

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ АКТИВНОСТИ ВУЛКАНОВ КЛЮЧЕВСКОЙ И ШИВЕЛУЧ С 02.02.2000 ПО 31.07.2017.

Сенюков С.Л.¹, Шапиро Н.М.², Дрознина С.Я.¹, Дрознин Д.В.¹, Нуждина И.Н.¹, Близнецов В.Е.¹

¹ Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г.Петропавловск-Камчатский, ssl@emsd.ru

² Парижский институт физики Земли, г.Париж

Введение

Северная группа вулканов (СГВ) – крупнейший центр современного вулканизма мира, в котором извергается более половины продуктов всех вулканов Камчатки и Курильских островов. Группа расположена в северной части полуострова Камчатка вблизи стыка Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Она включает 12 вулканов Ключевской группы и отдельно расположенный вулкан Шивелуч. С 02.02.2000 по 31.07.2017 в Северной группе были активны вулканы: Шивелуч, Ключевской, Безымянный и Плоский Толбачик. Общие сведения об упомянутых вулканах, данные о строении, извержениях и их продуктах, землетрясениях, полученные при многочисленных исследованиях с 1935 г. по 1990 г. опубликованы в книге «Действующие вулканы Камчатки» [2]. Ниже приведены краткие и наиболее важные сведения для исследования особенностей их активности за 2000-2017 гг. по данным лаборатории исследований сейсмической и вулканической активности (ЛИСВА).

Вулкан Шивелуч – самый северный действующий вулкан Камчатки. Современная постройка включает три главных элемента: Старый Шивелуч, древнюю кальдеру и активный Молодой Шивелуч. Координаты современного активного купола: 56.63° с.ш., 161.32° в.д.; абсолютная высота ~2500 м. Расположен примерно в 80 км на северо-восток от Ключевского. В исследуемый период вулкан находился в активной стадии извержения, характеризующейся чередованием продолжительных периодов повышенной вулканической активности и промежутков покоя. В периоды повышенной активности регистрировались газо-пепловые выбросы высотой до 15 км над уровнем моря, сход пирокластических потоков и горячих лавин.

Вулкан Ключевской – самый активный и мощный базальтовый вулкан Курило-Камчатской вулканической области. Координаты вершины - 56.06° с. ш. и 160.63° в. д. Абсолютная высота вулкана - 4750 м. В исследуемый период наблюдались только вершинные извержения с излиянием лавовых потоков и пепловой эмиссией.

Вулкан Безымянный – координаты вершины: 55.98° с.ш., 160.59° в.д. Абсолютная высота вулкана 2869 м. Вулкан находится в 10 км к юго-западу от Ключевского. В исследуемый период для вулкана Безымянный были характерны кратковременные эксплозивные извержения продолжительностью от 20 минут до 3-х суток с высотой пепловых выбросов от 6 км до 15 км над уровнем моря.

Действующий вулкан Плоский Толбачик расположен в южной части Ключевской группы вулканов и имеет координаты: 55.81° с.ш., 160.37° в.д. Последнее Трещинное Толбачинское извержение имени 50-летия Института вулканологии и сейсмологии произошло с 27 ноября 2012 г. до сентября 2013 г. (ТТИ-2012-2013) и сопровождалось умеренной пепловой эмиссией и излияниями протяженных лавовых потоков.

Камчатский филиал (КФ) ФИЦ ЕГС РАН проводит мониторинг активности вулканов Камчатки с 2000 г. по трем видам наблюдений: сейсмологические, спутниковые и видео или визуальные. Ежедневная работа по сбору, обработке и представлению информации об активности вулканов позволяет своевременно и обоснованно оценивать их состояние и делать выводы о возможном развитии вулканической активности. Результаты комплексного мониторинга вулканической активности с выставленным цветовым кодом опасности ежедневно публикуются на официальной странице КФ ФИЦ ЕГС (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>, свидетельство о государственной регистрации № 2014620148 от 20 января 2014 г.). Более подробно о методах наблюдений, их развитии и полученных результатах можно ознакомиться в работах [4,5]. В данной работе предлагаются первые результаты обобщения данных комплексных исследований активности вулканов Ключевской и Шивелуч на Камчатке за 17.5 лет наблюдений, полученных и систематизированных в ЛИСВА КФ ФИЦ ЕГС РАН, с целью выявления возможных закономерностей их eruptивной деятельности.

