УДК 550.34, 551.21

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ СЕЙСМИЧНОСТИ РАЙОНА ВУЛКАНОВ ПЛОСКИЙ ТОЛБАЧИК, БОЛЬШАЯ УДИНА, ЗИМИНА И РЕКИ ТОЛУД В 2000-2019 гг. ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ ПОТУХШЕГОВУЛКАНА БОЛЬШАЯ УДИНА

Сенюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрознина С.Я., Кожевникова Т.Ю., Назарова З.А., Соболевская О.В.

Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропаловск-Камчатский, ssl@emsd.ru

Введение

Трещинное Толбачинское извержение им.50-летия ИВиС (ТТИ-50) началось 27 ноября 2012 г. и продолжалось до сентября 2013 г.[9]. Через некоторое время после его окончания, начиная с октября 2017 г. стали постоянно регистрироваться относительно слабые землетрясения вблизи потухшего вулкана Большая Удина (Б. Удина), расположенного в 10 км к юго-востоку от вулкана Плоский Толбачик (Пл. Тобачик), рис. 1. Такая сейсмическая активизация вызвала большой интерес среди вулканологов и сейсмологов в связи с возможным «пробуждением» Б.Удины. Состав пород Удинских вулканов предполагает формирование их исходной магмы в малоглубинном промежуточном магматическом очаге [2, 8]. И.Ю. Кулаков с соавторами в работе [11] по данным сейсмотомографических работ выделил южнее вулкана Б. Удина в районе р. Толуд долгоживущий магматический очаг с верхней границей на глубине ~ 15 км, который может быть связан с питающей системой вулкана Пл. Толбачик. Он также считает, что «Судя по представленным связям, в ближайшее время он (Б. Удина) может проснуться» [9, стр. 311]. Группа ученых Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН исследовала землетрясения в районе Удинских вулканов по методу СОУС'09 [3]. Результаты, представленные в работе [4], сводятся к формулировке: «В октябре 2017 г. зафиксирован рост сейсмичности с выходом на высокий уровень с последующим достижением экстремально высокого уровня в ноябре во всех рассматриваемых временных окнах. В настоящее время (конец марта 2018 г.) сейсмическая активизация в районе вулкана Удина продолжается, и уровень сейсмичности характеризуется как экстремально высокий во всех рассматриваемых временных окнах». Также в этой работе указывалось на возможное внедрение магмы под Удинские вулканы и на возможность извержения с вероятностью 64%. Исследования сейсмичности были продолжены с помощью временной сети станций, установленной в районе Б.Удины в 2018 г. с мая по июль [12]. Основные результаты по исследованию зарегистрированных в отмеченный период более 500 землетрясений сводятся к следующим выводам: 1) идентифицирован линейно вытянутый, эллиптический кластер землетрясений, соединяющий Б. Удину и район р. Толуд; 2) сейсмический кластер под вулканом Б. Удина, возможно, выделяет активный магматический очаг, расположенный ниже глубины 5 км от поверхности Земли; 3) с конца 2017 г. началась миграция магмы от очага в районе р. Толуд, расположенного в средней и нижней коре, в сторону вулкана Б. Удина в северном направлении.

Таким образом, в вышеприведенных работах, как это обычно бывает, сейсмическая активизация связывается с внедрением магмы и свидетельствует о возможном возобновлении его вулканической активности. В данной работе мы попробуем представить доказательства, что отмеченная выше сейсмическая активизация наоборот отражает процесс отступления и опускания магмы от вулкана Б.Удина в выделенный томографическими методами очаг в районе р.Толуд.

