



УДК 551.21

Н. А. Жаринов, Ю. В. Демянчук

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский e-mail: nzhar@kscnet.ru*

Вершинные извержения вулкана Ключевской (Камчатка) в 2003–2013 гг.

Рассматриваются активность вулкана Ключевской во время вершинных извержений 2003–2013 гг.; состояние вершинного кратера в ходе вершинных извержений; влияние высоты стояния лавы в кратере на начало извержений; приводятся характеристики грязевых потоков; обсуждается периодичность извержений вулканов северной группы; рассматриваются сейсмичность и деформации в связи с извержениями; приводятся данные о составе пеплов вершинных извержений 2003–2013 гг.

Введение.

Базальтовый Ключевской вулкан ($56,1^\circ$ с. ш., $160,6^\circ$ в. д.), со средним расходом 60 млн т. в год по частоте извержений находится на первом месте среди Камчатских вулканов. С 1945 г., когда произошло пароксизмальное вершинное извержение вулкана Ключевской, имеются данные о 15 побочных и 15 крупных вершинных извержениях. Объём отдельных побочных извержений превышал 50 млн т., максимальный объём вершинных извержений был близок 100 млн т. [12, 15, 19, 20, 21]. Настоящая работа является продолжением систематических исследований извержений вулкана, начатых в 1935 г., с основания в пос. Ключи Камчатской вулканологической станции [12, 13, 14, 15, 19, 21 и др.].

В современной деятельности вулкана можно выделить два периода. С 1932 г. по 1990 г. на вулкане происходили как побочные, так и вершинные извержения, иногда такие события происходили одновременно. В феврале 1990 г. первый период закончился. После возобновления активности вулкана с 1993 г. по 2013 г. происходят только вершинные извержения.

Активность вулкана Ключевской в 2003–2013 гг.

В 1994 г. произошло пароксизмальное извержение, во время которого дно вершинного кратера понизилось на 550 м. После продолжительной паузы прошла серия из шести вершинных извержений: (19.05.2003 — 27.01.2004; 16.01.2005 — 06.04.2005; 15.02.2007 — 09.07.2007; 08.10.2008 — 09.01.2009; 07.09.2009 — 05.11.2010; 15.08.2013 — 20.11.2013 гг.).

Развитие событий на всех 6 извержениях шло примерно по одному сценарию.

1. Подготовка извержения начиналась с появления свечения и пепловых выбросов в центральном кратере. Появление свечения в кратере означало начало извержения.

2. На начальном этапе извержения лава была насыщена газами, в это время обычно наблюдалась усиленная эксплозивная деятельность. В ночное время над кратером отмечалось фонтанирование лавы, днем — пепловые выбросы. Эксплозивный этап извержения сопровождался образованием внутрикратерного шлакового конуса.

3. При заполнении вершинного кратера лавой происходило излияние её на склоны вулкана, наступал эффузивный этап извержения.

4. Поступление раскаленной лавы на склоны вулкана вызывало интенсивное таяние снега и льда, в конце лавовых потоков происходили фреатические взрывы, напоминающие побочные извержения на склоне вулкана. Насыщенные пеплом парогазовые струи от таких взрывов поднимались до 10 км и более над вершиной вулкана. Возникали грязевые потоки — лахары.

5. Завершение извержений обычно сопровождалось мощной эксплозивной деятельностью, в ходе которой могли образовываться провалы dna вершинного кратера.

Основные различия извержений 2003–2013 гг. были в их продолжительности, характере извержений, а также соотношении эксплозивных и эффузивных периодов.

Во время извержения 19 мая 2003 г. — 27 января 2004 г. (253 дня) происходило заполнение кратера лавой и пирокластикой. Количество и высоты пепловых выбросов увеличивались с 200–300 м в апреле-мае до 2500–3000 м в октябре-ноябре (рис. 1). Извержение 16 января 2005 г. — 6 апреля 2005 г. (80 дней) начиналось как эксплозивное. По мере заполнения кратера лавой извержение перешло в эксплозивно-эффузивное. 23 марта во время мощного пеплопада в пос. Ключи вес пробы пепла составил 350 г/м^2 . К концу извержения в кратере образовался шлаковый конус высотой 4746 м н. у. м. (рис. 2а). Более подробные данные об активности вулкана в 2003–2005 гг. приведены в [21].

