УДК 550.34:551.21

ПРОБУЖДЕНИЕ (2017–2019 SEISMIC&MAGMATIC UNREST) УДИНСКИХ ВУЛКАНОВ (КАМЧАТКА) ПО СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Кугаенко Ю.А.¹, Салтыков В.А.¹, Воропаев П.В.¹, Павлов В.М.¹, Кулаков И.Ю.², Комзелева В.П.²

¹Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, ku@emsd.ru ²Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск

Рассматривается развитие нового, не проявлявшего активности ранее, сейсмогенерирующего объема под потухшим Удинским вулканическим комплексом (Камчатка, Ключевская группа вулканов). Информационной основой исследования являются записи региональных и временных сейсмических станций и камчатский каталог землетрясений. Обсуждаются результаты локальной сейсмотомографии, анализа сейсмических записей и пространственно-временного распределения сейсмичности. Сейсмическая активизация 2017–2019 гг. интерпретируется как пробуждение магматической системы под вулканом Большая Удина.

Общие сведения об Удинских вулканах

Удинский вулканический комплекс (рис. 1) - это два потухших стратовулкана Большая и Малая Удина и несколько голоценовых экструзий в юго-восточной части Ключевской группы вулканов [2, 5, 8]. Стратовулканы расположены на едином тектоническом нарушении СЗ простирания, в зоне сочленения трех крупных тектонических структур, испытавших в верхнечетвертичное время вертикальные подвижки различных знаков и амплитуд. Вулканы Большая и Малая Удина сформировались в основном в верхнем плейстоцене. Состав пород преимущественно андезиты (~80%) и базальты (~20%). История формирования Удинских вулканов показывает, что их эруптивная активность была прерывистой и неоднократно сменялись периодами покоя. Заложение Малой Удины предположительно связано с прорывом нового канала в плоскости тектонического нарушения, единого для Удинских вулканов и является лишь незначительным эпизодом на фоне деятельности Большой Удины, длительность истории формирования которой оценивается в 15–17 тыс. лет [8]. Завершающим этапом деятельности Удинских стратовулканов является выжимание экструзивных куполов после очередного обоюдного периода покоя. Экструзии сформированы рогообманковыми андезитами. Возраст экструзий оценивается в верхним-средним голоценом (в первые единицы тыс. лет). Состав пород Удинских вулканов предполагает формирование их исходной магмы в коровой обстановке, то есть представляется вероятным существование единого малоглубинного промежуточного магматического очага (на глубине ~20 км) наряду с мантийным магматическим источником [2].

Удинская сейсмическая активизация – seismic unrest

С октября 2017 г. под Удинскими вулканами развивается малоглубинная сейсмическая активизация [7]. С октября 2017 г. по июль 2019 г. на глубине преимущественно до 20 км зарегистрировано более ~2.6 тыс. землетрясений с $1 \le ML \le 4.3$ (рис. 16). Впервые за время детальных сейсмологических наблюдений сейсмичность этого района неоднократно спорадически усиливалась до *высокого* – экстремально высокого уровня по шкале СОУС'09 [6].

В 2017–2019 гг. активизация развивалась нелинейно, с усилением, уровень сейсмичности носил пульсирующий характер. С середины 2018 г. наблюдается миграция сейсмичности в южном направлении, однако максимальные значения параметров сейсмического режима тяготеют к постройке вулкана Большая Удина.

Область, захваченная сейсмической активизацией, значительно превышает размеры возможного магматического очага под Удинскими вулканами, который можно условно очертить по расположению эруптивных центров (рис. 1*в*). Основные причины такого несоответствия связаны со значительной неопределенностью нахождения гипоцентров:

- сеть сейсмических станций является односторонней по отношению к Удинскому комплексу и, следовательно, неоптимальной для локации слабых удинских землетрясений;

- скоростное строение под Удинскими вулканами может заметно отличаться от общей для Ключевской группы вулканов скоростной модели и требует уточнения.



Рис. 1. *а* – Ключевская группа вулканов. Номерами обозначены действующие (Д) и потухшие (П) вулканы: *1* – Ключевской (Д), *2* – Камень (П), *3* – Безымянный (Д), *4* – Средний (П), *5* – Крестовский (П), *6* – Ушковский (Д), *7* – Острый Толбачик (П), *8* – Плоский Толбачик (Д), *9* – Овальная Зимина (П), *10* – Острая Зимина (П), *11* – Горный Зуб (П); *12* – Большая Удина (П), *13* – Малая Удина (П), *14* – Толбачинский Дол (поле ареального вулканизма, Д). В легенде: региональные (1) и временные (2) сейсмические станции (1); вулканы базальтандезибазальтовой (3) и базальт-андезидацитовой (4) формации [2, 5], глубинные разломы (5). Штриховкой отмечена область Удинской сейсмической активизации. Прямоугольником очерчен участок, представленный на рис. *16*. А-Б – линия, вдоль которой рассчитан сейсмотомографический разрез, рис. 4.

