

## ВЕРШИННОЕ ИЗВЕРЖЕНИЕ ВУЛКАНА КЛЮЧЕВСКОЙ (КАМЧАТКА) В 2007 г.

**Н.А. Жаринов, Ю.В. Демянчук**

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006;  
e-mail: zhar@emsd.ruT*

Активность Ключевского вулкана проявляется в периодических извержениях вершинного кратера и побочных извержениях на его склонах. Ключевской вулкан, со средним расходом 60 млн. т. в год и высотой 4750 м, по частоте извержений занимает центральное место среди вулканов Камчатки. Попытки установить статистические закономерности в частоте извержений вулкана не дали однозначного ответа о таких закономерностях [4, 5, 8]. Наиболее достоверной представляется связь извержений вулканов с изменениемклонения лунной орбиты во время обращения Луны вокруг Земли в 19 летнем цикле. Активные фазы, выделяемые по этой методике [8], хорошо согласуются с периодами извержений, происходящими на вулкане Ключевской. В работе [3] отмечалось, что очередная активная фаза Ключевского вулкана должна происходить в интервале 2003.3 – 2004.6 гг. В это время произошло два вершинных извержения (19.05.2003 – 27.01.2004 и 16.01.2005 – 06.04.2005 гг.). Следующая активная фаза должна была произойти в интервале 2006.5 – 2009.5 гг. Вершинное извержение 15.02.2007 – 09.07.2007 г. попадает в эту активную фазу (табл. 1).

**Таблица 1.** Данные о реализации долгосрочного прогноза извержений вулкана Ключевской (по методике В.А. Широкова) за 1932 - 2007 гг. и долгосрочный прогноз его активности.

Фаза	Прогнозируемый период, годы, мес.	Время извержений, годы; п-побочное извержение, в-вершинное извержение.
А	1932.1 – 1935.1	1932 – группа Туйлы (п)
В	1937.1 – 1939.1	1938 – Белокай (п)
В	1941.3 – 1942.6	Нет извержений
Г	1944.5 – 1948.8	1945 (в), 1945 – Юбилейный (п), 1946 – Апахончич(п).
А	1950.7 – 1953.7	1951 – Былинкиной (п), 1953 – Белянкина (п)
Б	1955.7 – 1957.7	1956 – Вернадского и Крыжановского
В	1959.9 – 1961.2	Нет извержений
Г	1963.1 – 1967.4	1966 – Пийпа (п)
А	1969.3 – 1972.3	1968 – 1969 (в)
Б	1974.3 – 1976.3	1974 – ВВС* (п)
В	1978.5 – 1979.8	1978-1980 (в), 1980 (п)
Г	1981.7 - 1986.0	1983 – Предсказанный (п)

А	1987.9 – 1990.9	1987 – Предвиденный (п), 1988 – 25 летия ИВ ДВО (п), 1989 – Скуридина (п)
Б	1992.9 – 1994.9	1993 (в), 1994 (в)
В	1997.1 – 1998.4	Нет извержений
Г	2000.3 – 2004.6	2003-2004 (в), 2005 (в)
А	2006.5 – 2009.5	2007 (в)
Б	2011.5 – 2013.5	Прогнозируемый период

Примечание:\* ВВС – Всесоюзное вулканологическое совещание

Периодичность извержений индивидуальна для каждого отдельного вулкана и находится в тесной связи с постоянным поступлением магмы в промежуточный очаг. Окончание извержений наступает после сброса избыточного давления и опустошения питающего канала (очага). В это время происходит закупорка канала, которая может сопровождаться обрушением шлаковых конусов и образованием провалов на дне вершинного кратера [1, 6]. После достижения в питающей магматической системе избыточного давления, превышающего определенную величину (100-200 бар), вновь возникают условия для начала нового извержения.

#### Активность вулкана Ключевской в 2007 г.

После периода покоя, продолжавшегося почти 2 года, 15 февраля 2007 г. в центральном кратере вулкана было отмечено свечение и выбросы раскаленных бомб. Эту дату можно считать началом нового вершинного извержения вулкана. С 16-17 февраля



**Рис. 1.** Излияние лавы на склоны вулкана сопровождается фреатическими взрывами и образованием грязевых потоков 25.04.2007 г.



**Рис. 2.** Кульминационный период эксплозивно-эффузивного этапа извержения, длина лавовых потоков к 27.05.07 превышала 4.5 км.