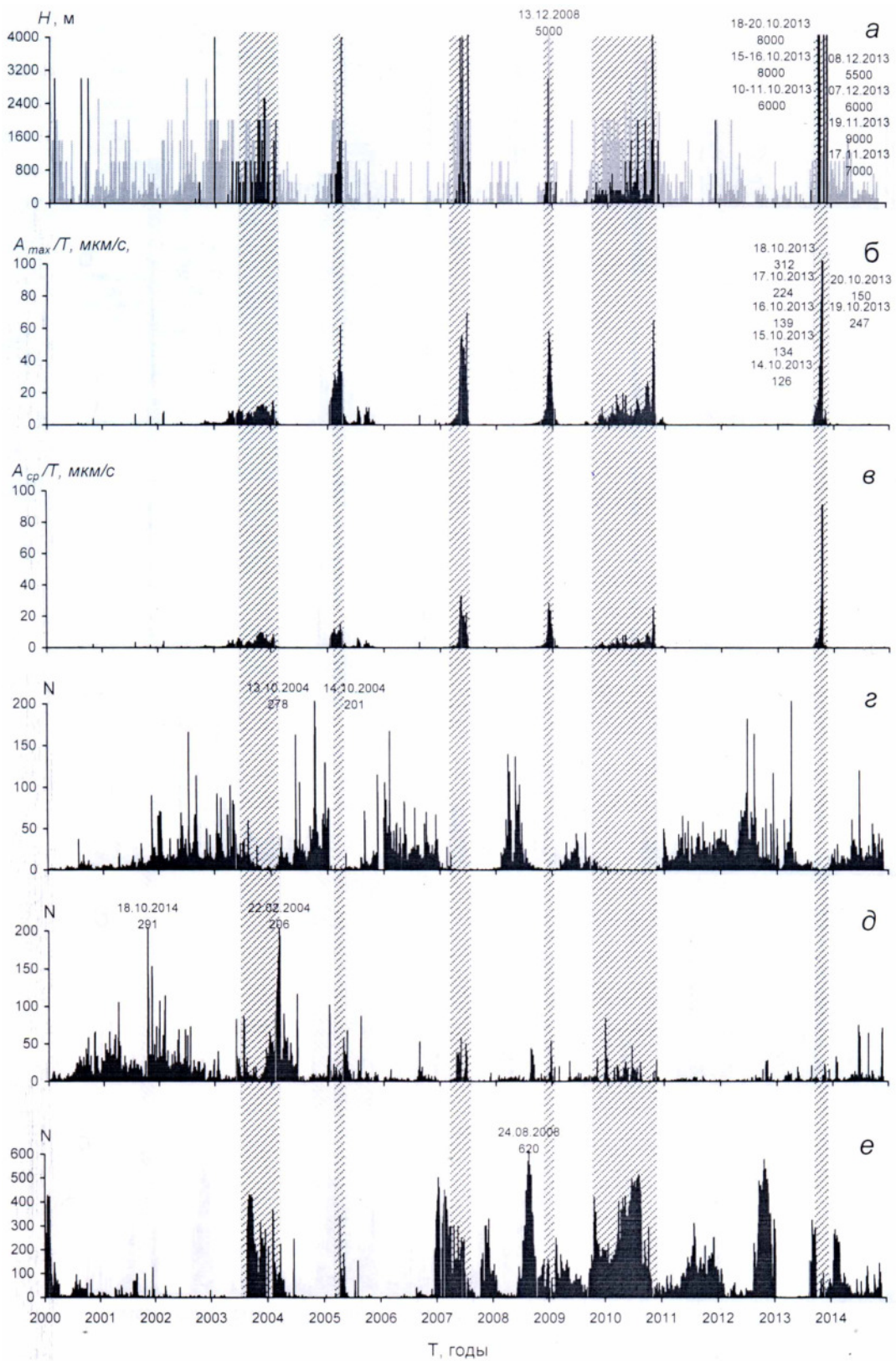


Рис. 1. Суточные характеристики сейсмической и вулканической активности вулкана Ключевской в 2000–2014 гг.: а — изменение высоты парогазовых (светлые линии) и газо-пепловых выбросов (залитые линии), подписаны высоты выбросов более 4000 м; б — вулканическое дрожание A_{max}/T мкм/с; в — A_{cp}/T мкм/с — среднее значение вулканического дрожания; г — число вулканических землетрясений I типа; д — число вулканических землетрясений II–III; е — число вулканических землетрясений IV типа. Тип землетрясений дан по классификации П. И. Токарева. Характеристики сейсмической активности приведены по данным обработки КФ ГС РАН. Вертикальной штриховкой показаны периоды вершинных извержений 2003–2014 гг.