Данные

Камчатский филиал (КФ) ФИЦ ЕГС РАН (http://www.emsd.ru/) начал проводить сейсмический мониторинг вулканических районов Камчатки в режиме близком к реальному времени с 2000 г. (http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm). Лаборатория исследований сейсмической И вулканической активности КФ ФИЦ ЕГС РАН выполняет в рамках этого мониторинга обработку всех землетрясений И помещает результаты в служебную сетевую базу данных (http://www.emsd.ru/ts/). На основе этой базы формируется общедоступная «Единая информационная система сейсмологических данных» (http://www.emsd.ru/sdis/main.php). Каталоги региональных и вулканических землетрясений за 1999-2017 гг. и сопровождающие их статьи опубликованы в сборниках ФИЦ ЕГС РАН «Землетрясения Северной Евразии» и «Землетрясения России».

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

Результаты исследований

На рис. 1 представлена карта эпицентров с сетью станций РТСС и проекция гипоцентров на вертикальный разрез 1-2. Все события произошли в период с 01.01.2000 по 21.08.2019. Район исследований был разбит на шесть одинаковых по размеру квадратов со стороной ~11 км. Границы



Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений (верхний рисунок) и проекция их гипоцентров на вертикальный разрез 1-2 (нижний рисунок), события локализованы в районе исследований с 01.01.2000 по 21.08.2019. Белые треугольники обозначают сейсмические станции РТСС. Станции RTCC открытые до 2000 г.: ZLN, КРТ, КМN. Станции РТСС с датой открытия в скобках: KIR (08.2006), BZM (09.2006), BZG (09.2007), BZW (09.2007). Голубая стрелка обозначает миграцию центра сейсмической энергии с октября 2017 г. по август 2019 г.

квадратов были выбраны с учетом того, чтобы вулканы находились примерно в центре квадратов. границы а проходили по центру между вулканами. В итоге получилось, что один квадрат A) оконтурил спокойный пять район. остальных включили активный вулкан Пл.Толбачик, потухшие вулканы Зимина и Б. Удина, Толбачинский Дол и район р. Толуд. Следует отметить, что в квадрат В) также попало извержение ТТИ - 50 [9], а в БТТИ Д) [1]. Для выделенных 6-ти квадратов сделаны выборки были землетрясений с глубиной от поверхности Земли до 40 км с программы помошью POLYGON (Близнецов В.Е.). Для каждой выборки был посчитан суточный Центр Сейсмической Энергии (ЦСЭ) по программе CenterEnergy (Близнецов В.Е.). Программа CenterEnergy по всем землетрясениям за выбранные сутки вычисляет ЦСЭ как одно эквивалентное землетрясение с координатами очага. вычисленными как среднеарифметическое ИЗ координат землетрясений, зарегистрированных 3a выбранные сутки с учетом веса, пропорционального энергии события. Энергия этого эквивалентного землетрясения равна сумме энергий выбранных событий, а $K_{\rm s}$ [10] равен десятичному логарифму суммарной от энергии.



Рис. 2. Графики изменения во времени глубины и энергии (K_s) суточного ЦСЭ для землетрясений, выделенных квадратами на рис. 1, буквы для графиков соответствуют обозначениям квадратов на рис. 1. Ряд 1 (синий, левая ось) – глубина ЦСЭ, ряд 2 (желтый, правая ось) – K_s ЦСЭ. Черная линия – средняя глубина в скользящем окне по 30-ти значениям, красная линия – аналогичный тренд для K_s . Две левые зеленые вертикальные линии обозначают начало и окончание ТТИ-50, и третья линия – 01.10.2017 г.

На рис.2 представлены графики таких параметров ЦСЭ, как глубина и K_s . В начале рассмотрим параметр K_s , как индикатор сейсмической активности в выделенных квадратах. Можно отметить следующие особенности, важные для мониторинга сейсмичности:

