

УДК 550.3

СОВМЕСТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙСМИЧНОСТИ И ДАННЫХ СПУТНИКОВОЙ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ ПОТУХШЕГО ВУЛКАНА БОЛЬШАЯ УДИНА

© 2020 г. С. Л. Сеньюков^{a, b, *}, В. О. Михайлов^b, И. Н. Нуждина^a, Е. А. Киселева^b,
С. Я. Дроздина^a, В. А. Тимофеева^b, М. С. Волкова^b, Н. М. Шапиро^{b, c}, Т. Ю. Кожевникова^a,
З. А. Назарова^a, О. В. Соболевская^a

^a Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, бульвар Пийна, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия

^b Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия

^c Institut des Sciences de la Terre, Université Grenoble Alpes, CNRS (UMR5275), 1381, rue de la Piscine, Gieres, 38610 France

*e-mail: ssl@emsd.ru

Поступила в редакцию 10.04.2020 г.

После доработки 23.04.2020 г.

Принята к публикации 01.06.2020 г.

В октябре 2017 г. начала регистрироваться слабая сейсмическая активность в районе потухшего вулкана Большая Удина (Б. Удина), расположенного в 10 км к юго-востоку от вулкана Плоский Толбачик. Данные сейсмической томографии показали, что южнее вулкана Б. Удина в районе р. Толуд располагается долгоживущий магматический очаг с верхней границей на глубине около 15 км, который может быть связан с питающей системой вулкана Плоский Толбачик [Koulakov et al., 2017]. Авторы работ [Салтыков и др., 2018; Koulakov et al., 2019] связали наблюдаемую сейсмическую активизацию с возможным внедрением магмы под Удинские вулканы и, как следствие, указали на высокую вероятность возобновления вулканической активности. В настоящей работе выполнен анализ данных постоянных сейсмических станций, который показал, что с октября 2017 г. по август 2019 г. центр сейсмической энергии, характеризующий положение области, где происходят основные сейсмические события, систематически смещался от вулкана Б. Удина на юг. По снимкам спутника Sentinel-1A (длина волны 5.6 см), выполненных с нисходящей орбиты 60-го трека в период с 07.06.2017 по 23.09.2017 (10 снимков), и в период с 21.05.2018 по 30.09.2018 (12 снимков), нами были определены временные серии и средние скорости смещения на склонах вулкана Б. Удина. Устойчиво отражающие объекты удалось идентифицировать только у подножья Б. Удины. Анализ временных серий смещений поверхности вулкана показал, что характер смещений в 2017 и 2018 гг. на юго-западном и восточном склонах практически не изменился, а на северо-западном склоне средние скорости смещений в 2018 г. уменьшились. Для проверки полученных результатов по трем снимкам спутника ALOS-2 PALSAR-2 (длина волны 23.5 см), выполненных 04.10.2016, 13.06.2017 и 02.10.2018 с восходящей орбиты, были построены парные интерферограммы, которые характеризуют смещения за период времени между снимками. Смещения на обеих интерферограммах не превосходят первые сантиметры, за исключением узких зон, приуроченных к локальным формам рельефа. Обнаруженные деформации, скорее всего, связаны с поверхностными процессами. Линейные размеры областей деформации, связанной с изменениями давления в магматической камере на глубине в 5 км, должны составлять 10–15 км, в то время как обнаруженные по спутниковым данным области смещений существенно меньше. Полученные результаты позволяют предложить альтернативную модель, согласно которой сейсмическая активизация сопровождала процесс отступления и погружения магматического расплава от вулкана Б. Удина в выделенный томографическими методами очаг в районе р. Толуд.

Ключевые слова: вулкан Большая Удина, сейсмический мониторинг, спутниковая радарная интерферометрия, миграция сейсмичности, активизация вулкана

DOI: 10.31857/S0203030620050053

ВВЕДЕНИЕ

Трещинное Толбачинское извержение им. 50-летия ИВиС (ТТИ-50) началось 27 ноября 2012 г. и продолжалось до сентября 2013 г. [Самойленко и др.,

2012; Толбачинское ..., 2017; Senyukov et al., 2015]. Спустя 5 лет после его окончания, с октября 2017 г., начали постоянно регистрироваться относительно слабые землетрясения вблизи потухшего вул-

кана Б. Удина, расположенного в 10 км к юго-востоку от вулкана Плоский Толбачик (Пл. Толбачик) (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 [Максимов, 1976; Тимербаева, 1967]. И. Кулаков с соавторами [Koulakov et al., 2017] по данным сети временных и стационарных сейсмических станций построили сейсмотомографическую модель земной коры под вулканами Ключевской группы. Согласно этой модели, южнее вулкана Б. Удина в районе р. Толуд располагается долгоживущий магматический очаг с верхней границей на глубине ~15 км, который может быть связан с питающей системой вулкана Пл. Толбачик. Группа ученых Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН исследовала землетрясения в районе Удинских вулканов по методу СОУС’09 [Салтыков, 2011]. Результаты, представленные в работе [Салтыков и др., 2018], 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 [Koulakov et al., 2019]. Основные результаты исследования зарегистрированных в отмеченный период более 500 землетрясений состоят в следующем: 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. На основании этих данных сделан вывод о возможной активизации вулкана Б. Удина.

Иными словами, в вышеприведенных работах, как это обычно бывает, сейсмическая активизация связывается с внедрением магмы и свидетельствует о возможном возобновлении вулканической активности. В данной работе на основе анализа сейсмических и спутниковых данных предлагается альтернативная модель, в которой

отмеченная выше сейсмическая активизация объясняется процессом отступления и погружения магматического расплава от вулкана Б. Удина в выделенный томографическими методами очаг в районе р. Толуд.

СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Исходные данные и метод исследования

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>) [Сенюков, 2013]. 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>) [Чеброва и др., 2015]. Каталоги региональных и вулканических землетрясений за 1999–2018 гг. и сопровождающие их статьи опубликованы в сборниках ФИЦ ЕГС РАН “Землетрясения Северной Евразии” и “Землетрясения России” (например, [Чебров и др., 2019а; Сенюков и др., 2019]).

На рис. 1а представлена карта эпицентров землетрясений, зарегистрированных в исследуемом районе сетью постоянно действующих сейсмических станций КФ ФИЦ ЕГС РАН [Чебров и др., 2013, 2019б] за период с 01.01.2000 по 21.08.2019. На рис. 1б приведена проекция гипоцентров землетрясений на вертикальный разрез 1–2, показанный на рис. 1а. Для проведения анализа сейсмических данных район исследований был разбит на шесть одинаковых по размеру квадратов со стороной ~11 км. Границы квадратов были выбраны так, чтобы вулканы находились примерно в центре квадратов, а границы проходили по центру между вулканами (см. рис. 1). В итоге квадрат (А) ооконтурил район, где было зарегистрировано небольшое количество землетрясений, а пять остальных квадратов включили районы с большим числом сейсмических событий: активный вулкан Пл. Толбачик (В), комплекс потухших вулканов Зими́на (Б), и Б. Удина (Г), Толбачинский Дол (Д) и район р. Толуд (Е). Следует отметить, что в квадрат (В) вошла область извержения ТТИ-50 [Толбачинское ..., 2017; Senyukov et al., 2015], а в квадрат (Д) – область Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. (БТТИ) [Большое Трещинное ..., 1984]. Для шести выделенных квадратов были сделаны выборки землетрясений с глубиной от поверхности Земли до 40 км с помощью программы POLYGON, для

