

УДК 551.21

КРУПНЫЕ ЭКСПЛОЗИВНЫЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА ШИВЕЛУЧ (КАМЧАТКА) С ЧАСТИЧНЫМ РАЗРУШЕНИЕМ ЭКСТРУЗИВНОГО КУПОЛА 28 ФЕВРАЛЯ 2005 г. и 27 ОКТЯБРЯ 2010 г.

© 2013 г. Н. А. Жаринов, Ю. В. Демянчук

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9,
e-mail: nzhar@kscnet.ru*

Поступила в редакцию 04.05.2012 г.

Рассматриваются извержения вулкана Шивелуч в 2005–2011 гг., сейсмичность и деформации лавового купола в ходе его формирования. Показано, что образование внутрикратерного экструзивного купола идет неравномерно. Максимальный расход изверженной лавы достигает 0.6 млн.³/сутки. Усиленная эксплозивная деятельность предшествует периодам интенсивного роста лавового купола. Определены объемы и глубина питающих магматических очагов крупных извержений вулкана 12.11.1964 г., 28.02.2005 г. и 27.10.2010 г. Выполнены расчеты эффективной вязкости лавовых потоков извержений 2007 и 2011 гг.

DOI: 10.7868/S0203030613020077

ВВЕДЕНИЕ

С августа 1980 г. на вулкане Шивелуч (56°6 с.ш., 161°4 в.д.) в центральной части кратера, образованного в ходе катастрофического извержения 12 ноября 1964 г., идет выжимание новых экструзивных куполов (рис. 1). С появления первой экструзии выполнялись наблюдения за ее ростом: проводилась аэросъемка, тригонометрическое нивелирование, наземная фототеодолитная съемка, а также видеосъемка вулкана [Двигало, 1984, 2000; Жаринов, Демянчук, 2008]. Сведения об основных этапах формирования лавового купола, краткое описание извержений во время нового эруптивного цикла в 1980–2007 гг., результаты определения высот и объемов экструзивных куполов, данные о минералогическом и химическом составе продуктов извержений приведены в работах [Федотов и др., 2004; Гирина и др., 2006; Жаринов и др., 1995; Мелекесцев и др., 2003, 2004; Горбач, 2006].

В предыдущих исследованиях выделено несколько этапов формирования купола. I этап – август 1980 г.–конец 1981 г. – выжимания экструзии; II этап – апрель 1993 г.–январь 1995 г. мощное эксплозивное извержение с последующей экструзивной деятельностью, сопровождающейся увеличением расхода изверженных продуктов и выжиманием новых экструзий. III – этап характеризуется тем, что экструзивный тип извержения, сменился эксплозивно-экструзивным с излиянием лавовых потоков. После кратковременных эксплозивных извержений в 2001, 2004, 2005

и в 2010 гг. наблюдалось усиление экструзивного процесса, который выражался в интенсивном приросте высоты и объеме лавового купола

В результате извержения 28 февраля 2005 г. мощными взрывами была разрушена западная часть вершины купола. Пирокластический поток, сопровождавший эксплозивное извержение, распространился до 25 км от вулкана [Жаринов, Демянчук, 2008]. С марта 2005 г. до эксплозивного извержения 27 октября 2010 г. процесс выжимания лавовых куполов, сопровождаемый пепловыми выбросами и отложением небольших пирокластических потоков, продолжался.

27 октября 2010 г. произошло эксплозивное извержение, в ходе которого была разрушена восточная часть экструзивного купола. Это извержение было одним из сильнейших после начала роста экструзивного купола в августе 1980 г. После эксплозивной фазы во время извержений 2007 и 2011 гг. на куполе наблюдалось образование вязких лавовых потоков длиной до 640 м. Интенсивную эксплозивную деятельность и разрушения лавовых куполов в 2005 и 2010 гг., а также сход протяженных вязких лавовых потоков, можно считать новым этапом деятельности вулкана.

Работа посвящена детальному рассмотрению динамики извержений вулкана Шивелуч за последние десятилетия, изменению в характере деятельности вулкана, которое не могло не отразиться на химический состав пеплов. В работе выполнена оценка вязкости лавовых потоков извержений 2007 и 2010 гг.



Рис. 1. Общий вид на вулкан Шивелуч с ЮВ.

В центре — растущий экструзивный купол. Съемка 21.11.2010, фото Демянчука Ю.В. На переднем плане купола видны разрушения в результате извержения 27 октября 2010 г.

АКТИВНОСТЬ ВУЛКАНА ШИВЕЛУЧ В 2005—2011 гг.

В данном разделе приведены результаты визуальных и видео наблюдений, полученные авторами лично при изучении деятельности вулкана в указанный период.

2005 г. В ночь с 27 на 28 февраля (время местное) произошло эксплозивное извержение, в результате которого была частично разрушена вершина лавового купола. Максимальная высота купола уменьшилась на 125 м с 517 м 07.02.2005 г. до 392 м 05.03.2005 г. (рис. 2а). Объем разрушенной части купола был более 0.04 км^3 [Жаринов, Демянчук, 2008]. Разрушение купола сопровождалось серией взрывов и протяженными, до 25 км пирокластическими потоками. Объем изверженных продуктов оценен в 0.2 км^3 [Гирина и др., 2006; Нуждаев и др., 2005]. С конца марта экструзивный процесс продолжился, это было установлено по свечению в центральной части купола в ночное время.

2006 г. До декабря на куполе наблюдалась слабая фумарольная деятельность, шло выжимание отдельных блоков в восточном секторе экструзии. После длительного перерыва 17 декабря возобно-

вилась эксплозивная деятельность, когда произошел пепловый выброс, при этом высота пепловой колонны достигала 8 км н.у.м. Через 10 дней происходит еще один выброс такой же мощности. Эксплозивная деятельность вызывает усиление экструзивного процесса.