Результаты исследований активности вулкана Ключевской

Для перевода эруптивной активности вулкана Ключевской в цифровой формат были приняты следующие обозначения:

1) Значение активности оценивалось по высоте пепловой эмиссии в километрах над кратером. Прежде всего, высота пепла фиксировалась по данным видео или визуальных наблюдений. Если вулкан был закрыт, то высота пепловой эмиссии оценивалась по спутниковым данным. Для вулкана Ключевской оценка высоты пепловой эмиссии по сейсмическим данным начала проводиться только с 2012 г. [1] и фактически использовалась только для слабых пепловых выбросов при отсутствии данных по видео и спутниковым наблюдениям.

2) Для всех вариантов фиксации пепловой эмиссии без указания конкретной высоты, например, пепловый шлейф по спутниковым данным, грохот взрывов при отсутствии видимости, возможные пепловые выбросы по сейсмическим данным, значение активности приравнивалось значению 0.5.

3) Дополнительно для визуализации эруптивной активности фиксировалась стромболианская деятельность (или свечение) в кратере со значением 0.5 и излияние лавовых потоков на склоны вулкана со значением 1.

Все собранные в базе данных результаты наблюдений за 6390 дней представлены на рис.1. За период исследований можно выделить 8 фаз эруптивной активности в вершинном кратере, сопровождавшихся стромболианской деятельностью, пепловыми эмиссиями и излиянием лавовых потоков. Фазы отмечены цифрами на рис.1. Можно отметить квазипериодичность в последовательности выделенных фаз. Для определения квазипериода были определены даты максимальных значений активности в этих фазах. Они представлены в таблице 1. В этой таблице на строке с 6-м номером жирным шрифтом выделен промежуток времени равный $\Delta=1132$ суткам, который примерно в два раза больше остальных. Этот большой промежуток многие вулканологи связывают с подготовкой и извержением ТТИ-2012-2013, обозначенным прямоугольником на рис.2. Таким образом, если убрать из таблицы 1 значение $\Delta=1132$ суток, то квазипериод получится равным $T_{kv}=598$ суток со среднеквадратичным отклонением 40 суток. При этом удаленный промежуток $\Delta=1132$ суток примерно равен удвоенному квазипериоду $2 * T_{kv}=1196$ суток. Это позволяет сделать предположение, что именно ТТИ-2012-2-13 нарушило квазипериодичность активности Ключевского, и ожидаемая активность вулкана Ключевской реализовалась в виде извержения Плоского Толбачика. На основе полученной закономерности можно предложить прогноз. Если к дате 06.09.2016 прибавить 598 суток, то следующая мощная фаза эксплозивно-эффузивной активности вулкана Ключевской ожидается примерно 27 апреля 2018 г. ± 40 суток.

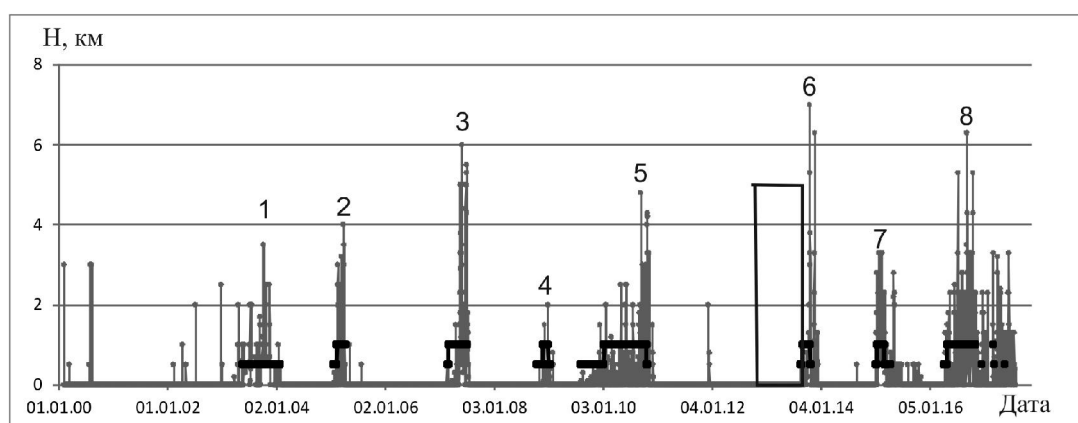


Рис. 1. График активности вулкана Ключевской. Цифрами отмечены 8 фаз эруптивной активности, прямоугольник показывает время извержения ТТИ-2012-2013. Черные точки со значением «0.5» показывают стромболианскую деятельность, а со значением «1» — излияние лавовых потоков.