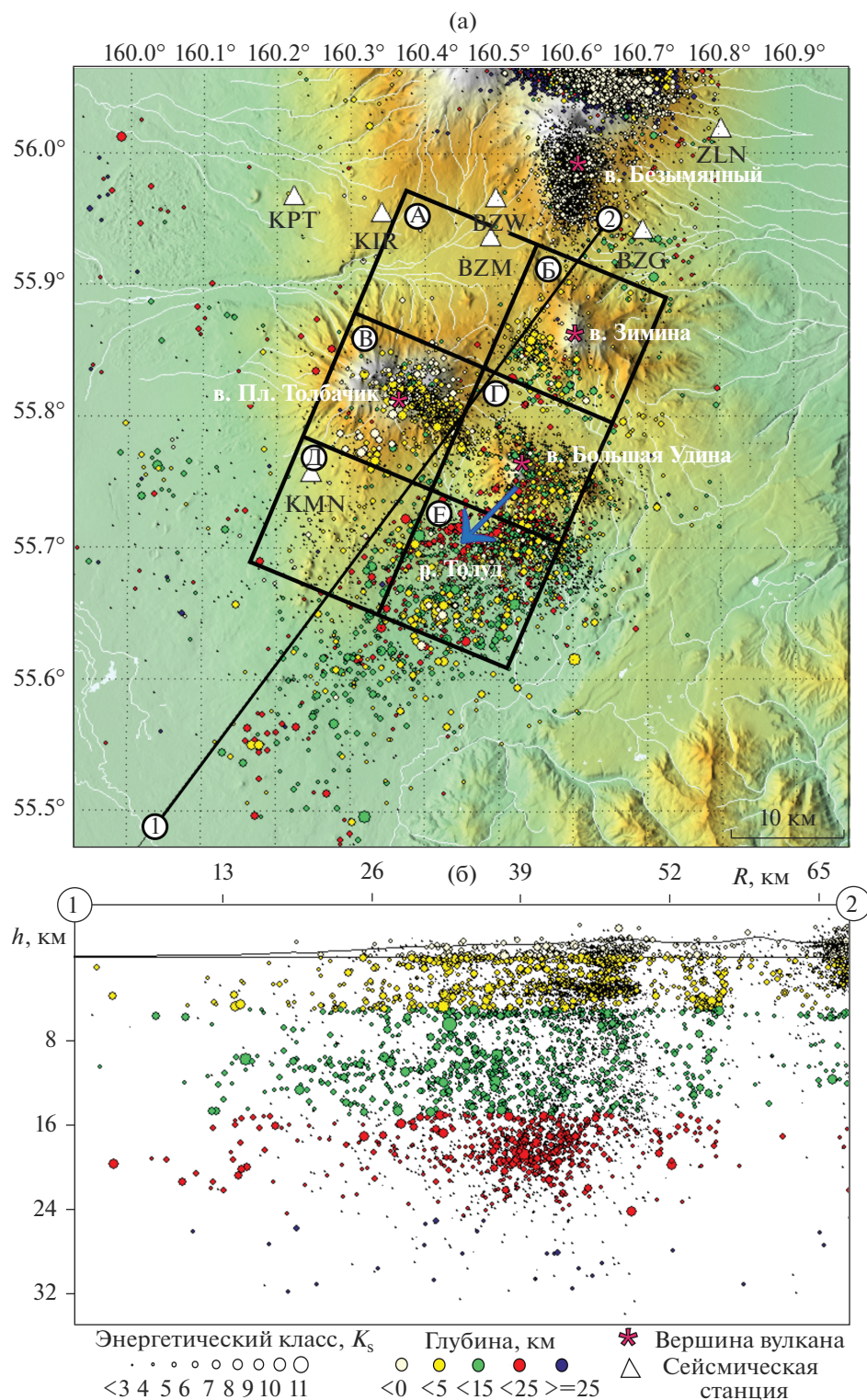


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений (а) и проекция их гипоцентров на вертикальный разрез 1–2 (б), для событий, зарегистрированных в районе исследований с 01.01.2000 по 21.08.2019. Белые треугольники обозначают сейсмические станции КФ ФИЦ ЕГС РАН. Станции, открытые до 2000 г.: ZLN, KPT, KMN. Для остальных станций дата открытия указана 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.

каждой выборки был посчитан суточный Центр Сейсмической Энергии (ЦСЭ) по программе CenterEnergy (автор программ Близнецов В.Е.). Программа CenterEnergy по всем землетрясениям за выбранные сутки определяет ЦСЭ — одно эквивалентное землетрясение с координатами очага, вычисленными как среднеарифметическое значение координат землетрясений, зарегистрированных за выбранные сутки с весом, пропорциональным энергии события. Энергия этого эквивалентного землетрясения равна сумме энергий выбранных событий, а энергетический класс K_S [Федотов, 1972] равен десятичному логарифму суммарной энергии.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены графики двух параметров ЦСЭ — глубины и K_S . Вначале рассмотрим параметр K_S как индикатор сейсмической активности в выделенных квадратах. Следует отметить следующие особенности, важные для мониторинга сейсмичности.

1) Зона А (см. рис. 2а) наименее сейсмически активна, всего зарегистрировано 56 событий с K_S от 2.0 до 6.2. Наблюдался небольшой всплеск активности одновременно с началом ТТИ-50.

2) В зоне Б (комплекс вулканов Зимина, см. рис. 2б) было зарегистрировано 413 событий с K_S от 2.1 до 8.5. Наблюдался значительный всплеск активности 05.09.2006 г. до $K_S = 8.0$. Накануне и в начале ТТИ-50 K_S достигал значения 8.5, а в начальный период активизации Б. Удины — 7.7 (01.04.2019).

3) В зоне В (вулкан Пл. Толбачик и ТТИ-50, см. рис. 2в) было локализовано 1398 событий с K_S 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, который продолжался и после его окончания до 21.08.2019 на уровне, превышающем сейсмичность 2000–2009 гг.

4) Зона Г (вулкан Б. Удина, см. рис. 2г). Всего зарегистрировано 1507 событий с K_S от 2.0 до 7.7. Наблюдался незначительный всплеск активности одновременно с началом ТТИ-50 и значительный с октября 2017 г. до 21.08.2019. 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 устойчивое опускание тренда глубины ЦСЭ с ~5 до ~15 км.

5) Зона Д (Толбачинский Дол и БТТИ, см. рис. 2д). Всего локализовано событий 329 с K_S от 2.4 до 9.8. Наблюдался кратковременный незначительный всплеск активности 30.11.2012 г. сразу после нача-

ла ТТИ-50 до $K_S = 7.0$ и слабая активность на глубинах 20–25 км, начиная с декабря 2018 г.

б) В пределах зоны Е (р. Толуд, см. рис. 2е) было зарегистрировано 1489 событий с K_S от 2.7 до 11.3. Наблюдался кратковременный значительный всплеск активности 30.11.2012 г. сразу после начала ТТИ-50 до $K_S = 11.3$, 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 чего фиксируется некоторое уменьшение сейсмической активности. Значения тренда глубины ЦСЭ в этот период располагались в интервале от ~10 до ~15 км.

Здесь необходимо дать пояснение, важное для правильной оценки полученных результатов. Для землетрясений исследуемого района в каталоге приводятся следующие средние оценки точности определения параметров отдельных событий: для K_S ошибка составляет 0.5; средняя ошибка локации в плане ± 3 км, а максимальная ошибка достигает ± 7 км. Средняя ошибка локации по глубине находится в пределах ± 3 км, а ее максимальное значение ± 11 км. В результате выполнить анализ смещений эпицентров землетрясений путем анализа отдельных событий не представляется возможным. В то же время в работе [Koulakov et al., 2019, рис. 3.1] показано, что для квадратов Г и Е разброс эпицентров по более плотной сети временных станций существенно меньше, чем по сети постоянных станций. Также во многих работах после релокации землетрясений, обычно эпицентры концентрируются вокруг некоторых локальных источников — разломов или компактных областей. В результате оказывается, что источники землетрясений имеют небольшие размеры, а разброс эпицентров получается, главным образом, из-за недостаточно хорошей системы наблюдений, неточного знания скоростного разреза и многих других, в том числе субъективных факторов.