над кратером появились пепловые выбросы. Длительное время (с 18.02 до 21.03.2007) видимость на вулкан отсутствовала. По нарастанию сейсмической активности в постройке вулкана можно было предполагать о продолжении извержения все время отсутствия видимости. После появления видимости 21 марта в центральном кратере вулкана был обнаружен шлаковый конус, образовавшийся за время извержения. С 21 марта в ночное время в вершинном кратере наблюдали фонтанирование лавы. 28 марта в Крестовском (северо-западном) желобе появился лавовый поток. К 22 апреля длина лавового потока была более 1 км. В конце апреля излияние лавы на склоны вулкана усилилось, длина потока 28 апреля была близка 4.5 км, фронт лавового потока достиг от-

метки 2.2 т.м. Эксплозивная фаза извержения сменилась explosивно-эффузивной. По мере поступления лавы на склоны вулкана появились грязевые потоки (рис. 1, 2). Распространение грязевых потоков шло по долинам сухих рек.

Активность вулкана продолжала оставаться на высоком уровне практически до конца извержения: излияние лавы наблюдалось попеременно в Крестовском или в Ушковском, и одновременно в двух желобах сразу, продолжалась explosивная деятельность в виде выбросов раскаленной лавы и пепла на 500-600 м над шлаковым конусом. Изменение характера деятельности вулкана свидетельствовало о постепенной дегазации магмы. На начальных этапах извержений при поступлении обогащенной газами магмы наблюдались explosивные фазы извержения.

Интенсивная explosивная деятельность отмечалась в первой декаде мая. В пос. Ключи, расположенном в 32 км от вулкана, периодически были слышны взрывы, напоминающие раскаты грома. Подобные явления редко отмечались в пос. Ключи во время вершинных извержений. В результате эффузивной деятельности, заполнения вершинного кратера лавой, излияние лавовых потоков постоянно происходило по Крестовскому и Ушковскому желобам и в конце извержения (с 31.05.2007 по 03.06.2007) наблюдалось излияние лавы также по Апахончичскому желобу на юго-восточный склон вулкана (рис. 3). По масштабам деятельности извержение 2007 г. было близко к извержению вершинного кратера в 1987-1988 гг. К 12 июня в кратере вулкана образовался шлаковый конус, возвышающийся на 70 м над кромкой кратера.

Извержение завершилось мощной explosивной деятельностью (рис. 4). 29 июня над вершиной вулкана в течение 7-8 часов наблюдалась пепловая колонна высотой до 7-8 км. В последующие дни продолжалась explosивная деятельность с выпадением пепла на склоны вулкана (рис. 5). Последний пеплопад произошел 9 июля, после чего над вершинным кратером наблюдалась только парогазовая деятельность.

Можно отметить следующие характерные этапы вершинного извержения в 2007 г.:



**Рис. 3.** Излияние лавы на восточный склон вулкана 30 мая 2007 г. по Апахончичскому желобу сопровождалось интенсивными фреатическими взрывами. Фото Демянчука.



**Рис. 4.** Мощная explosивная деятельность в конце извержения 29 июня 2007 г. Высота эруптивной колонны достигала 7-8 км над кратером вулкана. Фото Ю.В. Демянчука.

1. Подготовка извержения началась с появления свечения и пепловых выбросов в центральном кратере (15.02.2007 г.).

2. На начальном этапе извержения наблюдалась усиленная explosивная деятельность с образованием шлакового конуса: 16 февраля - 27 марта.

3. Следующий этап извержения характеризуется заполнением вершинного кратера лавой с последующим излиянием ее на склоны вулкана, переходом эксплозивного извержения в эксплозивно-эффузивное извержение: 28 марта-3 июня (рис. 1, 2).

4. Образование грязевых потоков в результате поступления лавы на склоны вулкана, фреатические взрывы на фронте лавовых потоков: 22 апреля – 24 мая.

5. Завершение извержения, сопровождаемое мощной эксплозивной Деятельностью вершинного кратера: 29 июня–9 июля (рис. 4).

В ходе эксплозивной деятельности часто возникали провалы шлаковых конусов (или происходило их частичное разрушение) и образовывался кратер с объемом до  $0.5 \text{ км}^3$ . По сообщению А.Ю. Озерова во время облета вулкана в августе 2007 г. вновь был обнаружен провал вершинного кратера. Из-за плохой видимости глубина провала не была определена.