- Зона А) наименее сейсмически активная, всего зарегистрировано 56 событий с классами от 2.0 до 6.2. Наблюдался небольшой всплеск активности одновременно с началом ТТИ-50.
- 2) Зона Б) в. Зимина, всего зарегистрировано 413 событий с классами от 2.1 до 8.5. Наблюдался значительный всплеск активности с K_s = 8.0 05.09.2006 г., затем до K_s = 8.5 в периоды накануне и в начале ТТИ-50 и до K_s = 7.7 (01.04.2019) после начала активизации Б.Удины.
- 3) Зона В) в. Пл. Толбачик и ТТИ-50, всего зарегистрировано 1398 событий с классами от 2.0 до 9.4. Наблюдался значительный нарастающий всплеск активности за 3 месяца до извержения ТТИ-50 с K_s от 5.5 до 9.6 и продолжающийся после его окончания до настоящего времени на уровне, превышающем сейсмичность с 2000 г. до 2009 г.
- 4) Зона Г) в. Б. Удина, всего зарегистрировано 1507 событий с классами от 2.0 до 7.7. Наблюдался незначительный всплеск активности одновременно с началом ТТИ-50 и значительный с октября 2017 г. по настоящее время. В последнем всплеске максимум тренда K_s наблюдался в конце марта 2018 г., после которого фиксируется уменьшение сейсмической активности. Также в последнем всплеске необходимо отметить постепенное опускание тренда глубины ЦСЭ с ~5 км до ~15 км.
- 5) Зона Д) -Толбачинский Дол и БТТИ, всего зарегистрировано событий 329 с классами от 2.4 до 9.8. Наблюдался кратковременный незначительный всплеск активности K_s = 7.0 30.11.2012 г. (сразу после начала ТТИ-50) и слабая активность на глубинах 20–25 км, начиная с декабря 2018 г.
- 6) Зона Г) р. Толуд, всего зарегистрировано событий 1489 с классами от 2.7 до 11.3. Наблюдался кратковременный значительный всплеск активности K_s=11.3 30.11.2012 г. (сразу после начала ТТИ-50), повышенная сейсмичность после окончания ТТИ-50 и значительный продолжительный всплеск с марта 2018 г. В последнем всплеске максимум тренда K_s наблюдался с декабря 2018 г. по февраль 2019 г., после которого фиксируется некоторое уменьшение сейсмической активности. При этом тренд глубины ЦСЭ располагался на горизонте от ~10 км до ~15 км.

Здесь необходимо дать пояснение для оценки полученных результатов. Для землетрясений в исследуемом районе в каталоге приводятся следующие средние оценки точности определения параметров: для K_s ошибка составляет Δcp . = 0.5; средняя ошибка локации в плане Δcp . = ±3 км и Δ макс. = 7 км, средняя ошибка локации по глубине Δ ср. = ±3 км и Δ макс. = 11 км. Приведенные выше результаты основаны, прежде всего, на исследовании параметра K_s, который получается в результате суммирования, и точность определения отдельного события существенно меньше отмеченных отклонений. В тоже время изменения глубины ЦСЭ примерно равны или меньше точности определения глубины отдельного события. В данном случае следует отметить, что ЦСЭ – это интегральная величина и точность ее определения зависит от количества суммируемых величин. В работе [12] показано, что для квадратов Г) и Е) на рис. 1 разброс эпицентров по сети временных станций существенно меньше, чем по сети постоянных станций. Также во многих работах после релокации землетрясений, обычно эпицентры приурочиваются к некоторым локальным источникам в виде разломов или точечных источников. Т.е. источники землетрясений имеют небольшие размеры, а разброс эпицентров получается главным образом из-за недостаточно хорошей системы наблюдений, незнания скоростного разреза и многих других и в том числе субъективных факторов. В этом случае с помощью ЦСЭ можно определить положение главных источников землетрясений и точность определения ЦСЭ уменьшается пропорционально корню квадратному из количества событий, участвующих в суммировании. Т.е., если точность определения по глубине отдельного гипоцентра, например, равна 10 км, а в суммировании участвует 9 событий, то точность оценки ЦСЭ по глубине будет равна 10/ $\sqrt{9}$ = 3.3 км. Для того чтобы проверить полученные оценки по изменению глубины ЦСЭ и проследить миграцию ЦСЭ в плане, для всех событий, произошедших в квадратах Г) и Е) на рис.1 с 01.10.2017 г. по 21.08.2019 г. были посчитаны параметры ЦСЭ, но не по суткам, а по месяцам. Такие помесячные графики изменения параметров ЦСЭ представлены на рис.3. На графиках хорошо выделяются линейные тренды изменения широты на ~4 км с севера (55.740°) на юг (55.705°), долготы - ~4 км с востока (160.555°) на запад (160.474°), и глубины – с 5 до 15 км. Соответствующая выделенным трендам миграция сейсмичности в плане показана на карте рис. 1 голубой стрелкой. Также график K_s (рис. 3, Б) изменения энергии показывает, что начиная с февраля 2019 г. наблюдается общее уменьшение сейсмичности в изучаемых квадратах Б. Удина и р. Толуд. Оценка точности изучаемых параметров определяется количеством суммируемых событий (рис. 3, В) и она как минимум в 5 раз меньше ошибки определения отдельного события, т.к. количество суммируемых событий изменялось от 25 до 150.