Приведенные на рис. 2 результаты основаны на исследовании параметров K_S и глубины ЦСЭ, которые получаются путем суммирования соответствующих значений для отдельных событий во временных окнах. Значение K_S вычисляется как десятичный логарифм от суммы энергий, и поэтому он главным образом определяется самым сильным событием в сутках (так как энергия равна 10 в степени класс) и его погрешностью. Поэтому изменение K_S более чем 0.5 уже можно считать значимым. В то же время погрешность параметров локации ЦСЭ (широта, долгота и глубина) зависит от количества суммируемых величин и уменьшается пропорционально корню квадратному из количества событий, участвующих в суммировании. Например, если погрешность определения глубины отдельного гипоцентра равна

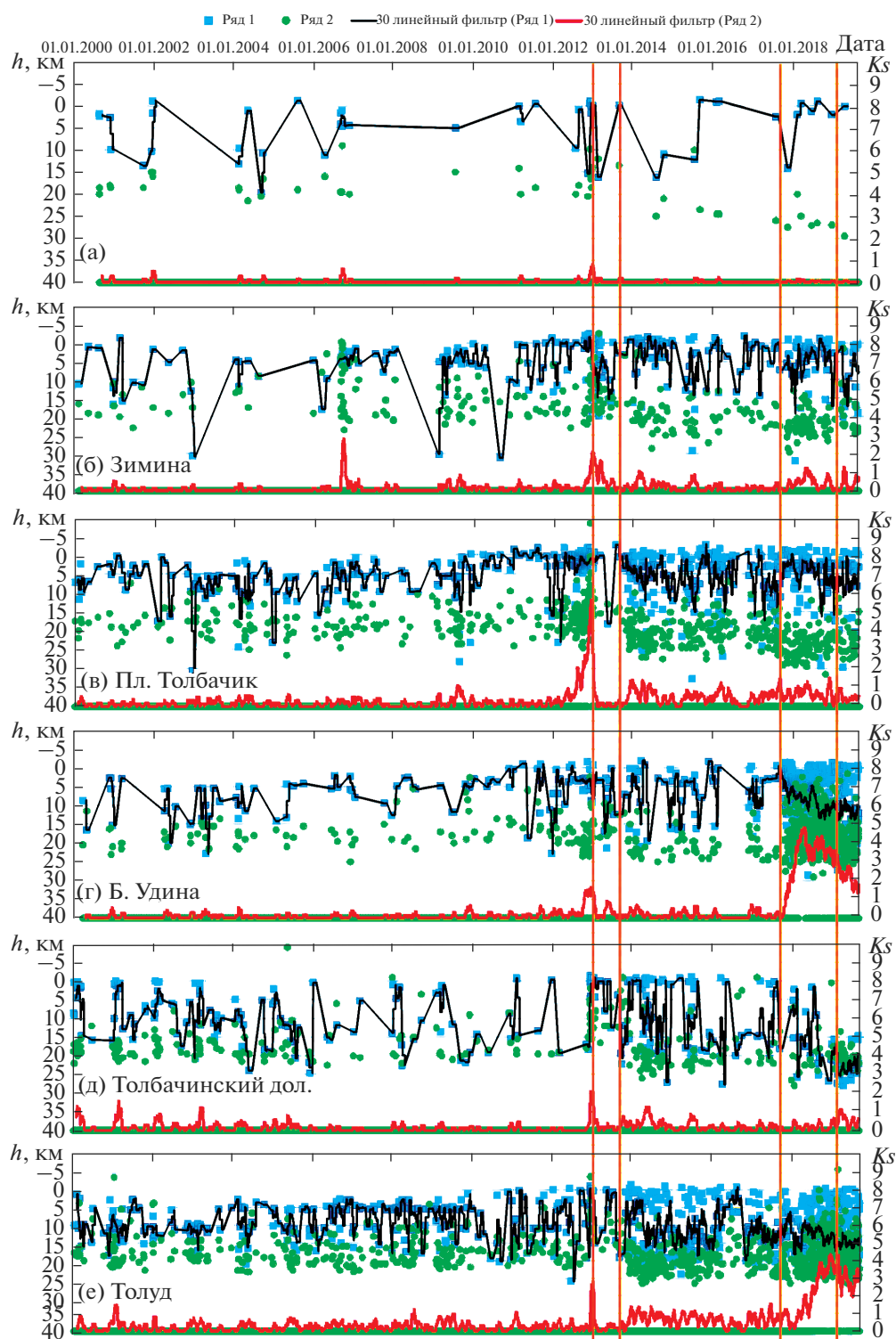


Рис. 2. Графики изменения во времени глубины и энергии (K_s) суточного ЦСЭ для землетрясений, произошедших в квадратах А–Д (см. рис. 1а). Ряд 1 (синий цвет, левая ось) – глубина ЦСЭ, ряд 2 (зеленый, правая ось) – K_s ЦСЭ. Черная линия – средняя глубина в скользящем окне по 30-ти значениям, красная линия – средний K_s ЦСЭ по 30-суточным значениям. Две вертикальные оранжевые линии слева обозначают начало и окончание ТТИ-50, третья линия обозначает начало сейсмической активизации 01.10.2017 и четвертая линия – февраль 2019 г. Условные обозначения (а–е) см. в тексте.

