разделе Главы 5 автор диссертации предлагает модель, обеспечивающую автоколебательный процесс движения вязкого лавового потока по склону с генерацией сейсмического режима «drumbeats». В модели в качестве источника квазипериодических колебаний предлагается механизм «stick-slip» при срыве отдельных блоков лавового фронта под напором стационарного поступления лавового материала. Механизм «stick-slip», генерирующий сигналы типа «drumbeats», действительно, считается основным при движении магмы вдоль стенок канала (напр., Iverson et al., 2006; Kendrick et al., 2014), но трудно принять тот факт, что при продвижении и разрушении фронта лавового потока по склону с меняющейся топографией генерируются квазипериодические сигналы с высокой степенью подобия волновых форм. Тем не менее, предложенная феноменологическая модель имеет место быть, подтверждена математическим моделированием (Parovik et al., 2022) и может являться предметом дальнейших дискуссий среди вулканологов и сейсмологов.

В целом, в диссертации представлен обширный фактический материал, собранный и обработанный с участием А.А.Шакировой с использованием ряда современных методов сейсмологической практики. Помимо результатов анализа данных и обоснованных выводов

в диссертации предпринята попытка обосновать модель генерации режима «drumbeats», что является показателем научного поиска диссертанта.

Заключение:

Диссертационная работа А.А.Шакировой является завершенным научным исследованием на актуальную тему и выполнена на высоком научном уровне. Автореферат и публикации отражают содержание диссертационной работы. Защищаемые положения вполне обоснованы.

Указанные в отзыве замечания носят, преимущественно, редакционный характер и не снижают научную значимость диссертационной работы А.А.Шакировой. Диссертация отвечает требованиям Положения о порядке присуждения научных степеней, утвержденных Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 с изменениями. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

Таким образом, соискатель Александра Альбертовна Шакирова заслуживает присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

Радзиминович Наталья Анатольевна


кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории инженерной сейсмологии и сейсмогеологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук.

Адрес: 664033, г.Иркутск, ул.Лермонтова, 128, www.crust.irk.ru;

тел./факс +73952427000; nradzim@crust.irk.ru; тел.+79642160520

Я, Радзиминович Наталья Анатольевна, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

18 августа 2022 г.

 / Радзиминович Н.А./