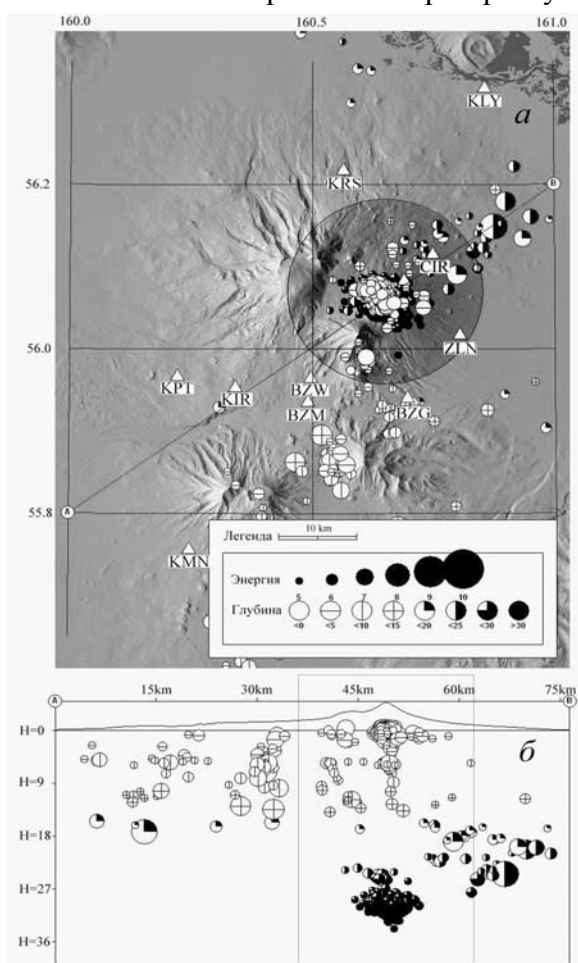
Основными предвестниками готовящегося извержения до настоящего времени остаются: изменение характеристик сейсмического режима, изменение деформаций земной поверхности склонов вулкана и изменение состава вулканических газов. Состав газов в вершинном кратере вулкана Ключевской вследствие трудоемкости и опасности отбора газов обычно определяется редко.

Изменение сейсмичности района вулкана Ключевской показано на рис. 6. Можно видеть, что сейсмичность сохранялась высокой на всех глубинах под вулканом и в его окрестностях в течение 2006-2007 гг. Продолжала оставаться активной эпицентральная зона. Для эпицентральной зоны на рис. 7 показаны: изменения класса землетрясений  $K_s \geq 5$  во времени (рис. 7а), накопление количества землетрясений (рис. 7б), распределение землетрясений по глубинам (рис. 7в), и накопление энергии землетрясений во время вершинного извержения (рис. 7г). Можно отметить



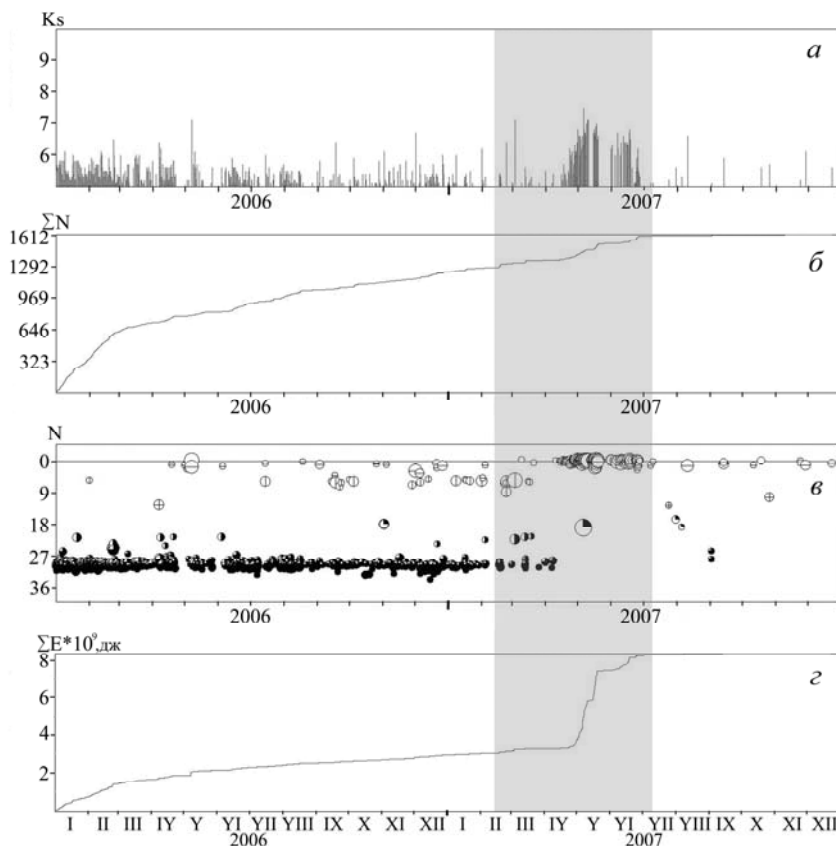
**Рис. 5.** Эксплозивная деятельность перед завершением извержения сопровождалась интенсивными пеплопадами. 2 июля пепловый шлейф распространялся в сторону пос. Ключи. Фото Ю.В. Демянчука.