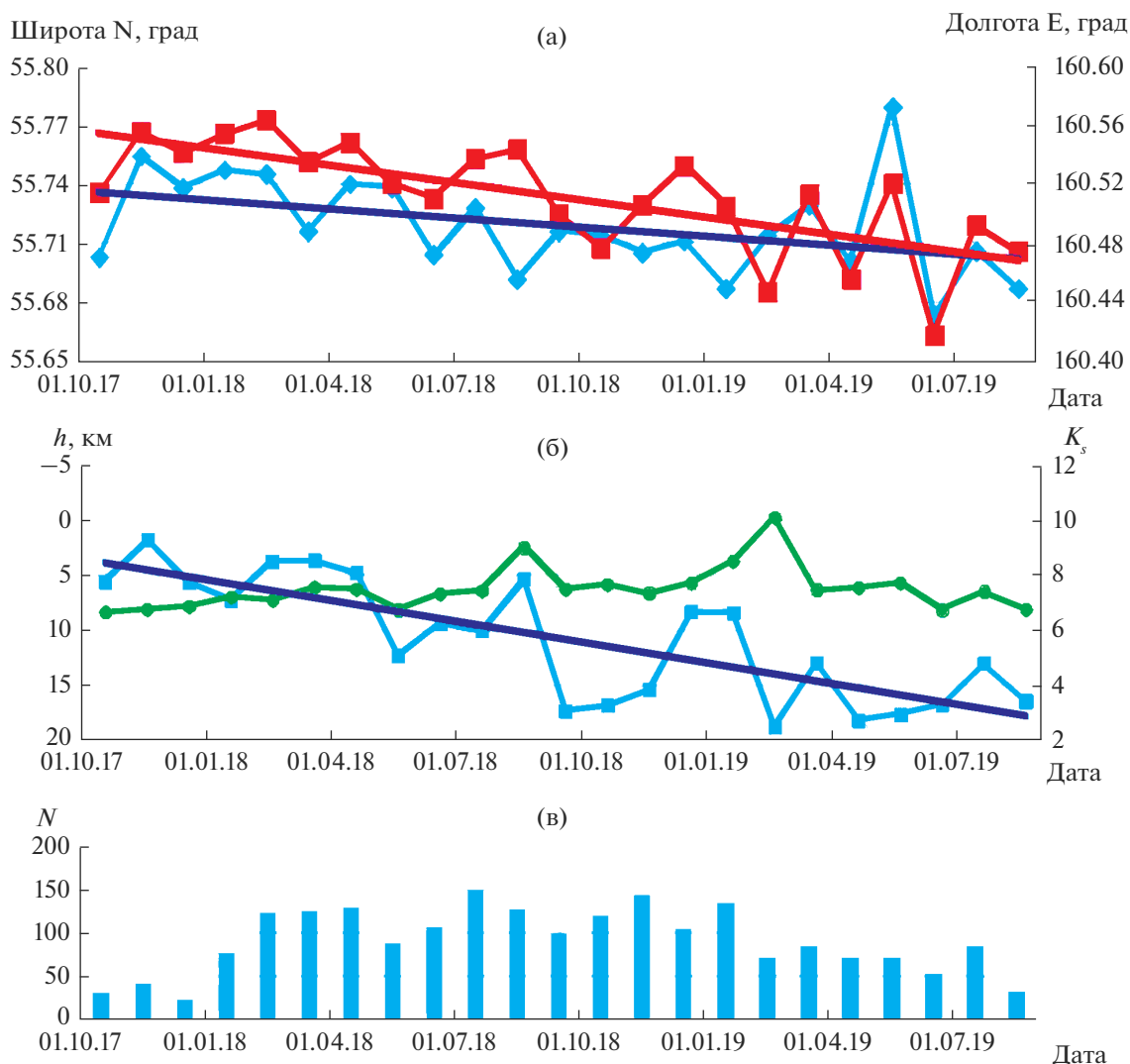


Рис. 3. Графики изменения во времени широты (синий цвет, левая ось) и долготы (красный, правая ось) ЦЭ во времени с линейными трендами соответствующих цветов (а). Графики изменения во времени глубины (синий цвет, левая ось) и суммарной энергии, пересчитанной в энергетический класс K_S (зеленый цвет, правая ось) (б). Параметры ЦЭ посчитаны для землетрясений, локализованных в квадратах Г (Б. Удина) и Е (р. Толуд), см. рис. 1а с 01.10.2017 г. по 21.08.2019 г. во временном окне размером 1 месяц. Гистограмма количества землетрясений, участвующих в расчете ежемесячных параметров ЦЭ (в).

10 км, а в суммировании участвует 9 событий, то погрешность оценки ЦЭ по глубине будет равна $10/\sqrt{9} = 3.3$ км.

Для того чтобы проверить полученные оценки изменения глубины ЦЭ и его миграцию в плане, для всех событий, произошедших в квадратах Г и Е (см. рис. 1) с 01.10.2017 по 21.08.2019 гг., были посчитаны параметры ЦЭ, с суммированием не по суткам, а по месяцам. На помесечных графиках (рис. 3) четко выделяются линейные тренды изменения вдоль широты на ~ 4 км с севера (55.740°) на юг (55.705°), вдоль долготы также примерно на 4 км с востока (160.555°) на запад

(160.474°), и по глубине с 5 до 15 км. Соответствующая выделенным трендам миграция сейсмичности в плане показана на рис. 1а голубой стрелкой. Также график изменения энергии K_S (см. рис. 3б) показывает, что, начиная с февраля 2019 г., наблюдается уменьшение суммарной сейсмичности, зарегистрированной в изучаемых квадратах Г (Б. Удина) и Е (р. Толуд). Из гистограммы, приведенной на рис. 3в, следует, что ошибки определения параметров по ежемесячным данным должны быть как минимум в 5 раз меньше ошибки определения отдельного события, т.к. количество суммируемых событий изменялось от 25 до 150.

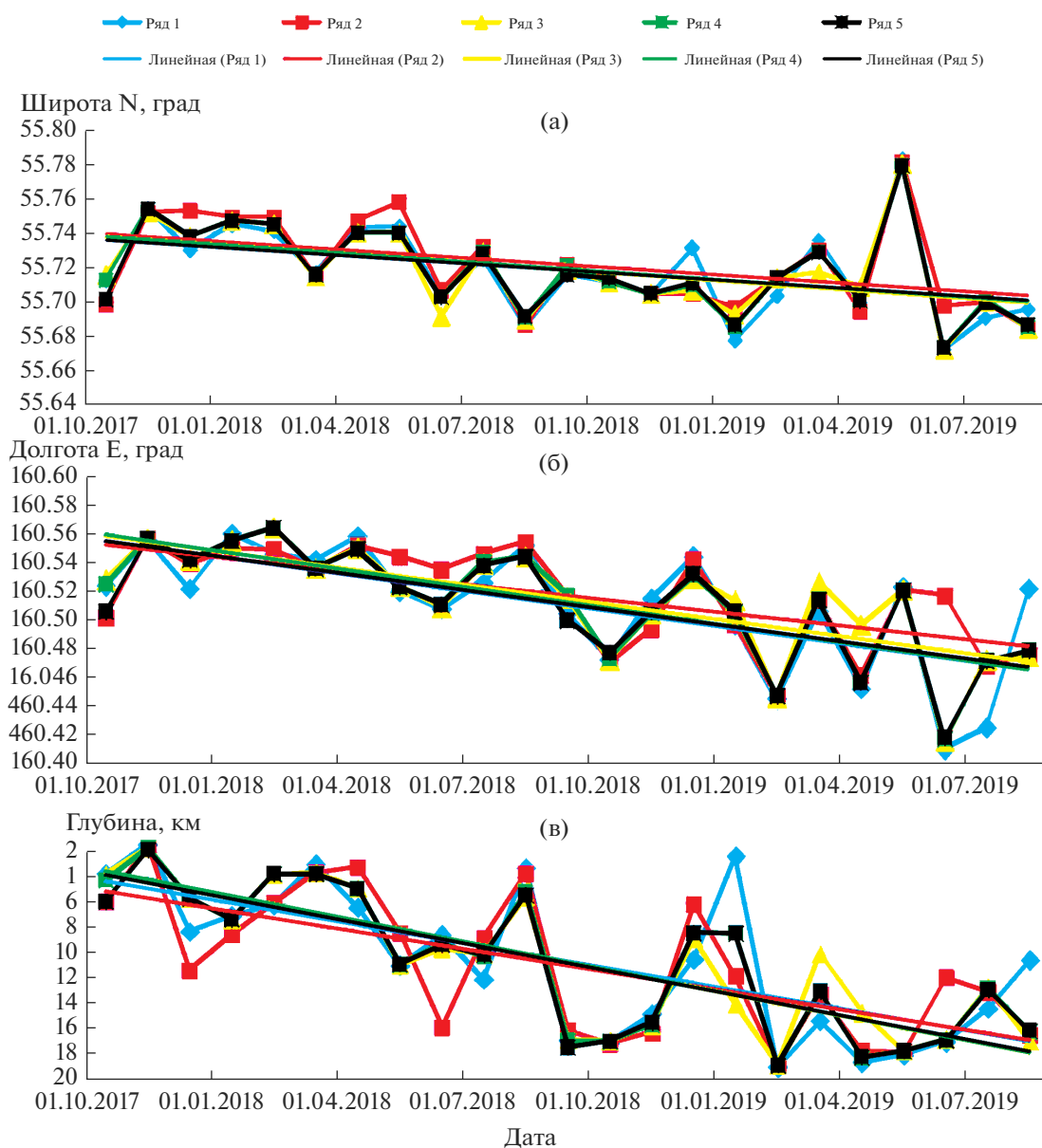


Рис. 4. Графики изменения во времени широты (а), долготы (б) и глубины (в) ЦСЭ и соответствующие им линейные тренды при осреднении данных в течение одного месяца и устранении каждого второго землетрясения (ряд 1, синий цвет), каждого 3-го (ряд 2, красный), каждого 5-го (ряд 3, желтый) и каждого 10-го землетрясения (ряд 4, зеленый). Ряд 5 (черный) построен по полной выборке.