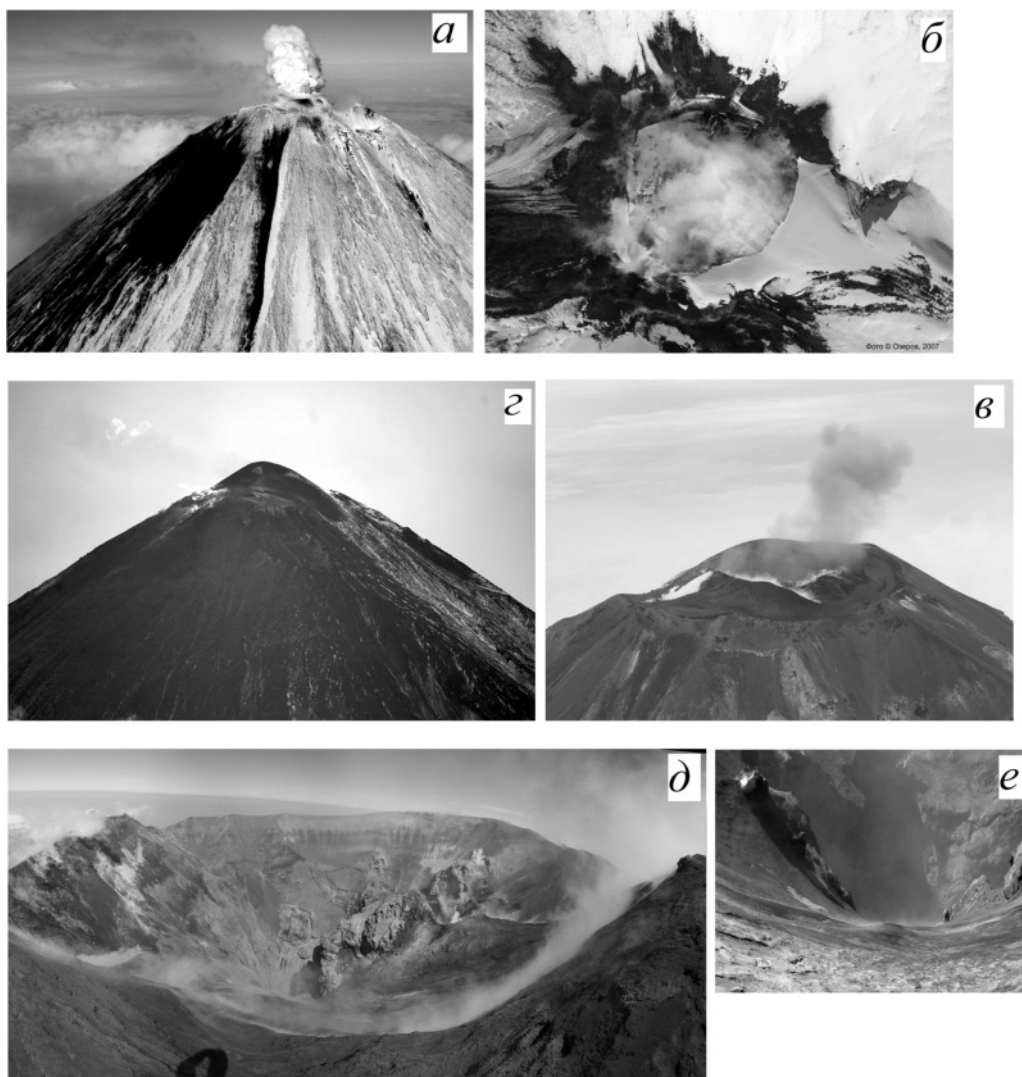


Рис. 2. Изменение морфологии вершинного кратера с 21 марта 2005 г. по 22 июля 2012 г. г.: а — новый шлаковый конус в кратере за две недели до окончания извержения, 21 марта 2005 г.; б — провал в кратере после окончания извержения, 20 августа 2007 г.; в — вершинный кратер частично заполнен шлаковыми конусами, 4 августа 2009 г.; г — новый шлаковый конус в центральном кратере за 3 месяца до окончания извержения, 5 августа 2010 г.; д — новый провал в центральном кратере в период между двумя извержениями, съёмка с восточной кромки кратера 6 августа 2011 г.; е — провал в центральном кратере сохранился за год до начала следующего извержения, 22 июля 2012 г.

Следующее извержение 10 февраля 2007 г. — 9 июля 2007 г. (144 дня) также начиналось с эксплозивных выбросов. Затем наступил эксплозивно-эффузивный этап. Излияние лавы происходило попеременно по трем основным желобам (западному, северо-западному и юго-восточному). Эффузивный этап продолжался 1,2 месяца. В ходе извержения в кратере вырос шлаковый конус высотой 70 м.

Извержение 8 октября 2008 г. — 9 января 2009 г. (93 дня) начиналось как эксплозивное, затем в течение 24 дней (с 02,12 по 26 декабря 2008 г.) было чисто эффузивным (рис. 1а).

Самым продолжительным было извержение 7 сентября 2009 г. — 5 ноября 2010 г. г. (424 дня). Извержение имело пульсирующий характер. С начала активизации вулкана в течение 3 месяцев извержение

было эксплозивным. Затем с января до 25 марта 2010 г. лавовые потоки распространялись на СЗ склоне. 7 марта лавовый поток был отмечен также на ЮВ склоне вулкана (рис. 3). С 25 марта до середины июля извержение было эксплозивным, а с 16.07 по 31.07. вновь приняло эффузивный характер, лавовые потоки сходили по СЗ склону. Перед окончанием извержения 21 октября произошла интенсивная эксплозивная деятельность, сопровождаемая выпадением пепла.

Последнее извержение, 15 августа 2013 г. — 20 ноября 2013 г. (97 дней), отличалось от всех предыдущих тем, что вершинный кратер был заполнен лавой. Начало извержения вновь было эксплозивным, но через 10 дней — 27 августа появился первый лавовый поток на ЮЗ склоне вулкана [10].