б – Удинская сейсмическая активизация на схеме эпицентров землетрясений Ключевской группы вулканов (октябрь 2017 – июль 2019 гг.). Обозначения вулканов те же. Буквами отмечены облака скопления эпицентров, связанных с активными вулканами: К – Ключевским, Б – Безымянным, Т – Плоским Толбачиком.

в – Удинский вулканический комплекс по [8]: стратовулканы Большая и Малая Удина и позднеплейстоцен-голоценовые экструзии (кружки); разломы предполагаемые (штриховой пунктир) и установленные (сплошная линия)



Рис. 2. Механизм очага землетрясения 06.02.2019 г. Ks = 10.1, ML = 4.3, $M_W = 4.1$, определенный по знакам первых вступлений Р-волн (а) и по широкополосным сейсмограммам через расчет тензора сейсмического момента (б). Ориентация оси задается двумя углами – углом погружении *pl* и азимутом *azm*. Ориентация нодальной плоскости задается двумя углами – азимутом простирания *stk* и углом падения *dip*. Угол подвижки *slip* – угол в плоскости очага между направлением простирания и вектором подвижки (отсчитывается от направления простирания против часовой стрелки). Использована проекция нижней полусферы. в – среднее значение азимута оси напряжения растяжения T (с учетом Толудских землетрясений [3])

Интерпретация распределения землетрясений по глубине затруднительна, так как в ряде случаев появляются двойные разноглубинные (альтернативные) решения гипоцентров [1].

Для сильнейшего удинского землетрясения (06.02.2019 г. с ML = 4.3) рассчитан механизм очага по знакам первых вступлений объемных волн и через расчет тензора сейсмического момента по широкополосным сейсмограммам (рис. 2). Размер очага в предположении круговой площадки разрыва оценен как ~1.1 км. Землетрясение 06.02.2019 г. с ML = 4.3 возникло под действием превалирующего по величине напряжения растяжения, ориентированного субгоризонтально, субширотно, вкрест основному магмопроводящему разлому Ключевской группы вулканов. Характер подвижки в очаге (сбросо-сдвиг в начальной фазе разрыва, в дальнейшем переходящий в сдвиг при сохранении сбросовой компоненты) позволяет рассматривать это землетрясение как результат интрузивной активности.

Длиннопериодные (LP) землетрясения

Землетрясения Удинской активизации относятся к длиннопериодным (long period, LP) сейсмическим событиям, характерным для вулканических районов (преобладающий частотный диапазон 0.5–5 Гц). Показано, что эти события имеют сходные сейсмические записи и могут объединяться в «семейства» по корреляции волновых форм (рис. 3). В мировой практике LP землетрясения связываются с продвижением вязкой магмы и резонансными явлениями в магмопроводящем канале и рассматриваются как один из признаков оживления магматической системы вулкана (magmatic unrest). Следовательно, Удинская магматическая питающая система проявляет признаки движения вязкой магмы на глубинах средней коры, что является косвенным подтверждение возобновления связи между промежуточным очагом и мантийным источником после длительного периода покоя.



Рис. 3. Длиннопериодные (*LP*) землетрясения удинской сейсмической активизации. Примеры записей и спектры трех землетрясений (*a*). Примеры повторяемости волновых форм и соответствующее «семейство» сейсмических событий (б)

Результаты работы временной сети

В мировой практике исследования пробуждающихся вулканов начинаются с оперативной организации дополнительный наблюдений, в первую очередь – сейсмологических. В мае-июле 2018 г. вокруг Удинских вулканов были установлены четыре широкополосные временные сейсмические станции Guralp CMG-6TD (рис. 1).

Результаты работы временной сети сейсмических станций позволили уточнить расположение гипоцентров: размеры зоны активизации уменьшились, а большинство землетрясений сконцентрировались под вулканом Большая Удина и немного южнее на глубине 5–15 км [11].

С использованием алгоритма пассивной сейсмической томографии LOTOS [10] было обнаружено, что непосредственно под вулканом Большая Удина (рис. 4) наблюдается аномалия с повышенными скоростями P-волн, пониженными скоростями S-волн и повышенным значением отношения V_P/V_S [11]. Такая комбинация сейсмических параметров часто наблюдается под активными вулканами и связывается с внедрением частично расплавленной магмы и/или жидких флюидов. При этом максимальная интенсивность выявленной аномалии прослеживается на глубинах менее 5 км.

Сопоставление с результатами томографических работ 2014–2015 гг. [4] показывает, что аномалия к 2018 г. сместилась в область меньших глубин (рис. 5).