Для того чтобы подтвердить полученные результаты, мы провели дополнительные исследования. Из первоначального ряда наблюдений последовательно удалялись землетрясения, и результат сравнивался с первоначальным, полученным по всем событиям. Сначала из исходного ряда удалили каждое 10-е землетрясение, потом 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. 4).

Итак, анализ сейсмических данных указывает на удаление и погружение ЦСЭ от вулкана Б. Удина.

ОЦЕНКИ СМЕЩЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Исходные данные и методы исследования

Миграция магматического материала должна сопровождаться деформацией земной поверхности. Поскольку топография поверхности вулканов может меняться под действием многих фак-

торов, полезно оценить размер области смещений в зависимости от глубины магматического очага. Для этого в первом приближении можно использовать решение задачи о напряжениях и деформациях, возникающих в результате расширения или сжатия малого сферического объема, расположенного в упругом полупространстве, ограниченном свободной поверхностью [Mogi, 1958]. Подъем магматического материала с глубины должен вызывать существенное повышение давления в магматической камере и, как следствие, деформацию окружающего ее полупространства и свободной поверхности. Отступление магматического материала на глубину должно вызывать существенно меньшие смещения на земной поверхности, поскольку оно не сопровождается значительным изменением давления в магматической камере. Отметим, что в литературе известны решения для более сложных областей и более сложных реологий (библиографию можно найти, например, в работе [Bonafede, Ferrari, 2009]), но с увеличением глубины очага все решения сходятся к точечному источнику деформации. Мы используем решение Могги для оценки размера области смещений на земной поверхности в зависимости от глубины магматической камеры. Если известен коэффициент Пуассона, то смещения на поверхности зависят только от глубины камеры (формулы (2) в работе [Bonafede, Ferrari, 2009]). Пусть d — глубина камеры, а коэффициент Пуассона равен 0.25. Тогда расстояние от точки максимума смещений на земной поверхности (она расположена над центром камеры), до точки, где смещения составляют половину максимума, равно $0.77d$. Расстояние до точки, где смещение составляет 0.2 от максимального значения равно $1.39d$. Следовательно, если смещения земной поверхности вызваны изменением давления в магматической камере на глубине 5 км, то ширина области смещений по изолинии 0.5 максимума составит 7.7 км, а по изолинии 0.2 максимума около 14 км.

Для анализа смещений поверхности вулкана за 2017 и 2018 гг. были использованы снимки со спутника Sentinel-1A (длина волны 5.6 см), выполненные с нисходящей орбиты 60-го трека. За период с 07.06.2017 по 23.09.2017 в архивах Европейского космического агентства найдено 10 снимков, а за период с 21.05.2018 по 30.09.2018 — 12 снимков.

Спутники Sentinel-1A и B, как и другие спутники, оснащенные радаром с синтезированной апертурой (РСА), являются средством активного дистанционного зондирования Земли. Спутниковый радар посылает импульсы к земной поверхности под некоторым углом к вертикали и принимает отраженный сигнал. По двум радарным снимкам, при наличии данных о высоте отражающей площадки над эллипсоидом (цифровой модели рельефа), можно оценить фазовый

сдвиг сигналов, полученных при съемке первого и второго снимка. По фазовому сдвигу, после введения соответствующих коррекций, можно оценить смещение отражающей площадки вдоль линии распространения радарного сигнала, т.е. в направлении на спутник, так называемое направление видения или LOS от английского line-of-sight [Дмитриев и др., 2012; Михайлов и др., 2013].

Качество интерферограммы, составленной по двум снимкам, зависит от атмосферных помех, точности задания орбиты спутника, цифровой модели рельефа, уровня шумов. Для повышения точности определения смещений были предложены методы, основанные на одновременном анализе серий интерферограмм и выделении объектов, устойчиво отражающих радарный сигнал — так называемые методы устойчивых отражателей. Поскольку при поиске устойчивых отражателей анализ ведется не только по пространству, но и по времени, появляется возможность эффективно фильтровать различные помехи и выделять смещения со средней скоростью в первые миллиметры в год (обзор и библиографию можно найти в работе [Киселева и др., 2017]).

В данном исследовании нами был применен метод малых базовых линий, который эффективен при анализе смещений устойчиво отражающих площадок на природных объектах. Для этого на первом шаге по парам снимков были построены интерферограммы с использованием цифровой модели рельефа SRTM3v4. Далее был выполнен поиск устойчивых отражателей на склонах вулкана. Анализ проводился для 2017 и 2018 гг. раздельно (рис. 5), с использованием программного пакета SARscape.

Радарную съемку исследуемой области проводил также спутник японского космического агентства ALOS-2 PALSAR-2 (длина волны 23.5 см). Длинноволновое излучение менее чувствительно к атмосферным помехам, проникает через растительность и не слишком глубокой снег, поэтому эти снимки более предпочтительны при оценке смещений на природных ландшафтах. В то же время, чем больше длина волны, тем хуже разрешение на местности (больше размер пикселя) и ниже точность оценки смещений. Действительно, одному и тому же фазовому сдвигу на интерферограмме, полученной по снимкам ALOS-2, соответствует в 4 раза большее смещение, чем на интерферограмме, полученной по снимкам спутников Sentinel-1. Кроме того, спутник ALOS-2 снимает Камчатку значительно реже. За период 2016–2018 гг. выполнено 5 снимков, из которых для построения парных интерферограмм удалось использовать три снимка, которые составили пары 04 октября 2016 г. — 13 июня 2017 г. и 13 июня 2017 г. — 02 октября 2018 г. Сопоставление результатов, полученных по снимкам различных

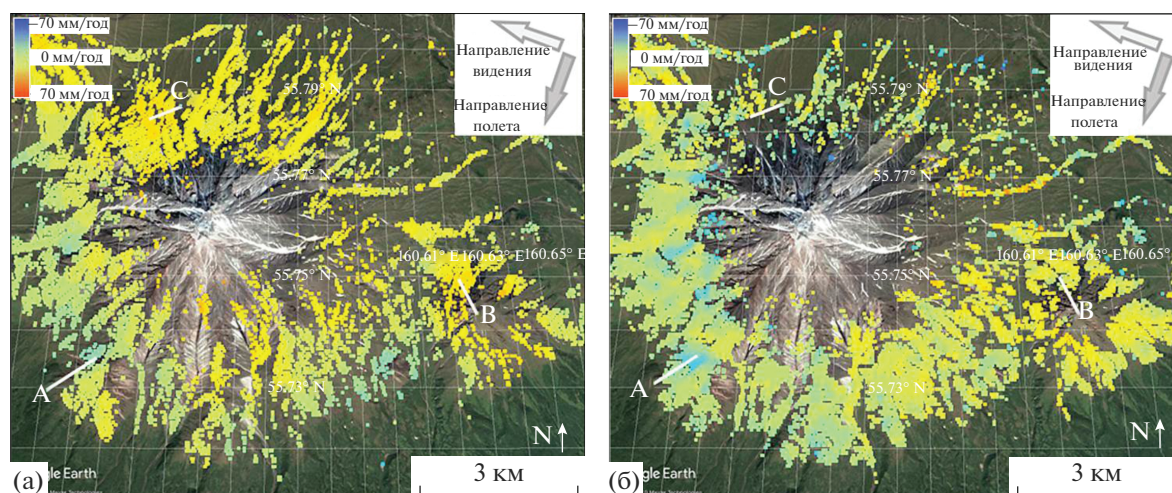


Рис. 5. Положение устойчивых отражателей на склонах вулкана Б. Удина: период съемки 07.06.2017–23.09.2017 (а); период съемки 21.05.2018–30.09.2018 (б). В качестве топографической основы рисунков использован снимок с сайта Google Earth. Цветовая шкала в верхнем левом углу – средние скорости смещений от +70 до –70 мм/год. Устойчивые отражатели синего цвета смещаются в направлении от спутника. Направление полета и направление видения показаны в правом верхнем углу стрелками. Временные серии смещений для областей А, В и С показаны на рис. 6.