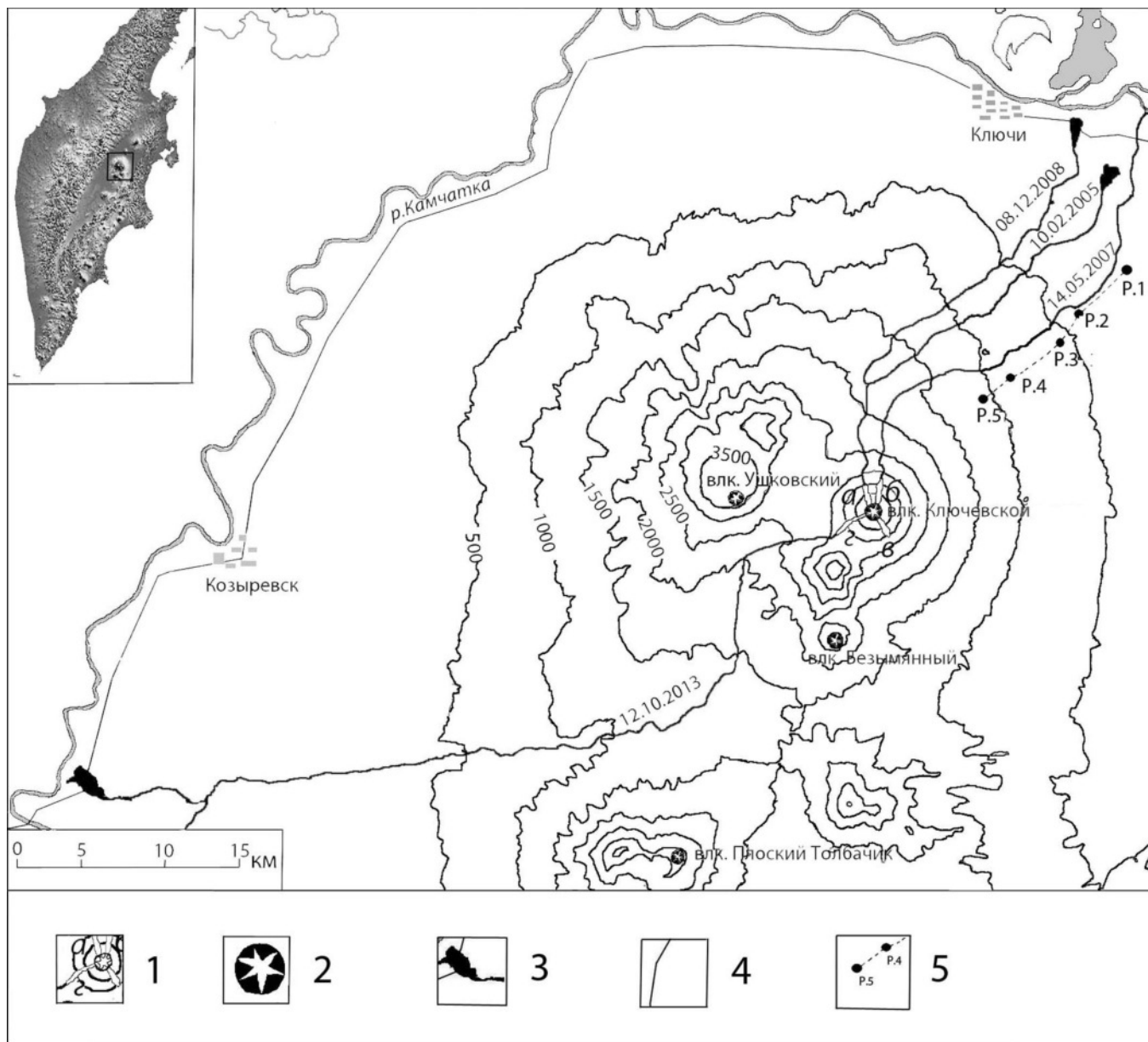


Рис. 3. Схема распространения лавовых и грязевых потоков во время вершинных извержений вулкана Ключевской 2003–2013 гг.: 1 – лавовые потоки из вершинного кратера; 2 – действующий вулкан; 3 – отложения лахар в конце потоков; 4 – автогасса Петропавловск–Камчатский – Усть–Камчатск; 5 – нивелирный профиль «Киргурич». P1...P5 – центральные репера нивелирных площадок.

С 13 сентября небольшой лавовый поток был отмечен также в СЗ (Крестовском) желобе (рис. 3). Далее основные события происходили на ЮЗ склоне вулкана, где к 12 октября лавовый поток тремя рукавами спустился до отметки 3000 м и внедрился в ледник Богдановича. За этим последовали фреатические взрывы, резкое таяние ледника, образование лахара и поступление большого количества воды в р. Студеную. Река размывла защитную дамбу и подтопила участок дороги, нарушив сообщение на трассе Петропавловск–Камчатский – пос. Ключи. К этому времени протяжённость лавового потока составила 5,5 км. Завершение извержения сопровождалось мощной эксплозивной деятельностью вулкана.

С 14 по 19 октября в кратере вулкана непрерывно происходили взрывы и выбросы раскалённых бомб. Над вулканом возвышалась эруптивная колонна до 8 км н. у. м. 18 октября отмечена наибольшая амплитуда ВД – 312 мкм/с.

Результаты наблюдений и их обсуждение

Состояние вершинного кратера во время вершинных извержений 2003–2013 гг. Вершинные извержения, как правило, сопровождаются изменениями морфологии вершинного кратера. В ходе извержений в кратере вырастают от одного до 2–3 шлако-лавовых конусов. Пароксизмальные извержения заканчиваются мощной эксплозивной фазой,

Таблица 1. Некоторые характеристики грязевых потоков вершинных извержений вулкана Ключевской в 1985–2013 гг.

| Извержение | Дата образования потока | Направление движения потока | Длина потока, км. | Площадь отложений км ² в конце потока | Средняя мощность отложений, м. | Объём отложений, км ³ ·10 ⁻³ |
|------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------|--|--------------------------------|--|
| 1985 | 02.12.1985 | р. Сухая, р. Крутенькая | 30 | 1,2 | 0,6 | 0,7 |
| 1993 | 19.07.1993 | р. Киргурич, р. Крутенькая | 33 | 2,5 | 1,0–1,5 | 2,5 |
| 1994 | 1.10.1994 | р. Киргурич, р. Крутенькая | 29 | 6,5 | 1,5 | 9,8 |
| 2005 | 01.02.2005 | р. Крутенькая | 25 | 1,8 | 0,5 | 1,4 |
| 2007 | 14.05.2007 | р. Киргурич | 35 | 1,2 | 0,5 | 0,6 |
| 2008 | 09.12. 2008 | р. Сухая | 25 | 1,1 | 1,0 | 1,1 |
| 2013 | 12.10. 2013 | р. Студеная | 70 | 1,3 | 0,5 | 1,1 |

в ходе которой дно кратера достигает глубины 500 м и более. Это один из вариантов, когда кратер приобретает значительную глубину. Кроме этого, после окончания извержений в кратере происходят серии проседаний, после которых образуются колодеобразные провалы. Причинами происхождения таких провалов может быть падение давления в подводящем канале и отток магмы.

Процессы проседаний дна кратера и последующий рост шлаковых конусов в ходе вершинных извержений происходили на современном этапе активности вулкана неоднократно [8, 9]. До начала извержения 16 января 2005 г. шлаковый конус в кратере отсутствовал. К концу извержения за 70 дней в кратере образовался шлаковый конус высотой 70 м (рис. 2а).

Начальный период извержения 2007 г. был повторением событий предыдущего извержения: отсутствие конуса в начале извержения и образование последнего через 5 недель эксплозивной деятельности. Через 40 дней после окончания извержения во время аэровизуального облета 20 августа 2007 г. был обнаружен провал в кратере вулкана глубиной более 300 м (рис. 2б).

За месяц до начала извержения 7 сентября 2009 г. — 5 ноября 2010 г. кратер был частично заполнен шлаково-лавовым конусом от предыдущего извержения (рис. 2в). Пятого августа 2010 г. вершина вулкана стала остроконечной (рис. 2г), но к концу извержения 5 ноября 2010 г. уже наметилось проседание до 20 м. Во время восхождения 6 августа 2011 г. провал в кратере был глубиной более 300 м (рис. 2д).

Перепад высот магматической колонны в зависимости от глубины кратера при образовании больших провалов и после заполнения кратера лавой и росте шлаково-лавовых куполов может составлять на Ключевском вулкане 700–800 м. Дополнительное избыточное давление при наличии такой магматической колонны может достигать 150–200 бар [18].