Таблица 1. Даты максимальной активности вулкана Ключевской для выделенных 8-ми фаз и промежутки времени между ними.

№	Дата	Δ , сутки	$(\Delta-598)$, сутки	№	Дата	Δ , сутки	$(\Delta-598)$, сутки
1	03.10.2003			5	09.09.2010	624	36
2	23.03.2005	537	-51	6	15.10.2013	1132	544
3	27.05.2007	795	207	7	15.02.2015	488	-100
4	24.12.2008	577	-11	8	06.09.2016	569	-19

Результаты исследований активности вулкана Шивелуч

Для перевода эруптивной активности вулкана Шивелуч в цифровой формат были приняты следующие обозначения:

1) Значение активности оценивалось по высоте пепловой эмиссии в километрах над куполом. Прежде всего, высота пепла фиксировалась по данным видео и визуальных наблюдений. Если вулкан был закрыт, то высота пепловой эмиссии оценивалась по сейсмическим и спутниковым данным [6].

2) Для всех вариантов фиксации пепловой эмиссии без указания конкретной высоты, например, возможные пепловые выбросы по сейсмическим данным, пепловый шлейф по спутниковым данным, регистрация пепловых выбросов по видео наблюдениям без указания высоты из-за скрытости верхней части пеплового шлейфа облачностью, значение активности приравнялось значению 0.5.

Все собранные в базе данных результаты наблюдений за 6390 дней представлены на рис.2. На этом рисунке выделяется один продолжительный период покоя с ноября 2005 г. до декабря 2006 г. Данные активности вулкана Шивелуч были введены в программу DIMAS [2], в которой существует возможность оценивать спектральную плотность мощности сигнала с помощью процедуры PSD. Значения мощностей и периодов для выделенных пиков приведены в таблице 2. Здесь можно отметить, что третий по мощности пик имеет период равный 578.7 суткам, близкий к значению квазипериода вулкана Ключевской.

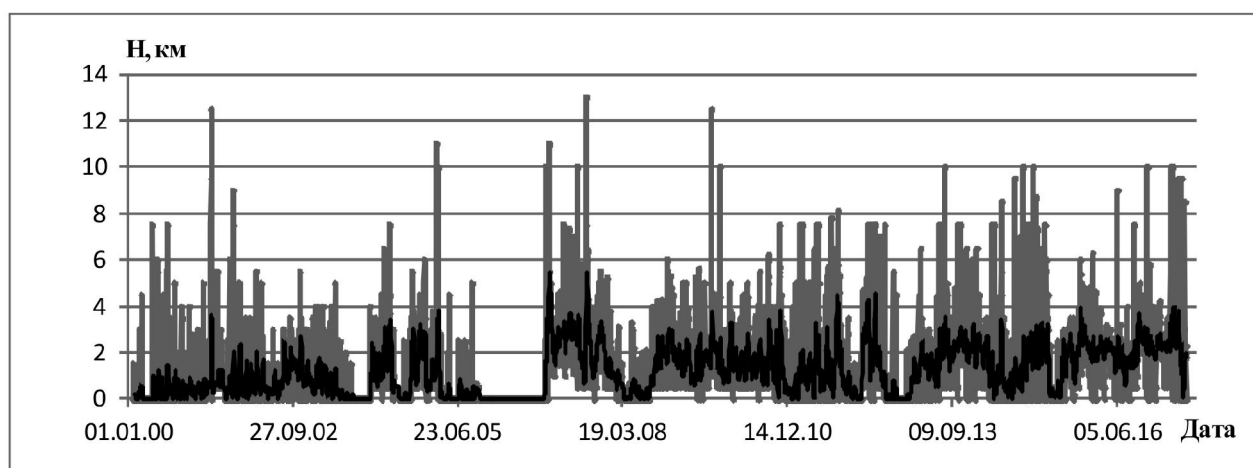


Рис. 2. График активности вулкана Шивелуч (серый цвет) с линией тренда линейной фильтрации по 10-ти значениям (черный цвет).