Рис. 4. Распределения аномалий скоростей *P* и *S* волн и отношение *V_P/V_S*, полученные в результате томографической инверсии данных по локальной сейсмической сети (вертикальный профиль вдоль линии А-Б, положение которой показано на рис. 1а). Точки – проекции землетрясений на вертикальное сечение



Рис. 5. Сопоставление глубинного распределения удинских землетрясений (а) с глубиной скоростных аномалий (б), выделенных в разные годы под вулканом Большая Удина в работах [4, 11]

Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Седьмой научно-технической конференции 29 сентября–5 октября 2019 г. г. Петропавловск-Камчатский

Заключение

Пробуждение и динамика магматического аппарата под вулканом может отражаться в сейсмичности. В условиях отсутствия других видов наблюдений сейсмические данные являются единственным источником информации о потенциальной активизации вулкана, относящегося по существующей классификации к потухшим. Именно такая уникальная ситуация (сейсмическая активизация под потухшим вулканом Удина на Камчатке) наблюдается с октября 2017 г. (seismic unrest). Сейсмические данные в комплексе с имеющейся геолого-геофизической информацией позволили обосновать и локализовать активизацию магматической системы под Удинскими вулканами. Развитие магматической системы проявляется в миграции сейсмичности, в уменьшении глубины аномалий на сейсмотомографических изображениях, в появлении «семейств» *LP* землетрясений: Эти процессы могут инициироваться поступлением новых порций вещества в питающую систему вулкана (*magmatic unrest*). Данные временной локальной сети станций, установленных в непосредственно в зоне активизации, позволяют утверждать, что во время ее работы основное колическая активизация по уточненным данным может свидетельствовать о начале следующего эпизода активности именно вулкана Большая Удина.

Состав пород Удинских вулканов имеет сходство с продуктами вулкана Безымянного [9], для которого характерны взрывные извержения. Породы этих вулканов относятся к единой базальтандезидацитовой формации Ключевской группы вулканов, распространенной только в ее юговосточном секторе [2, 5]. Сходство составов пород означенных вулканов предполагает и сходные сценарии их эруптивной деятельности. Поэтому наблюдаемая сейсмическая активизация под Удинскими вулканами рассматривается как возможный предвестник извержения, которое может произойти здесь в будущем, и может иметь сходство с развитием ситуации на вулкане Безымянном.

Исследования поддержаны РФФИ (гранты 19-05-00204-а, 18-55-52003 МНТ а).

Список литературы

1. Дрознин Д.В., Дрознина С.Я., Сенюков С.Л., Чебров Д.В., Шапиро Н.М., Шебалин П.Н. Вероятностные оценки гипоцентров по данным камчатской сети сейсмических станций // Физика Земли. 2019. № 4. С. 153–165.

2. Ермаков В.А. Формационное расчленение четвертичных вулканических пород. М.: Недра, 1977. 223 с.

3. Кугаенко Ю.А., Павлов В.М., Иванова Е.И., Абубакиров И.Р., Салтыков В.А. Толудская вспышка сейсмичности и землетрясение 30.11.2012 г. (М_С = 5.4, М_W = 4.8), сопровождавшие начало Толбачинского извержения 2012-2013 гг. // Вулканология и сейсмология. 2017. № 6. С. 33–48.

4. *Кулаков И.Ю., Гордеев Е.И., Добрецов Н.Л. и др.* Сейсмотомографические реконструкции земной коры и канала магматического питания // Толбачинское трещинное извержение 2012–2013 гг. (ТТИ-50). Новосибирск: Из-во СО РАН, 2017. С. 293–314.

5. *Мелекесцев И.В., Хренов А.П., Кожемяка Н.Н.* Тектоническое положение и общий очерк вулканов Северной группы и Среднного хребта // Действующие вулканы Камчатки. Т. 1. М.: Наука, 1991. С. 74–78.

6. *Салтыков В.А.* Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 53–59.

7. Салтыков В.А., Воропаев П.В., Кугаенко Ю.А., Чебров Д.В. Удинская сейсмическая активизация 2017– 2018 гг. // Вестник КРАУНЦ. 2018. № 1. Вып. 37. С. 5–7.

8. Тимербаева К.М. Петрология Ключевских вулканов на Камчатке. М.: Наука, 1967. 208 с.

9. *Churikova T., Gordeychik B., Wörner G. et al.* Geochemical evolution of Bolshaya Udina, Malaya Udina, and Gorny Zub volcanoes, Klyuchevskaya Group (Kamchatka) // Geophys. Res. Abstr. 2017. V. 19. EGU2017–10691.

10. *Koulakov I*. LOTOS code for local earthquake tomographic inversion. Benchmarks for testing tomographic algorithms // BSSA. 2009. V. 99. № 1. P. 194–214.

11. Koulakov I., Komzeleva V., Abkadyrov I., et al. Unrest of the Udina volcano in Kamchatka inferred from the analysis of seismicity and seismic tomography // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2018. V. 379. P. 45–59.