Грязевые потоки во время вершинных извержений. Основная опасность для населения во время вершинных извержений вулкана Ключевской происходит от грязевых потоков — лахар. Во время наших наблюдений впервые грязевый поток вблизи пос. Ключи был отмечен во время вершинного извержения 2 декабря 1985 г. [14]. Самый мощный лахар прошёл во время пароксизмального извержения 1 октября 1994 г. Объём отложений в устье лахара превышал 0,01 км³ (табл. 1). Маршруты распространения лахара были приурочены к руслам сухих рек: Киргурич, Крутенькая и Сухая. Из-за рельефа местности грязевые потоки на ССВ склоне вулкана не опасны пос. Ключи (рис. 3).

Во время вершинного извержения 12 октября 2013 г. распространение лахара шло по руслу р. Студеной. Река размывла защитную дамбу дорожного полотна, в течение нескольких дней отсутствовало дорожное сообщение на трассе Петропавловск-Камчатский — Ключи. Протяжённость грязевого потока от места образования до его конца была более 70 км (табл. 1, рис. 3)[11].

Химический состав пеплов вулкана Ключевской. На Ключевском вулкане преобладают два типа базальтов: во время побочных извержений поступают магнезиальные базальты, а во время вершинных извержений — глинозёмистые базальты. В табл. 2 приведены химические составы пеплов некоторых вершинных извержений 2005–2013 гг., а также составы двух образцов, отобранных Б. И. Пийпом во время вершинного извержения 1944–1945 гг. [15]. В целом, со времени пароксизмального извержения 1945 г. по настоящее время состав пеплов вершинных извержений сохраняется и близок к типичным для Ключевского вулкана известково-щелочным высокоглинозёмистым базальтам.

О периодичности вулканических извержений. В работах [23, 25, 26 и др.] рассматривается зависимость сейсмической и вулканической активности от взаимного расположения Земли, Луны и Солнца и от ши-

Таблица 2. Химический состав пеплов вершинных извержений вулкана Ключевской (1944–1945, 2005, 2010, 2011, 2013 гг.)

| Дата извержения | 29.12.1944 | 2.01.1945 | 10.02.2005 | 7.09.2010 | 20.06.2011 | 23.10.2013 | | |
|--------------------------------|--------------|-----------|--------------------------|-----------|------------|------------------------|--------|---------|
| № пробы/окислы | 994–1 | 994–4 | 4624 | 7077 | 7085 | 7570* | 7571** | 7572*** |
| SiO ₂ | 54,09 | 53,62 | 54,80 | 52,70 | 54,60 | 52,30 | 53,10 | 53,10 |
| TiO ₂ | 1,18 | 0,95 | 1,13 | 1,25 | 1,08 | 1,34 | 1,43 | 1,31 |
| Al ₂ O ₃ | 17,40 | 17,13 | 17,16 | 17,60 | 15,50 | 16,60 | 15,60 | 16,20 |
| Fe ₂ O ₃ | 3,03 | 3,90 | 3,08 | 4,75 | 4,87 | 6,18 | 7,22 | 6,64 |
| FeO | 5,95 | 4,68 | 5,38 | 5,36 | 5,79 | 5,42 | 4,81 | 4,90 |
| MnO | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,19 | 0,17 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| CaO | 8,03 | 9,16 | 8,18 | 9,68 | 8,45 | 8,93 | 8,27 | 8,26 |
| MgO | 4,09 | 4,83 | 6,00 | 4,32 | 4,20 | 3,70 | 3,87 | 3,37 |
| Na ₂ O | 3,50 | 3,25 | 3,30 | 3,04 | 3,24 | 3,21 | 3,38 | 2,96 |
| K ₂ O | 2,20 | 2,03 | 1,04 | 1,00 | 0,94 | 1,12 | 1,20 | 1,32 |
| P ₂ O ₅ | 0,21 | 0,22 | 0,18 | 0,14 | 0,15 | 0,16 | 0,17 | 0,19 |
| H ₂ O | 0,05 | 0,00 | 0,00 | | | | | |
| H ₂ O ⁺ | 0,12 | 0,00 | 0,00 | | | | | |
| ппп | | | 0,00 | 0,33 | 0,89 | 0,78 | 0,63 | 1,36 |
| ∑ | 100,54 | 100,40 | 100,40 | 100,36 | 99,88 | 99,93 | 99,88 | 99,81 |
| S ^o | | | | 0,02 | 0,16 | 0,01 | 0,01 | 0,04 |
| F | | | | 0,055 | 0,054 | | | |
| Источник | [Пийп, 1956] | | [Данные Ю. В. Демянчука] | | | [Данные Г. А. Карпова] | | |

* 30 км от сейсмостанции Апахончич, ** Сейсмостанция Апахончич, *** 173 км трассы г. Петропавловск-п. Козыревск

роты расположения вулканов или расположения изучаемых сейсмических областей.

В [24] предложена методика прогноза сильных побочных извержений вулкана Ключевской на основе анализа влияния 18,6-летнего лунного прилива на изменение упругих напряжений в Земле. Выделены 4 активные фазы продолжительностью 1,3, 2,1, 3,0 и 4,3 года в 18,6-летнем цикле, благоприятные для крупных побочных извержений. По этой методике выполнена оценка всех извержений вулкана Ключевской с 1932 по 1998 гг. [13]. Все извержения (побочные и вершинные), произошедшие за этот период, попали в выделенные активные фазы.

Наиболее показательно влияние приливообразующих сил Луны на примере всех трёх активных вулканов Ключевской группы (КГВ) и вулкане Шивелуч. В табл. 3 представлены временные интервалы активных фаз и все извержения действующих в настоящее время вулканов КГВ (Плоский Толбачик, Ключевской, Безымянный) и вулкана Шивелуч, начиная с 1852 по 2013 гг. Извержения всех вулканов также попадают в выделенные активные фазы. Следует отметить, что вулкан Безымянный, находившийся в состоянии покоя более тысячи лет, вновь активизировался во время одной из выделенных фаз, благоприятных для извержений. Данные об извержениях вулканов с 1852 по 1978 гг.