Для последующей оценки опасности сильных повторных пепловых выбросов в режиме реального времени были выбраны даты пепловых выбросов с высотой 8 км и более над уровнем моря (всего 121 событие) и вычислены задержки между ними. Было посчитано количество таких событий попадающих в 5-ти суточное окно со сдвигом 5 суток. Гистограмма частоты на рис. 3 наглядно показывает, что вероятность повторного сильного извержения в первые 5 суток равна 29%, следующие 5 суток – 21% и еще следующие 5 суток – 10%. Можно также отметить повышенную относительно соседних окон вероятность для интервалов 30, 35 и 95 суток.

Таблица 2. Значения частот, периодов и мощностей для выделенных пиков на диаграмме PSD.

№	Частота, Гц	Период, сутки	Мощность, дБ	№	Частота, Гц	Период, сутки	Мощность, дБ
1	1.10E-08	1052.2	75.5	7	5.50E-08	210.4	69
2	1.40E-08	826.7	78.2	8	8.50E-08	136.2	66.7
3	2.00E-08	578.7	74.5	9	1.16E-07	99.8	67.4
4	3.60E-08	321.5	73.7	10	1.50E-07	77.2	66.5
5	4.40E-08	263.0	69	11	3.20E-07	36.2	67
6	4.70E-08	246.3	71.4	12	6.00E-07	19.3	64.3

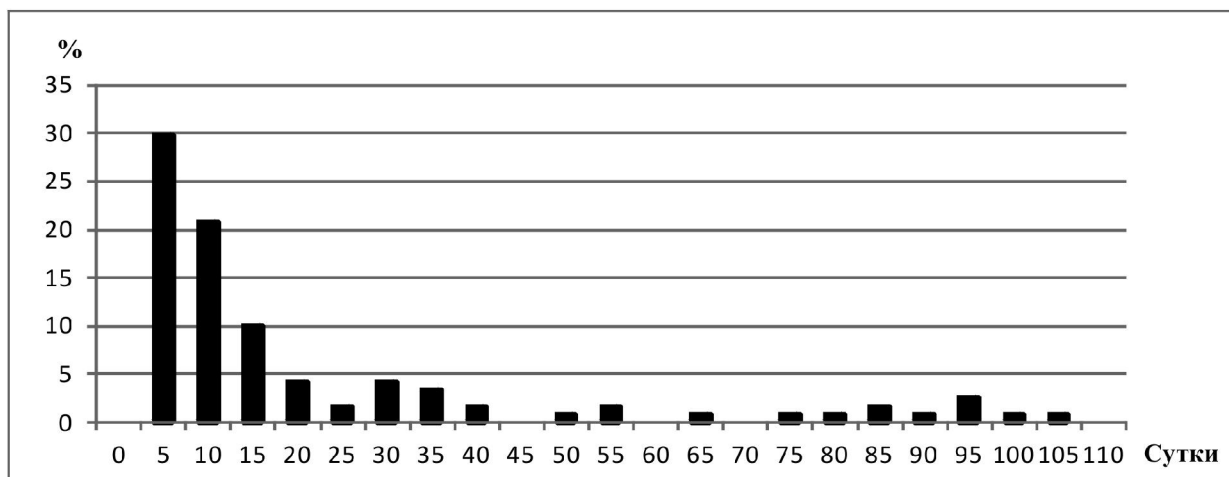


Рис. 3. Частота (в процентах) возможных следующих пепловых выбросов с высотой 8 км и более над уровнем моря в зависимости от времени задержки от произошедшего с 5-ти суточным интервалом.