Для того чтобы подтвердить полученные результаты мы еще провели дополнительные исследования. Из первоначального ряда наблюдений последовательно удалялись землетрясения и сравнивали результат с первоначальным, полученным по всем событиям. Сначала удалили каждое 10-е землетрясение, потом из первоначального ряда каждое 5-е, затем - каждое 3-е и каждое 2-е. В итоге получилось, что удаление событий практически не влияет на конечный результат, что подтверждает достоверность самого результата.



Рис. 3. А) Графики изменения во времени широты (синий, левая ось) и долготы (красный, правая ось) ЦСЭ во времени с линейными трендами соответствующих цветов; Б) Графики изменения во времени глубины (синий, левая ось) и суммарной энергии, пересчитанной в энергетический класс K_s (желтый, правая ось). Параметры ЦСЭ посчитаны для землетрясений, локализованных в квадратах Г) - Б. Удина и Е) - р. Толуд на рис. 1 с 01.10.2017 г. по 21.08.2019 г. во временном окне, равным 1 месяцу. В) Гистограмма количества землетрясений, участвующих в расчете параметров ЦСЭ.

Заключение

Следует отметить, что полученные результаты хорошо согласуются с результатами независимых исследований по данным временных станций. Напомним, что глубина залегания верхней части магматического очага под вулканом Б. Удина в работе [12] оценивается ~5 км, а глубина залегания верхней части магматического очага в районе р. Толуд [11] равна ~15 км. Также в работе [12] зафиксирован линейно вытянутый, эллиптический кластер землетрясений, соединяющий очаги под вулканом Б. Удина и в районе р. Толуд. Наше исследование параметров ЦСЭ (рис. 3) наглядно демонстрирует миграцию сейсмичности от очага под Б. Удиной к очагу в районе р. Толуд. Положение голубой стрелки на рис. 1 совпадает с кластером землетрясений, соединяющим очаги под вулканом Б.Удина и в районе р. Толуд. Также совпадение наблюдается по глубинам, центр ЦСЭ во времени постепенно опускается с глубины ~5 км под Б. Удиной на глубину ~15 км в районе р. Толуд. Таким образом, по результатам наших исследований наблюдаемая сейсмическая активность отражает не активизацию Б.Удины, а процесс отступления и опускания магмы от вулкана Б.Удина в выделенный томографическими методами очаг в районе р.Толуд.

Главное достоинство мониторинга по данным постоянных станций заключается в возможности проследить динамику изменения сейсмичности в течение большого промежутка времени в отличие от наблюдений по временным сетям. Поэтому установка даже одной постоянной станции во время активизации вулканов Корякский в 2009 г. [5] и Кизимен в 2010 г. [6] позволила не только корректно оценить опасность, в том числе по изучению ЦСЭ, но и сделать успешный прогноз извержения [7]. Но с 2013 г. после сокращения финансирования уже не устанавливались новые постоянные станции, поэтому извержения вулканов Жупановский в 2013-2015 гг. и Камбальный в 2017 г. контролировались только по удаленным станциям, что делает невозможным корректный мониторинг и оценку опасности.