взяты из [6]. с 1978 по 2013 гг. — наблюдения Н. А. Жаринова.

Из длиннопериодных циклов активности вулканов следует отметить также одиннадцатилетний цикл [1]. Для вулкана Ключевской было показано, что наиболее благоприятные для извержений годы приходятся на минимумы солнечной активности. В то же время годы, неблагоприятные для извержений, совпадают с годами максимума солнечной активности. Циклы солнечной активности последних двух столетий меняются от 9 до 14 лет. Крупные извержения Северной группы вулканов Камчатки (СГВ) представлены в табл. 8. В таблицу включены извержения с объёмом от 0,1 до 2,2 км³. Серия вершинных и побочных извержений вулкана Ключевской 1983–1990 гг. объединена в один цикл. Для расчёта интервала ΔT взята середина этого цикла. Интервалы между большими извержениями СГВ лежат в пределах 9–12 лет, что подтверждает связь между одиннадцатилетней солнечной активностью и извержениями вулканов СГВ. Выявленные связь извержений СГВ с активными фазами 18,6-летнего лунного цикла и связь с одиннадцатилетней солнечной активностью показывают предопределённость извержений и могут быть использованы при долгосрочном прогнозе активности СГВ.

Таблица 3. Связь периодов извержений вулканов Ключевской группы и вулкана Шивелуч с активными фазами 18.6 летнего лунного цикла.

| Название вулкана, период его активности | | | | |
|---|---|-------------------|--|-----------------------------------|
| Плоский Толбачик | Ключевской | Шивелуч | Безымянный | Прогнозируемые периоды извержений |
| | 1852–1854 (в) | 1854 | | 1851.5–1855.8 (г) |
| | 1865 (в) | | | 1862.7–1864.7 (б) |
| | 1877–1879 (в) | 1879 | | 1876.3–1879.3 (а) |
| | 1882–1883 (в) | 1883 | | 1881.3–1883.3 (б) |
| | 1890 (в) | | | 1888.7–1893.0 (г) |
| | 1896–1898 (в) | 1896–1897 | | 1894.9–1897.9 (а) |
| 1904 | 1904 (в) | | | 1904.1–1905.4 (в) |
| | 1907 (в), 1909–1911 (в) | | | 1907.3–1911.6 (г) |
| | 1913 (в), 1915 (п) | | | 1913.5–1916.5 (а) |
| | 1922–1923 (в) | | | 1922.7–1924.0 (в) |
| | 1925–1926 (в), 1929 (в) | 1925–1930 | | 1925.9–1930.2 (г) |
| 1931 (в) | 1931–1932 (п), 1931 (в) | | | 1932.1–1935.1 (а) |
| 1937 (в), 1939 (в) | 1938 (п) | | | 1937.1–1939.1 (б) |
| 1941 (п) | | | | 1941.3–1942.6 (в) |
| | 1944–1945 (в), 1946 (п) | 1944–1945 | | 1944.5–1948.8 (г) |
| 1954 (в) | 1950 (в), 1951 (п), 1953 (п) | | | 1950.7–1953.7 (а) |
| | 1956 (п) | | 1955–1956, 1958 | 1955.7–1957.7 (б) |
| 1961–1962(в) | 1961–1962 (в) | | 1959(2), 1960(2), 1961 | 1959.9–1961.2 (в) |
| 1964–1966 (в) | 1966 (п), 1966 (в) | 1964 | 1965 ,1966–1968 | 1963.1–1967.4 (г) |
| | 1968–1969 (в) | | 1969–1973 | 1969.3–1972.3 (а) |
| 1975–1976(п) БТТИ | 1974 (п) | | 1974–1976 | 1974.4–1976.3 (б) |
| | 1978–1980 (в), [1980 (п)] | [1980] | 1979 (2), [1980 (2)] | 1978.5–1979.8 (в) |
| | 1983 (п), 1984 (в), 1985–1986 (в) | 1981–1982 | 1981, 1983, 1984 (2), 1985, 1986 (2) | 1981.7–1986.0 (а) |
| | 1987 (п), 1988 (п), 1988 (в) ,1989 (п), 1989–1990 (в) | | 1987 (2) | 1987.9–1990.9 (а) |
| | 1993(в), 1994 (в) | 1993–1995 | 1993 | 1992.9–1994.9 (б) |
| | 2003–2004 (в), [2005 (в)] | 2001–2004, [2005] | 2003, 2004 (2), [2005 (2)] | 2000.3–2004.6 (г) |
| | 2007 (в), 2008–2009 (в), 2009–2010 (в) | [2010] | 2006 (2), 2007 (2), 2008 (2), 2009, [2010] | 2006.5–2009.5 (а) |
| 2012–2013 ТТИ | 2013 (в) | 2011 | 2011, 2012 (2) | 2011.5–2013.5 (б) |
| Следующая активная фаза | | | | 2015,7–2017,9 (в) |

В столбцах 1–4 после даты извержения обозначения: (п)-побочное, (в)-вершинное;
в 5 столбце (а), (б), (в), (г)- активные фазы, благоприятные для извержений;
в квадратных скобках [1980], [2005], [2010] – годы, не попадающие в активные фазы.