Сопоставление эруптивной активности вулканов Ключевской и Шивелуч

Для сравнения активности вулканов Ключевской и Шивелуч было сделано одно вполне логичное допущение. Стромболианская активность Ключевского, а это взрывы в кратере, со значением 0.5 была добавлена к его значениям пепловой эмиссии. На рис.4А представлены графики активности вулканов Ключевской и Шивелуч осредненные в скользящем окне 200 суток. Можно отметить, что в деятельности этих двух вулканов была продолжительная пауза покоя с ноября 2005 г. до декабря 2006 г., а также несколько совпадающих по времени максимумов эксплозивной деятельности. Более наглядно периоды синхронной деятельности показывает график корреляции на рис. 4Б:

- 1) для большего интервала времени (~60%) периода 2005-2016 гг. коэффициент корреляции $K_{кор}$ получился примерно «0.7», что свидетельствует о синхронности в эруптивной деятельности этих вулканов;
- 2) отмеченная выше синхронность нарушалась в трех случаях, которые можно связать с подготовкой и извержениями вулканов Плоский Толбачик и Безымянный;
- 3) для периода с 2000 г. до 2004 г. $K_{кор}$ изменялся от «0.4» до «-1.0». Отсутствие корреляции в отмеченное время возможно связано с длительной паузой в активности Ключевского после его параксизмального извержения в 1994 г. и постепенным нарастанием активности к 2003-2004 гг.

Заключение

На основе изучения графиков активности вулканов Ключевской и Шивелуч за период наблюдений с 02.02.2000 до 01.08.2017 выявлены факты:

- 1) Определена квазипериодичность в эруптивной деятельности вулкана Ключевской с квазипериодом ~600 суток.
- 2) Третий по мощности пик периодограммы активности вулкана Шивелуч имеет период равный 578.7 суткам, близкий к значению квазипериода вулкана Ключевской. Определена вероятность повторного сильного извержения с высотой пеплового выброса 8 км и более над уровнем моря по выборке из 121 события. Она получилась равной 29% в первые 5 суток, 21% - в следующие 5 суток и 10% – еще в последующие 5 суток.
- 3) Для большего интервала времени (~60%) периода 2005-2016 гг. коэффициент корреляции $K_{кор}$ получился равным примерно «0.7», что свидетельствует о синхронности в эруптивной деятельности этих вулканов. Отмеченная синхронность нарушалась в трех случаях, которые можно связать с подготовкой и извержениями вулканов Плоский Толбачик и Безымянный. Для вулкана Безымянный имеется ввиду возобновление активности после продолжительной паузы.

Полученные факты позволяют предложить следующую гипотезу для интерпретации эруптивной активности вулканов Шивелуч и Ключевской в 2000-2017 гг. Отмеченная выше синхронность вулканической активности с квазипериодом примерно 600 суток предполагает наличие некоторой общей причины регионального масштаба. Возможно, это периодическое сжатие плит, при котором происходит воздействие на магматические очаги, и усиление эруптивной деятельности. Напомним, что оба вулкана расположены вблизи стыка плит. При этом Шивелуч находится далеко от других вулканов, и его активность не зависит от них. Отклонение активности Ключевского от

активности Шивелуча наблюдается в случаях, если происходит отток магматического материала из системы Ключевского к соседним вулканам Плоский Толбачик и Безымянный накануне их новых извержений после продолжительных пауз. Возможно также второе объяснение, что это следствие деформационных процессов накануне извержений.