остаются: изменение характеристик сейсмического режима, изменение деформаций земной поверхности склонов вулкана и изменение состава вулканических газов. Состав газов в вершинном кратере вулкана Ключевской вследствие трудоемкости и



**Рис. 6.** Сейсмичность в районе в. Ключевской в 2006 – 2007 гг.: на карте (а) показано расположение телеметрических сейсмических станций (треугольники), затемненным кругом обозначена центральная эпицентральная зона вокруг Ключевского вулкана (диаметр зоны 25 км); на разрезе (б) – проекция эпицентров землетрясений на вертикальную плоскость по линии А-В. На рис. 6 б вертикальным прямоугольником показан разрез центральной эпицентральной зоны.

следующие особенности сейсмических параметров. Перед вершинным извержением 2007 г. очаги землетрясений располагались преимущественно на глубинах близким 30-31 км. Миграция очагов в постройку вулкана произошла во время интенсивной эффузивной фазы извержения. В это же время произошло увеличение класса землетрясений до  $K_s \geq 7.0-7.5$  (рис. 7а), а также наблюдалось резкое увеличение выделившейся сейсмической энергии (рис. 7з). Более детальное распределение землетрясений по типам согласно классификации П.И.Токарева [5] приведено на рис. 8. На этом же рисунке приведены характеристики вулканической активности и дополнительные характеристики сейсмической активности – изменения амплитуды вулканического дрожания (ВД) во время извержения (рис. 8 д, е). Графики изменения сейсмической активности в районе Ключевского вулкана и в эпицентральной зоне в целом отражают процесс миграции очагов землетрясений с больших глубин к поверхности. Это было отмечено ранее [7]. Но в отличие от предыдущих вершинных извержений (2003-2004 и 2005 гг.), во время вершинного извержения, начавшегося в феврале 2007 г., поверхностные землетрясения IV типа происходили в большом количестве и до начала извержения. Этот факт может свидетельствовать о том, что извержение началось раньше, чем появилось свечение в кратере. Наблюдения за вертикальными смещениями вдоль радиального нивелирного профиля по долине ручья Киргурич выполняются с 1979 г. [7]. По повторным наблюдениям определены деформации склона вулкана, сопровождающие деятельность Ключевского вулкана (рис. 9). Подробные сведения о полученных результатах и их обсуждение дано в работе [7]. В настоящем сообщении полученные ранее данные дополняются данными геодезических измерений за 2006-2007 гг.