спутников, с различной длиной волны, с применением различных методов важно для верификации полученных результатов.

Результаты и их обсуждение

По снимкам спутника Sentinel-1A за 2017 и 2018 гг. устойчивые отражатели обнаружены в основном на нижнем ярусе вулкана Б. Удина (см. рис. 5). Анализ временных серий смещений показал, что характер смещений на юго-западном и восточном склонах практически не изменился – совпадает и расположение областей максимальных смещений, и временные серии для областей А и В на рис. 6. Отмечается небольшое увеличение средних скоростей смещений в 2018 г., но знак смещений не меняется и за период съемки суммарные смещения не превосходят 15–20 мм. На северо-западном склоне средние скорости смещений изменились: в 2017 г. наблюдались небольшие смещения к спутнику, а в 2018 г. скорости смещений близки к нулю (временные серии для области С см. рис. 6).

Полученные результаты показывают, что существенных смещений в периоды спутниковой радарной съемки в 2017 и 2018 гг. на склонах вулкана Б. Удина не наблюдалось. Это обычно указывает либо на малую активность вулcano-тектонических процессов, либо, что более вероятно в данном случае, на то, что вызвавшие повышенную сейсмическую активность процессы происходили на большой глубине.

Поскольку снимки средневолнового диапазона позволили найти отражатели в основном у подножья вулканов, был выполнен анализ сме-

щений по трем снимкам спутника ALOS-2 PAL-SAR-2. Были построены две парные интерферограммы 04.10.2016–13.06.2017 и 13.06.2017–02.10.2018, которые характеризуют смещения за период времени между снимками (рис. 7а, б). Смещения за период с октября 2016 по июнь 2017 гг. не превосходят первые сантиметры, за исключением областей с низкой когерентностью. Когерентность является мерой корреляции фазовых значений двух сравниваемых снимков. Она меняется от 0 при отсутствии корреляции до единицы, когда корреляция идеальная. На рис. 7а, б красным контуром показаны области, внутри которых когерентность ниже 0.35. В этих областях оценки смещений не надежны.

Смещения за период с 2016 по 2018 гг. были весьма незначительными, за исключением узких зон, смещения в которых явно приурочены к локальным формам рельефа. Так, например, смещения в узких зонах в верхней части западного склона вулкана Б. Удина с октября 2016 по июнь 2017 гг. составили 5–8 см в направлении от спутника, а с июня 2017 по октябрь 2018 гг. смещения амплитудой до 10 см произошли в обратном направлении – к спутнику. Обнаруженные деформации, скорее всего, связаны с поверхностными процессами и динамикой снегового покрова. Согласно приведенным выше оценкам области смещений при активизации магматического очага на глубине 5 км должны иметь линейные размеры на земной поверхности около 10–15 км, что соответствует 0.1–0.15 градусам по широте (2–3 клетки географической сетки см. рис. 7а, б). Таких областей смещений на интерферограммах не обнаружено.