Таблица 4. Периодичность крупных извержений северной группы вулканов Камчатки с объемом изверженных продуктов 0.15–2.20 км³.

| Годы извержений | Действующий вулкан | ΔT , годы | Объемы изверженных продуктов, км ³ | Источник |
|-----------------|-----------------------|-------------------|---|---------------------------------|
| 1944–1945 | Ключевской | 11 | 0,6 | [Пийп, 1956 г.] |
| 1955–1956 | Безымянный | 9 | 1,8 | [Богоявленская, 1985 г.] |
| 1964 | Шивелуч | 11 | 1,5 | [Богоявленская, 1985 г.] |
| 1975–1976 | Толбачик, БТТИ | 12 | 2,2 | [Большое трещинное..., 1984 г.] |
| 1983–1990 | Ключевской | 11 | 0,5* | [Федотов, Жаринов, 2007 г.] |
| 1993–1994 | Ключевской | 11 | 0,15** | [Федотов, Жаринов, 2007 г.] |
| 2004–2005 | Шивелуч | 9 | 0,2 | [Гирина и др., 2006 г.] |
| 2012–2013 | Плоский Толбачик, ТТИ | | 0,5–0,6 | [Двигало и др., 2014 г.] |

* Суммарный объём побочных и вершинных извержений 1983–1990 гг.

**Суммарный объём вершинных извержений 1993–1994 гг.

Сейсмичность и деформации на Ключевском вулкане в связи с вершинными извержениями. В настоящее время по результатам многолетних сейсмологических исследований получены общие закономерности изменения сейсмичности, как для побочных, так и для вершинных извержений [4, 5, 16, 17, 18, 20].

Подготовка вершинных извержений содержит следующие этапы:

1. Перед вершинными извержениями наблюдается усиление сейсмической активности на глубинах $20 < h < 35$ км и классом $K_S \leq 6,5$.

2. Перед всеми вершинными извержениями начинается миграция очагов землетрясений к земной поверхности.

3. Появление землетрясений 4-го типа и ВД свидетельствует о начале нового извержения.

4. С появлением магмы в кратере регистрируются термальные аномалии, свечение и выбросы раскалённых бомб.

В период 2000–2013 гг. произошло шесть вершинных извержений. Сейсмическая активность в это время происходила в интервале глубин 20–35 км в периоды спокойного состояния вулкана и на глубинах 0–5 км и в постройке вулкана во время вершинных извержений (рис. 1).

Для построения графиков на рис. 2 использованы данные местного каталога вулканических землетрясений района СГВ Камчатки. Каталог размещен на сайте КФ ГС РАН¹. Выборка землетрясений выполнялась для района размером 25×25 км, в центре которого расположен вулкан Ключевской. Выбирались вулканические землетрясения с энергетическим классом $K \geq 5,5$.

Характерно почти полное отсутствие землетрясений на больших глубинах во время вершинных извержений. В то же время с началом всех вер-

шинных извержений и до их завершения регистрируется ВД. Во время серии вершинных извержений 2003–2013 гг. отмечено увеличение максимальной амплитуды ВД. Амплитуда ВД увеличивалась с 20 мкм/с в 2003–2004 гг. до 40–60 мкм/с во время извержений в 2005, 2007 гг., 2008–2009 гг., 2009–2010 гг. Максимальное значение амплитуда ВД достигла во время вершинного извержения 2013 г. в среднем до 120 мкм/с, а в отдельные дни амплитуда ВД доходила до 312 мкм/с (рис. 16). Подобное явление можно объяснить заполнением вершинного кратера лавой и шлаково-лавовыми куполами в ходе извержений этого цикла. После завершения извержений сразу же возобновлялась сейсмичность в нижних горизонтах коры на глубинах 20–35 км (рис. 1г).

Геодезические измерения на СВ склоне вулкана выполняются с 1979 г. Наиболее продолжительные и представительные результаты получены по повторным нивелировкам. Расположение нивелирного профиля показано на рис. 2. При интерпретации деформаций поверхности вулкана предполагается, что эти деформации произошли в результате изменения давления в питающей магматической системе вулкана. В период 1979–1990 гг., когда происходили вершинные и побочные извержения, центр эффективного источника давления перемещался в интервале глубин 4–17 км. Во время вершинных извержений 2003–2013 гг. эффективный центр давления переместился на глубины 15–20 км. Перемещение центра давления на большие глубины после окончания побочных и вершинных извержений 1979–1990 гг. может быть связано с опустошением поверхностных магматических каналов. Определение глубины эффективного центра давления по геодезическим данным показано в работе [21].

¹<http://www/emsd/iks/ru>

Заключение

На основе представленных данных можно выделить некоторые основные выводы.

1. Изучение повторяемости извержений Северной группы вулканов Камчатки (СГВ) показало, что все четыре вулкана этой группы (Ключевской, Толбачик, Шивелуч, Безымянный) активизируются в определённые фазы, выделенные в 18,6-летнем лунном цикле. Имеется также связь крупных извержений СГВ с одиннадцатилетней солнечной активностью. Выявленные связь извержений вулканов СГВ с активными фазами 18,6-летнего лунного цикла и связь с одиннадцатилетней солнечной активностью показывают предопределённость извержений и могут быть использованы при долгосрочной оценке активности вулканов СГВ. Для прогноза извержений вулканов необходимы данные о сейсмичности и деформациях в период подготовки и в ходе извержений.

2. В период 2000–2013 гг. произошло шесть вершинных извержений. Сейсмическая активность в это время происходила в интервале глубин 20–25 км в периоды спокойного состояния вулкана и на глубинах 0–5 км и в постройке вулкана во время вершинных извержений. Во время вершинных извержений характерно почти полное отсутствие землетрясений на больших глубинах. С началом извержений и до их окончания регистрировалось ВД. Во время серии вершинных извержений 2003–2013 гг. отмечено увеличение максимальной амплитуды ВД с 20 мкм/с в начале цикла в 2003 г. до 120 мкм/с в 2013 г. в конце цикла. Возможной причиной этого явления может быть заполнение вершинного кратера лавой и пирокластическими отложениями.

3. Наибольшая опасность для населения во время вершинных извержений вулкана Ключевской может происходить от грязевых потоков. В основном грязевые потоки, начиная с извержения 1944–1945 гг. и во время извержений 2003–2013 гг., распространялись по СВ склону вулкана. Из-за рельефа местности опасности для пос. Ключи грязевые потоки не представляют.