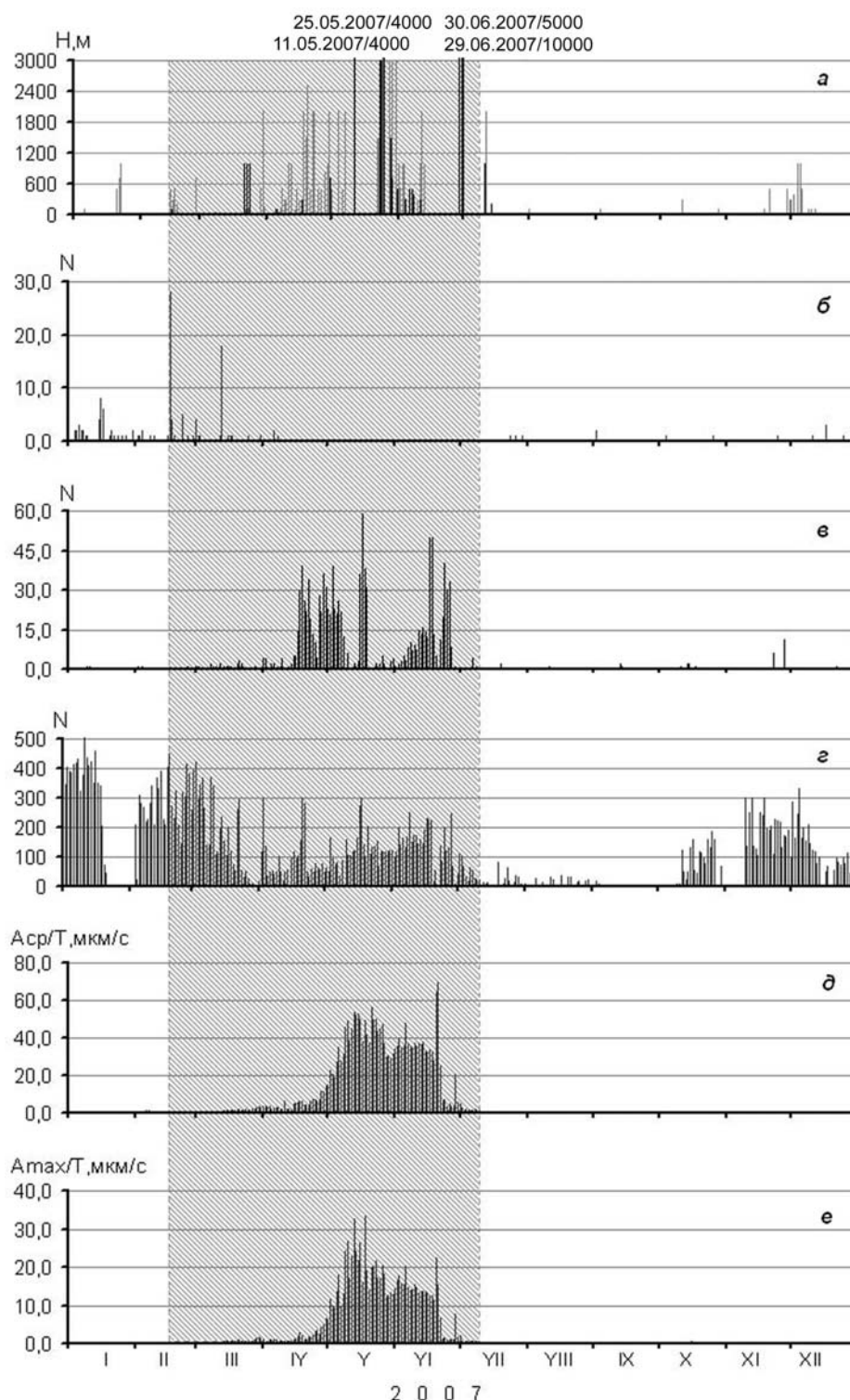


**Рис. 7.** Характеристики сейсмической активности в центральной эпицентральной зоне в 2006-2007 гг.: а - изменение энергетического класса  $K_s \geq 5.5$  во времени, б – кумулятивное количество землетрясений с  $K_s \geq 5.5$ , в – распределение землетрясений с  $K_s \geq 5.5$  по глубинам, з – график накопления энергии землетрясений, Дж. Штриховкой показан период вершинного извержения в 2007 г.

Наблюдения за вертикальными смещениями вдоль радиального нивелирного профиля по долине ручья Киргурич выполняются с 1979 г. [7]. По повторным наблюдениям определены деформации склона вулкана, сопровождающие деятельность Ключевского вулкана (рис. 9). Подробные сведения о полученных результатах и их обсуждение дается в работе [7]. В настоящем сообщении полученные ранее данные дополняются данными геодезических измерений за 2006-2007 гг.