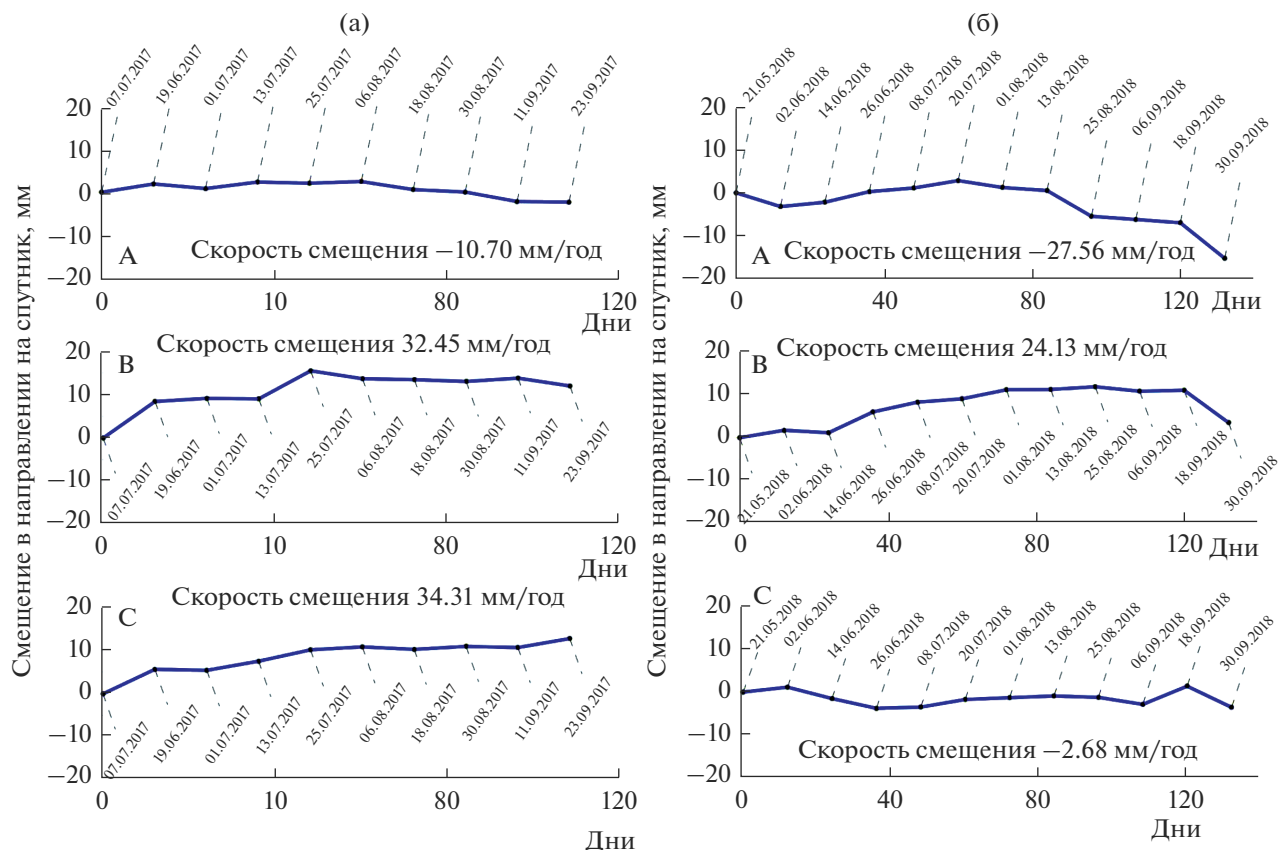


Рис. 6. Временные серии смещений устойчиво отражающих площадок на склонах вулкана Б. Удина: период съемки 07.06.2017–23.09.2017 (а); период съемки 21.05.2018–30.09.2018 (б). Положение областей, обозначенных индексами А, В, С, показано на рис. 5. Горизонтальная шкала – время съемки, вертикальная – смещения в направлении на спутник в мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты пространственно-временного анализа землетрясений каталога КФ ФИЦ ЕГС РАН по данным постоянных сейсмологических наблюдений хорошо согласуются с результатами независимых исследований по данным временных станций и с результатами наблюдений за деформацией земной поверхности по снимкам спутника Sentinel-1A и ALOS-2. Напомним, что глубина залегания верхней части магматического очага под вулканом Б. Удина в работе [Koulakov et al., 2019] оценивается ~5 км, а глубина залегания верхней части магматического очага в районе р. Толуд [Koulakov et al., 2017] равна ~15 км. Также в работе [Koulakov et al., 2019] зафиксирован линейно вытянутый, эллиптический кластер землетрясений, соединяющий очаги под вулканом Б. Удина и в районе р. Толуд. Наше исследование параметров ЦСЭ (см. рис. 3, 4) наглядно демонстрирует миграцию сейсмичности от очага под Б. Удиной к очагу в районе р. Толуд. Положение голубой стрелки на рис. 1, указывающей смещение во времени ЦСЭ, совпадает с кластером землетрясений, соединяющим очаги под вулка-

ном 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 вулкана Б. Удина, а процесс отступления и опускания магмы от этого вулкана в выделенный томографическими методами очаг в районе р. Толуд.

Этот результат также подтверждается спутниковыми наблюдениями. По данным радарной съемки спутником Sentinel-1A за 2017 и 2018 гг. и спутником ALOS-2 за 2016–2018 гг., существенных смещений земной поверхности в районе вулкана Б. Удина не наблюдалось. Полученные смещения могут указывать либо на малую активность вулcano-тектонических процессов, либо на то, что эти процессы происходили на большой глубине. Отсюда следует вывод о том, что, начиная с середины 2016 г., никаких признаков внедрения магматического материала от очага в районе р. Толуд, расположенного в средней и нижней коре, в сторону вулкана Б. Удина в северном на-

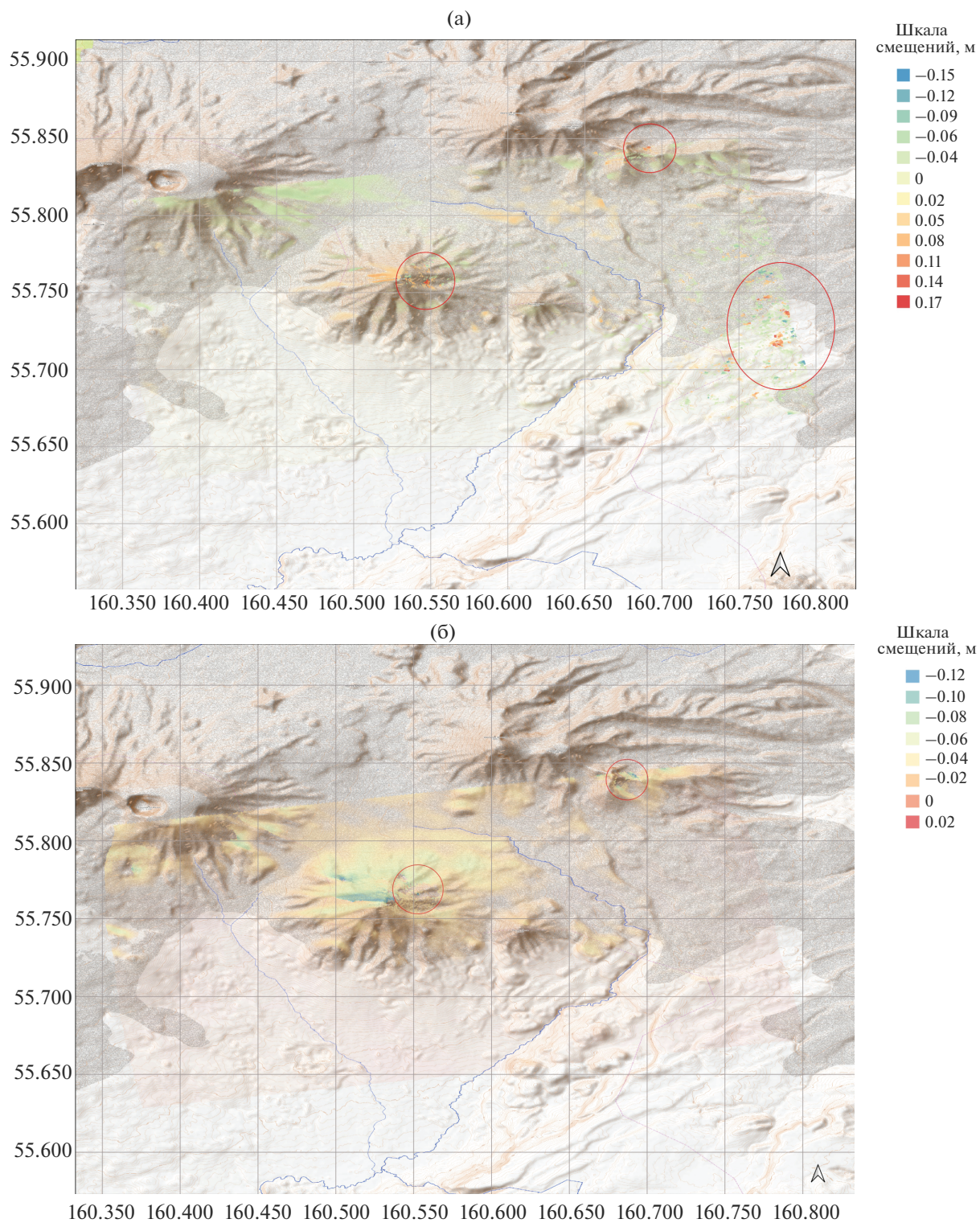


Рис. 7. Поля смещений (метры), полученные по парным интерферограммам, построенным по снимкам спутника ALOS-2 PALSAR-2 за периоды 04.10.2016–13.06.2017 (а) и 13.06.2017–02.10.2018 (б). Внутри красных контуров находятся области с низкой (<0.35) когерентностью, оценки смещений в которых ненадежны. Отрицательные значения – смещения от спутника, положительные – к спутнику.

правлении не наблюдалось. Важно, что перед извержениями камчатских вулканов Кизимен [Lingyun et al., 2013], Пл. Толбачик (ТТИ-50) [Lundgren et al., 2015] и Безымянный [Mania et al., 2019] деформации земной поверхности по спутниковым данным были зафиксированы.

Наличие гидравлической связи между район р. Толуд и районом трещинных извержений Плоского Толбачика также подтверждается тем, что и в 1975 г., и в 2012 г., через несколько дней после начала излияния мощных лавовых потоков, происходили сильные землетрясения с классом ≈ 11 в районе р. Толуд. Описанная выше гидравлическая связь делает вулкан Б. Удина маловероятным местом нового извержения, так как в этом случае магме нужно будет прокладывать путь к поверхности через остывшие, консолидированные и расположенные выше, относительно Толбачинского дола, породы постройки этого потухшего вулкана. Приведенные в работе результаты в совокупности с зафиксированными ранее фактами позволяют сделать заключение, что потухший вулкан Б. Удина является маловероятным местом нового извержения.