В заключении также необходимо привести данные по спутниковому мониторингу деформаций земной поверхности. По устному сообщению ученых Thomas Walter и René Mania (GFZ German Research Centre for Geosciences, Germany) каких-либо деформаций земной поверхности по данным InSAR в районе вулкана Б. Удина с 2017 г. по настоящее время не зарегистрировано. Хотя перед извержениями камчатских вулканов Кизимен [13], Пл. Толбачик (ТТИ-50) [14] и Безымянный [15] деформации земной поверхности были зафиксированы.

Работа выполнена в рамках НИОКТР «Комплексные геофизические исследования вулканов Камчатки и северных Курильских островов с целью обнаружения признаков готовящегося извержения, а также прогноза его динамики с оценкой пепловой опасности для авиации» № АААА-А19-119031590060-3 и при поддержке гранта Министерства образования и науки № 14.W03.31.0033.

Список литературы

1. Большое трещинное Толбачинское извержение 1975-1976 гг. / Отв. ред. Федотов С.А. М.: Наука, 1984. 683 с.

2. *Максимов А.П.* Геохимические особенности вулканов Удинской группы // Глубинное строение, сейсмичность и современная деятельность Ключевской группы вулканов / Отв. ред. Б.В. Иванов, С.Т. Балеста. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 77–84.

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

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

5. Сенюков С.Л., Нуждина И.Н. Сейсмичность вулкана Корякский в 1966-2009 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Третьей научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 9-15 октября 2011 г. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 140–144.

6. Сенюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрознина С.Я., Гарбузова В.Т., Кожевникова Т.Ю., Соболевская О.В. Сейсмичность вулкана Кизимен // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Второй научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 11-17 октября 2009 г. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 91–95.

7. Сенюков С.Л. Мониторинг и прогноз активности вулканов Камчатки по сейсмологическим данным в 2000-2010 гг. // Вулканология и сейсмология. 2013. №1. С. 96–108.

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

9. Толбачинское трещинное извержение 2012-2013 гг. / Отв. ред. Гордеев Е.И., Добрецов Н.Л. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. 421 с.

10. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.

11. Koulakov I., Abkadyrov I., Al Arifi N., Deev E., Droznina S., Gordeev E.I., Jakovlev A., El Khrepy S., Kulakov R.I., Kugaenko Y., Novgorodova A., Senyukov S., Shapiro N., Stupina T., and West M. Three different types of plumbing system beneath the neighboring active volcanoes of Tolbachik, Bezymianny, and Klyuchevskoy in Kamchatka // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2017. V. 122. doi:10.1002/2017JB014082.

12. Koulakov I., Komzeleva V., Abkadyrov I., Kugaenko Y., El Khrepy S., Al Arifi N. Unrest of the Udina volcano in Kamchatka inferred from the analysis of seismicity and seismic tomography // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2019. V. 379. P. 45–59. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.05.006

13. *Lingyun Ji, Zhong Lu, Daniel Dzurisin, Sergey Senyukov* Pre-eruption deformation caused by dike intrusion beneath Kizimen volcano, Kamchatka, Russia, observed by InSAR // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 256. P. 87–95.

14. *Lundgren P., Kiryukhin A., Milillo P., Samsonov S.* Dike model for the 2012-2013 Tolbachik eruption constrained by satellite radar interferometry observations // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2015. V. 307. P. 79–88.

15. *Mania R., Walter T.R., Belousova M., Belousov A., Senyukov S.L.* Deformations and Morphology Changes Associated with the 2016–2017 Eruption Sequence at Bezymianny Volcano, Kamchatka // Remote Sens. 2019. V. 11. 1278. doi:10.3390/rs11111278