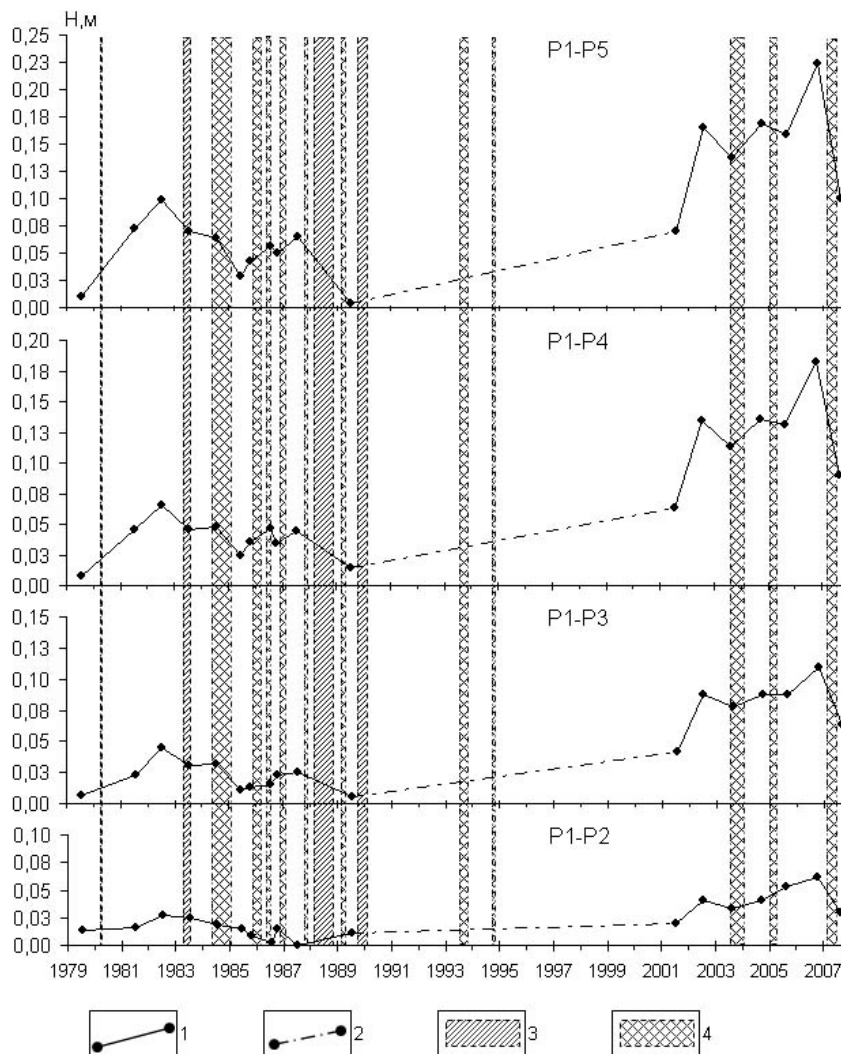
По результатам многолетних наблюдений сделаны следующие выводы. Относительные вертикальные смещения возрастают по мере приближения к вулкану. Отмечены периоды подъема склона вулкана перед побочным извержением «Предсказанный» в 1983 г., перед

вершинными и побочными извержениями 1985-1990 гг., а также перед вершинными



**Рис. 8.** Суточные характеристики вулканической и сейсмической активности вулкана Ключевской в 2007 г.: *а* – изменение высот парогазовых (светлые линии) и газопепловых выбросов (залитые линии), высоты более 3.0 тыс.м указаны; *б* – число вулканических землетрясений I типа; *в* – число вулканических землетрясений II-III типов; *г* – число вулканических землетрясений IV типа; *д* – вулканическое дрожание  $A_{max}/T$ , мкм/с; *е* – среднее значение вулканического дрожания  $A_{ср}/T$ , мкм/с. Штриховкой показан период вершинного извержения. Тип извержений дан по классификации П.И.Токарева [5], характеристики сейсмической активности приведены по результатам оперативной обработки сейсмических данных Ключевского отряда КФ ГС РАН на станции «Ключи».