4. Со времени пароксизмального извержения 1944–1945 гг. по настоящее время состав пеплов вершинных извержений сохраняется и близок к типичным для вулкана Ключевской известково-щелочным высокоглинозёмистым базальтам.

Список литературы

1. Абдурахманов А. И., Фирстов П. П., Широков В. А. Возможная связь вулканических извержений с одиннадцатилетней циклическостью солнечной активности // Бюлл. вулканол. станций. 1976. № 52. С. 3–10.
2. Богдавленская Г. Е., Брайцева О. А., Мелекесцев И. В. и др. Катастрофические извержения типа направленных взрывов // Вулканология и сейсмология. 1985. № 2. С. 3–26.
3. Большое трещинное Толбачинское извержение (1975–1976 гг., Камчатка) / Под ред. Федотова С. А. М.: Наука, 1984. 638 с.
4. Горельчик В. И., Гарбузова В. Т., Сторчеус А. В. Глубокие вулканические процессы под Ключевским вулканом по сейсмологическим данным // Вулканология и сейсмология. 2004. № 6. С. 21–34.
5. Горельчик В. И., Степанов В. В. Сейсмичность района Северной группы вулканов Камчатки в 1971–1972 гг. // Глубинное строение, сейсмичность и современная деятельность Ключевской группы вулканов. Владивосток: Наука, 1976. С. 198–218.
6. Гуценко И. И. Извержения вулканов мира (Каталог). М.: Наука, 1979. 474 с.
7. Гирина О. А., Демянчук Ю. В., Мельников Д. В. и др. Пароксизмальная фаза извержения вулкана Молодой Шивелуч, Камчатка, 27 февраля 2005 г. (Предварительное сообщение) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 112–119.
8. Двигало В. Н. Кратер и вершинные извержения Ключевского вулкана в 1968–1988 гг. по аэрофотограмметрическим наблюдениям // Вулканология и сейсмология. 1991. № 5. С. 3–18.
9. Двигало В. Н., Свирид И. Ю., Шевченко А. В. Первые количественные оценки параметров Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. по данным
10. Действующие вулканы Камчатки. Т. 1 / Отв. ред. Федотов С. А. и Масуренков Ю. П. М.: Наука, 1991. 309 с.
11. Демянчук Ю. В., Селивёрстов Н. И. О продолжении эруптивного цикла вулкана Ключевской в 2013 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 2. Вып. 22. С. 7–14.
12. Жаринов Н. А., Демянчук Ю. В. Извержение вершинного кратера вулкана Ключевской (Камчатка) в феврале-июле 2007 г. // Вулканология и сейсмология. 2009. № 3. С. 38–49.
13. Жаринов Н. А., Демянчук Ю. В. Состояние вулканов Шивелуч и Ключевской в 1999 г., долгосрочный прогноз их деятельности // Вулканология и сейсмология. 2001. № 2. С. 30–38.
14. Жаринов Н. А., Жданова Е. Ю., Белоусов А. Б. и др. Активность Северной группы вулканов Камчатки в 1985 г. // Вулканология и сейсмология. 1988. № 3. С. 3–12.
15. Пийп Б. И. Ключевская сопка и её извержения в 1944–1945 гг. и в прошлом // Труды Лаб. Вулканологии. 1956. Вып. 11. 311 с.
16. Сенюков С. Л. Оценка состояния и прогноз активности вулканов Безымянный и Ключевской на Камчатке по сейсмологическим и спутниковым данным / Автореф. диссертации на соискание учёной степени канд. геолого-минералогических наук. Петропавловск-Камчатский, 2013. 24 с.
17. Токарев П. И. Прогноз побочных извержений вулкана Ключевской // Вулканология и сейсмология. 1988. № 6. С. 47–61.
18. Федотов С. А. Магматические питающие системы и механизм извержений вулканов. М.: Наука, 2006. 456 с.
19. Федотов С. А., Хренов А. П., Жаринов Н. А. Ключевской вулкан, его деятельность в 1932–1986 гг. и возможное развитие // Вулканология и сейсмология. 1987. № 4. С. 3–16.

20. Федотов С. А., Жаринов Н. А., Горельчик В. И. Деформации и землетрясения Ключевского вулкана, модель его деятельности // Вулканология и сейсмология. 1988. № 2. С. 3–42.
21. Федотов С. А., Жаринов Н. А. Об извержениях, деформациях, сейсмичности Ключевского вулкана (Камчатка) в 1986–2005 гг. и механизме его деятельности // Вулканология и сейсмология. 2007. № 2. С. 3–31
22. Федотов С. А., Жаринов Н. А., Гонтовая Л. И. и др. Вулкан Ключевской (Камчатка): деятельность, магматическая питающая система, сейсмогеография // Изменение окружающей среды и климата, природные и связанные с ним техногенные катастрофы. Т. 2. Новейший вулканизм Северной Евразии: закономерности развития, вулканическая опасность, связь с глубинными процессами и изменениями природной среды и климата. М.: ИГЕМ РАН, 2008. С. 273–294.
23. Широков В. А. Влияние космических факторов на геодинамическую обстановку и её долгосрочный прогноз для северо-западной части Тихоокеанской тектонической зоны // Вулканизм и геодинамика. М.: Наука, 1977. С. 103–119.
24. Широков В. А. Некоторые вопросы методики комплексного прогноза побочных извержений вулкана Ключевской (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1985. № 6. С. 48–58.
25. Hamilton W. L. Tidal Cycles of Volcanic Eruptions: Fortnightly to 19 Yearly Periods // J. Geoph. Res. 1978. V.78. № 17. P. 3363–3371.
26. Mauk F. J., Johnston V. J.S. On the triggering of volcanic eruptions by Earth Tides // J. Geoph. Res. 1978. V.78. № 17. P. 3356–3362.