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. [Сенюков, Нуждина, 2011] и Кизимен в 2010 г. [Сенюков и др., 2010] позволила не только корректно оценить опасность, в том числе по изучению ЦСЭ, но и сделать успешный прогноз извержения [Сенюков, 2013]. К сожалению, с 2013 г. после сокращения финансирования работ Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН, новые постоянные станции не устанавливались, поэтому извержения вулканов Жупановский в 2013–2015 гг. и Камбальный в 2017 г. контролировались только по удаленным станциям, что крайне затрудняет корректный мониторинг и оценку опасности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) за предоставленные радарные снимки спутника ALOS-2 PALSAR-2 в рамках научного проекта ER2A2N075, а также Европейское космическое агентство за снимки спутника Sentinel-1A.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки № 14.W03.31.0033 “Геофизические исследования, мониторинг и прогноз развития катастрофических геодинамических процессов на Дальнем Востоке РФ”. Работы сотрудников КФ ФИЦ ЕГС РАН

также выполнялись 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. Работа В.А. Тимофеевой выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-35-90092.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

Дмитриев П.Н., Голубев В.И., Исаев Ю.С., Киселева Е.А., Михайлов В.О., Смольянинова Е.И. Некоторые проблемы обработки и интерпретации данных спутниковой радарной интерферометрии на примере мониторинга оползневых процессов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 130–142.

Киселева Е.А., Михайлов В.О., Смольянинова Е.И., Дмитриев П.Н. К вопросу мониторинга смещений земной поверхности методами радарной спутниковой интерферометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 122–132.

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.

Михайлов В.О., Киселева Е.А., Смольянинова Е.И., Дмитриев П.Н., Голубева Ю.А., Исаев Ю.С., Дорохин К.А., Тимошкина Е.П., Хайретдинов С.А., Голубев В.И. Мониторинг оползневых процессов на участке Северокавказской железной дороги с использованием спутниковой радарной интерферометрии в различных диапазонах длин волн и уголкового отражателя // Геофизические исследования. 2013. Т. 14. № 4. С. 5–22.

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

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

Самойленко С.Б., Мельников Д.В., Магуськин М.А., Овсянников А.А. Начало Трещинного Толбачинского извержения в 2012 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 2. С. 20–22.

Сенюков С.Л., Нуждина И.Н., Дроздина 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.

Сенюков С.Л., Нуждина И.Н. Сейсмичность вулкана Корякский в 1966–2009 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока Рос-

сии // Труды Третьей научно-технической конференции, Петропавловск-Камчатский, 9–15 октября 2011 г. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 140–144.

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

Сенюков С.Л., Нуждина И.Н., Чебров Д.В. Вулканы Камчатки // Землетрясения России в 2017 году. Обнинск, 2019. С. 93–103.

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

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

Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 117 с.

Чебров В.Н., Дрозин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сенюков С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Яцук В.В. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18–40.

Чеброва А.Ю., Чебров В.Н., Матвеев Е.А., Токарев А.В., Чепарёв А.С. Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале Геофизической службы РАН по состоянию на середину 2015 года. Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных // Материалы Десятой Международной сейсмологической школы Азербайджана, Обнинск, 14–18 сентября 2015 г. Обнинск, 2015. С. 356–360.

Чебров Д.В., Чеброва А.Ю., Матвеев Е.А., Дрознина С.Я., Митюшкина С.В., Гусев А.А., Салтыков В.А., Воронцов П.В. Камчатка и Командорские острова // Землетрясения Северной Евразии, 2013 год. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019а. С. 198–213.

Чебров Д.В., Дрознина С.Я., Сенюков С.Л., Шевченко Ю.В., Митюшкина С.В. Камчатка и Командорские острова // Землетрясения России в 2017 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019б. С. 67–76.

Bonafede M., Ferrari C. Analytical models of deformation and residual gravity changes due to a Mogi source in a viscoelastic medium // Tectonophysics. 2009. V. 471. P. 4–13.

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., 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. P. 3852–3874. <https://doi.org/10.1002/2017JB014082>

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>

Lingyun Ji, Zhong Lu, Dzurisin D., Senyukov S. 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.

<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.02.011>

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.

<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.05.011>

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. P. 1278. <https://doi.org/10.3390/rs11111278>

Mogi K. Relation between the eruptions of various volcanoes and deformations of the ground surfaces around them // Bull. Earth. Res. Inst. 1958. V. 36. P. 99–134.

Senyukov S.L., Nuzhdina I.N., Droznina S.Y. et al. Seismic monitoring of the Plosky Tolbachik eruption in 2012–2013 (Kamchatka peninsula Russia) // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2015. V. 302. P. 117–129. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.06.018>

Joint Analysis of Seismicity and Sar Interferometry Data for Assessment of Eruption Possibility of Dormant Volcano Bol'shaya Udina

S. L. Senyukov^{1, 2, *}, V. O. Mikhailov², I. N. Nuzhdina¹, E. A. Kiseleva², S. Ya. Droznina¹, V. A. Timofeeva², M. S. Volkova², N. M. Shapiro^{2, 3}, T. Yu. Kozhevnikova¹, Z. A. Nazarova¹, and O. V. Sobolevskaya¹

¹Kamchatka Branch of the Geophysical Survey of the RAS, bul'var Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia

²Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Bol'shaya Gruzinskaya str., 10, p. 1, Moscow, 123242 Russia

³Institute of Earth Sciences, CNRS, University of Grenoble Alpes, CNRS (UMR5275), 1381, rue de la Piscine, Gieres, 38610 France

*e-mail: ssl@emsd.ru

Weak seismic activity had been observing beginning October 2017 in the area of the dormant volcano Bol'shaya Udina (B. Udina), located 10 km southeast of the Ploskiy Tolbachik volcano. Seismic tomography data showed that south of the B. Udina volcano in the area of the Tolud river there is a long-lived magma chamber with an upper boundary at a depth of about 15 km, which can be associated with the feeding system of the Ploskiy Tolbachik volcano [Koulakov et al., 2017]. Saltykov et al. [2018] and Koulakov et al. [2019] suggested

that the observed seismic activation caused by the possible intrusion of magma under the Udina volcanoes and, as a result, indicated a high probability of the resumption of volcanic activity. In this paper we analyzed the data of a network of permanent seismic stations, which showed that from October 2017 to August 2019, the center of seismic energy, which indicates the position of the region where the main seismic events occur, had been systematically shifting from the B. Udina volcano to the south. Using the SAR images of the Sentinel-1A satellite (wavelength 5.6 cm), taken from the descending orbit of track 60 from 07.06.2017 to 23.09.2017 (10 images), and from 21.05.2018 to 30.09.2018 (12 images), we determined time series and estimated the average displacement rates on the slopes of the B. Udina. Persistent scatterers were identified only at the foothill of the B. Udina. An analysis of the time series of the volcano surface displacements showed that the style of displacements in 2017 and 2018 on the southwestern and eastern slopes was the same. On the northwestern slope, the average displacement velocities in 2018 decreased. To verify these results, two pair interferograms were constructed using three SAR images of the ALOS-2 PALSAR-2 satellite (wavelength 23.5 cm) performed at 04.10.2016, 13.06.2017 and 02.10.2018 from the ascending orbit. The displacements on both interferograms, that characterize periods of time between images, do not exceed the first centimeters, with the exception of narrow zones confined to local topography. The detected deformations are most likely associated with surface processes. The linear dimensions of the deformation areas associated with pressure changes in a magma chamber at a depth of 5 km should be 10–15 km, while the displacement regions detected by satellite data are much smaller. The obtained results allow us to propose an alternative model, according to which seismic activation accompanied the process of retreat and immersion of the magmatic melt from the Bol'shaya Udina volcano toward the source identified by tomographic methods in the area of the Tolud River.

Keywords: Bol'shaya Udina volcano, seismic monitoring, satellite radar interferometry, migration of seismicity, activation of volcano