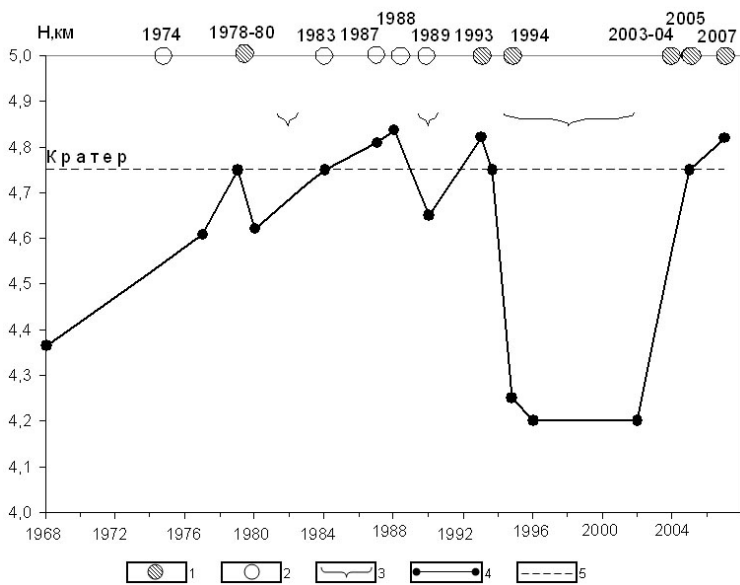
извержениями 2003-2004, 2005 и 2007 гг. После окончания извержений отмечалось опускание склона. Изменения направлений смещений (подъема перед извержением на опускание после извержения) хорошо коррелируются с характером деятельности вулкана. Максимальная величина смещений на ближайшей к кратеру площадке P5 достигла в 2007 г. 23 см. (за время от начала наблюдений в 1979 г.). За исходный репер принят центральный репер площадки P1. Реперы P1 и P5 расположены на расстоянии 26 и 11 км от кратера вулкана, соответственно (рис. 4, 5). Были выполнены расчеты глубины центра эффективного давления по методике, изложенной в [7]. За период с 1990 по 2003 гг., эффективный центр давления перемещался с 24 км до 16 км. В 2007 г. после окончания извержения источник давления был на глубине 20 км. Перемещение центра давления на большие глубины после окончания продолжительных побочных и вершинных может быть связано с опустошением поверхностных источников питания и



**Рис. 9.** Вертикальные смещения на профиле «Киргурич» за 1979-2007 гг. 1 - вертикальные перемещения между площадками; 2 - длительные перерывы в наблюдениях; 3 - интервалы побочных наблюдений; 4 - интервалы вершинных извержений

падением избыточного давления в этих источниках.

В ходе вершинных извержений или после их окончания периодически происходит образование провалов в центральном кратере вулкана. Объем провалов и их глубина зависит от процессов, сопровождающих образование таких провалов. Причины образования провалов-проседаний в кратере могут быть связаны с оттоком магмы и падением



**Рис. 10.** Изменение уровня дна кратера и высоты вершины вулкана относительно уровня моря. 1 – вершинное извержение, 2 – побочное извержение, 3 – проседание вершинного кратера, 4 – уровень дна кратера и отметка вершины, 5 – уровень лавы при заполненном кратере.

ние в основании столбов, магма должна подняться на 4,7 км над поверхностью, что мы имеем на Ключевском вулкане. Для расчетов средняя плотность горных пород взята  $3,0 \text{ г/см}^3$ , плотность магмы  $\rho_m = 2,78 \text{ г/см}^3$ .

Рассмотрим, как меняется избыточное давление в питающей магматической системе непосредственно в постройке вулкана. На рис. 11 приведены графики изменений избыточного давления в зависимости от высоты магматической колонны. Из рис. 11 следует, что большее избыточное давление соответствует высокому уровню стояния магмы, и наоборот при больших провалах дна кратера величина  $\Delta P$  минимальна. Величина  $\Delta P$  только за счет веса постройки вулкана может превышать 250 бар. Заметим, что минимальная величина избыточного давления  $\Delta P$  в начале трещинных извержений была близка 50-100 бар [8]. При расчетах избыточного давления в постройке вулкана взята средняя плотность верхних слоев  $2,0 \text{ г/см}^3$ , плотность магмы принята  $\rho_m = 2,5 \text{ г/см}^3$ .