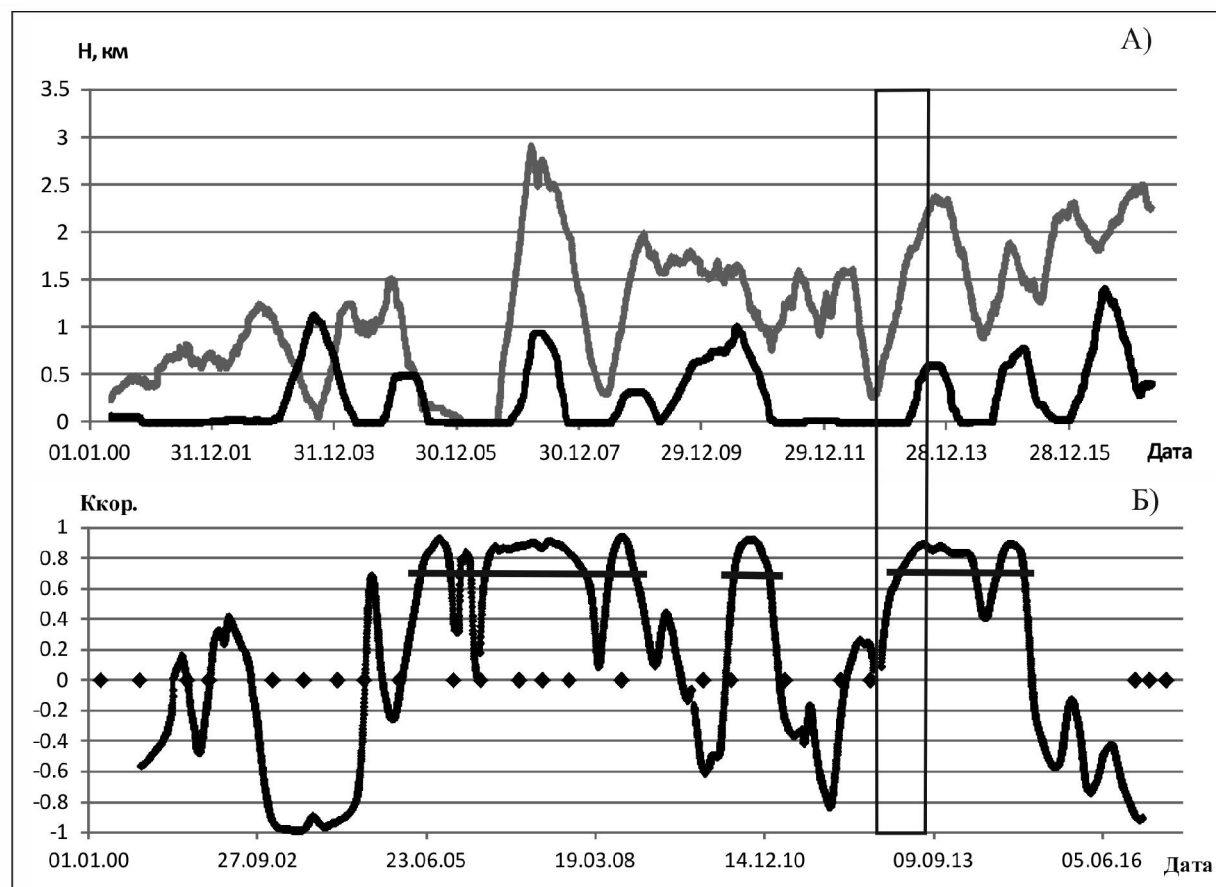


Рис. 4. А) Графики активности для вулканов Шивелуч (серый) и Ключевской (черный) осредненные в скользящем окне 200 суток. Б) График коэффициента корреляции между графиками активности из А) в скользящем окне 365 дней. Прямоугольник показывает время извержения ТТИ-2012-2013, черные ромбики – эксплозивные извержения вулкана Безымянный, горизонтальные черные линии обозначают отрезки времени со средним значением $K_{кор.}=0.7$.

Список литературы

1. Близнецов В.Е., Сеньюков С.Л. Программа ADAP для автоматического выделения пепловых выбросов и расчёта их высоты по сейсмологическим данным // Сейсмические приборы. 2015. Т. 51. № 1. С. 46–59.
2. Действующие вулканы Камчатки // отв. ред. С.А.Федотов и Ю.П.Масуренков, М.: Наука, 1991, Т.1, 302с.
3. Дроздин Д.В., Дрознина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы ИФЗ РАН. Москва 2010 г. Т.46. № 3. С. 22-34.
4. Сеньюков С.Л. Мониторинг и прогноз активности вулканов Камчатки по сейсмологическим данным в 2000–2010 гг. // Вулканология и сейсмология. 2013а. № 1. С. 96–108.
5. Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Дрознина С.Я., Захарченко Н.З., Кугаенко Ю.А., Мельников Д.В., Мишаткин В.Н., Муравьев Я.Д., Нуждина И.Н., Рыбин А.В., Сеньюков С.Л., Сергеев В.А., Сероветников С.С., Титков Н.Н., Фирстов П.П., Яцук В.В. Развитие системы комплексного инструментального мониторинга вулканов Дальневосточного региона // Сейсмические приборы. 2012. Т. 48. № 4. С. 40–54.
6. Senyukov S.L., Droznina S.Ya., Kozhevnikova T.Yu. Experience of the detection of ash plume and estimation its height using local seismicity for Kamchatkan volcanoes during 2003–2011 (Kamchatka Peninsula, Russia) // Complex monitoring of volcanic activity: methods and results. New York: Nova Science Publishers, Inc. 2013. P. 35–52.