### Заключение

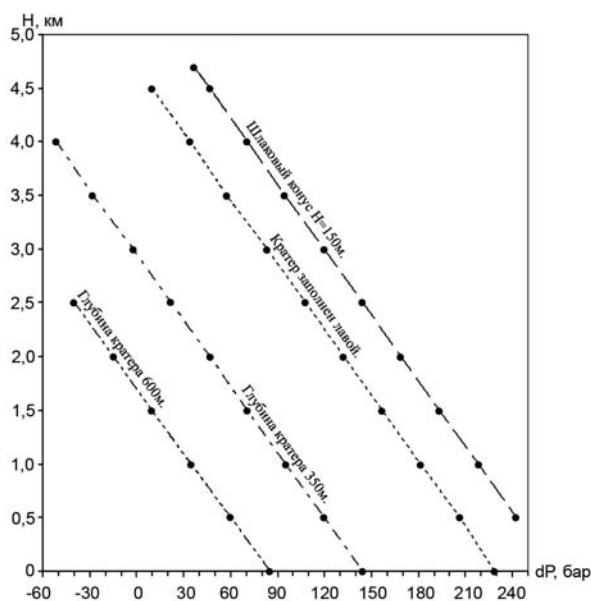
В феврале-июле 2007 г. на вулкане Ключевской произошло типичное эксплозивно-эффузивное извержение вершинного кратера с объемом извергнутых продуктов  $0,025 \text{ км}^3$  (без учета объема выброшенного пепла). Время извержения вулкана попадает в активную фазу, связанную с обращением Луны вокруг Земли в 18,6 летнем цикле. Активные фазы были определены по методике В.А.Широкова, разработанной для долгосрочного прогноза побочных извержений. Так как согласно долгосрочному прогнозу активная фаза продолжается с 2006,5 по 2009,5 гг., то до завершения этой фазы возможны следующие извержения вулкана.

Для среднесрочного прогноза извержений обычно применяют данные об изменении сейсмического режима вулкана во времени. В период подготовки и во время начала вершинного извержения в 2007 г. явных изменений сейсмических характеристик обнаружено не было. В тоже время характер изменений вертикальных смещений, определяемых на радиальном нивелирном профиле, показывал на подъем склона вулкана перед извержением, что подтверждало возможность извержения вулкана.

избыточного давления в подводящем канале. На рис. 10 представлен график изменения глубины дна кратера и высоты вершины во времени. Для построения графика использованы точные данные результатов аэросъемок [1] и результаты аэровизуальных наблюдений и видеосъемок авторов. Амплитуда смещений поверхности кратера за рассматриваемый период превышала 500 м.

Согласно исследованиям Г.С. Горшкова, магматический очаг вулкана Ключевской располагается на глубине 60 км [2]. На этой глубине в основании столба горных пород давление составит 18 кбар, а в основании столба магмы 16,7 кбар, соответственно. Чтобы уравновесить давле-





**Рис. 11.** Избыточное давление в постройке вулкана в зависимости от высот дна кратера и вершины вулкана.

Для оценок состояния вулкана и прогноза его возможных извержений необходимо использовать комплексные данные, в том числе учитывать положение дна кратера, учитывать высоту стояния лавы в питающем канале.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 08-05-00453).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Двигало В.Н. Кратер и вершинные извержения Ключевского вулкана в 1968-1988 гг. (по аэрофотограмметрическим наблюдениям) // Вулканология и сейсмология. 1991. №5. С. 3-18.
2. Горшков Г.С. О глубине магматического очага Ключевского вулкана // Доклады АН СССР. 1956. Т. 106. № 4. С. 703-705.
3. 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.
4. Иванов В.В. Новый эруптивный цикл Ключевского вулкана и прогноз его развития (за период 2003-2005 гг. и далее) // Материалы ежегодной конференции, посвященной дню вулканолога, 30 марта–1 апреля 2005 г. Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2005. С. 87-95.
5. Токарев П.И. Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164 с.
6. Токарев П.И. Прогноз побочных извержений вулкана Ключевской // Вулканология и сейсмология. 1988. № 6. С. 47-61.
7. 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.
8. Федотов С. А. Магматические питающие системы и механизм извержения вулканов. М.: Наука, 2006. 455 с.
9. Широков В.А. Некоторые вопросы методики комплексного прогноза побочных извержений вулкана Ключевской (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1985. № 6. С. 48-58.

## THE SUMMIT ERUPTION OF KLYUCHEVSKOY VOLCANO IN 2007 (КАМЧАТКА)

**N.A. Zharinov, Yu.V. Demyanchuk**

*Institute of Volcanology and Seismology, FEB RAS,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia, e-mail: zhar@emsd.ru*

This paper considers summit eruption of Klyuchevskoy volcano occurring in February-July 2007. The seismicity of Klyuchevskoy volcano in 2006 – 2007 and its relation to eruption are considered. Geodetic measurements show the center of magmatic pressure beneath the volcano moving in the range 16 – 23 km during period 2001-2007. The method of V.A. Shirokov was used to derive a long – term forecast, Klyuchevskoy volcano will be in an active phase from July 2011 to July 2013.