2007 г. 4 января из п. Ключи в ночное время наблюдалось свечение на куполе и сход раскаленных лавин от вершины до основания купола. С 22 января по восточному склону купола начал спускаться поток вязкой лавы. С этого времени происходит интенсивный прирост высоты купола и увеличение объема, преимущественно его восточного сектора. На протяжении двух лет после извержения 28 февраля 2005 г. ежегодное количество пепловых выбросов было не более 3—4 в год, а в 2007 г. количество зарегистрированных пепловых выбросов возросло до 21 (рис. 3а). Рост высоты купола сопровождался образованием на его вершине лавовой короны. Лавовая корона — магматическое тело на вершине купола, возникающее в результате выжимания вязкой лавы. Усиление выжимания новых порций лавы произошло вновь после пеплового выброса 29 марта. На ЮВ склонах купола образовались потоки вязкой андезитовой лавы. Поток свежей лавы появился

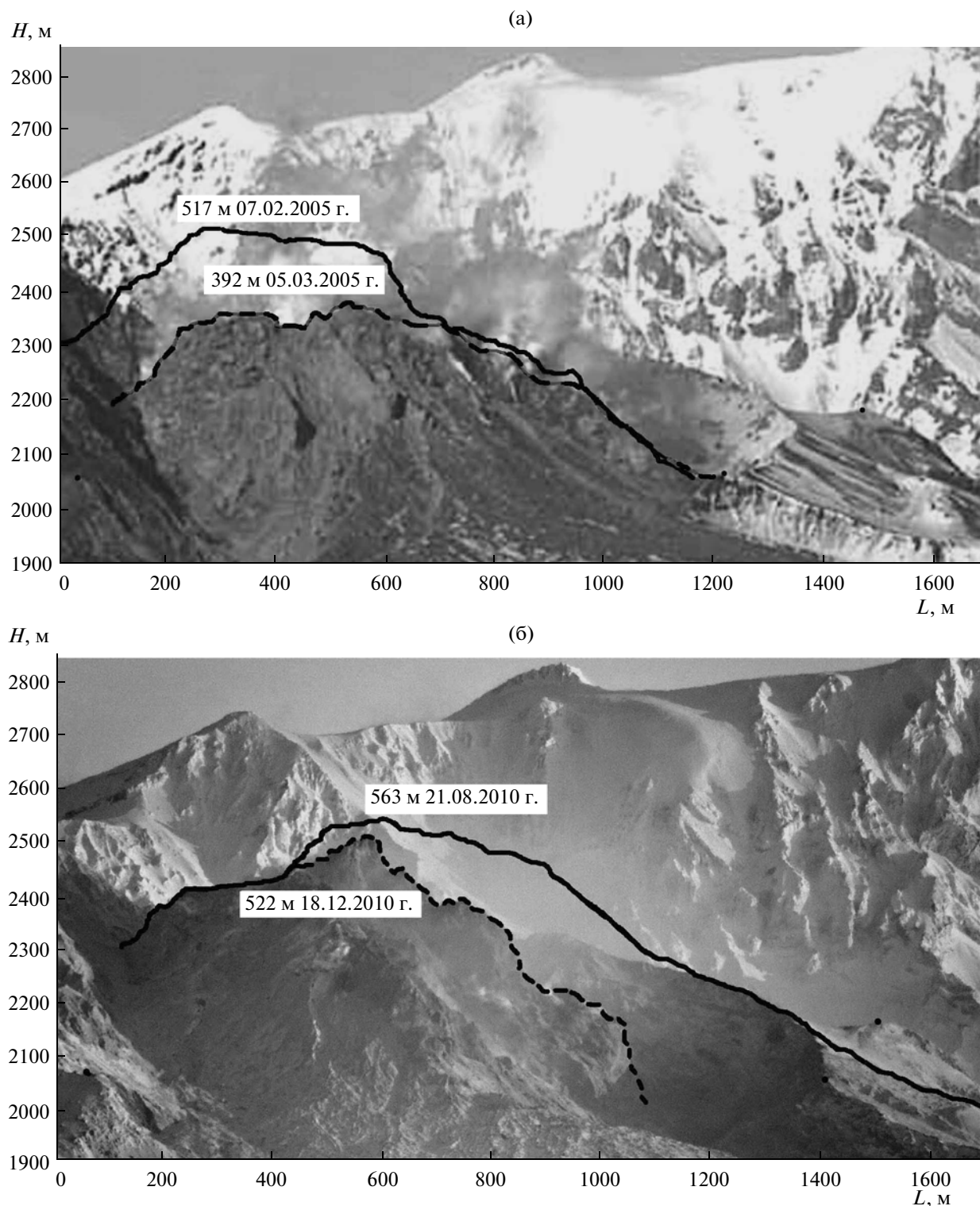


Рис. 2. Профили лавового купола по цифровой видеосъемке.

а – профиль купола до извержения 28.02.2005 г. (пунктир) и после извержения (сплошная линия); б – профиль лавового купола до извержения 28.10.2010 г. (пунктир) и после извержения (сплошная линия).

31 марта с восточной стороны купола, а 7 ноября новый лавовый поток появился на юго-западной стороне купола. Лавовые потоки постоянно фиксировались на склонах купола с 10 июля по 7 ноября (рис. 4). Одновременно со сходом обломочных лавин и пирокластических потоков шло за-

сировались на склонах купола с 10 июля по 7 ноября (рис. 4). Одновременно со сходом обломочных лавин и пирокластических потоков шло за-

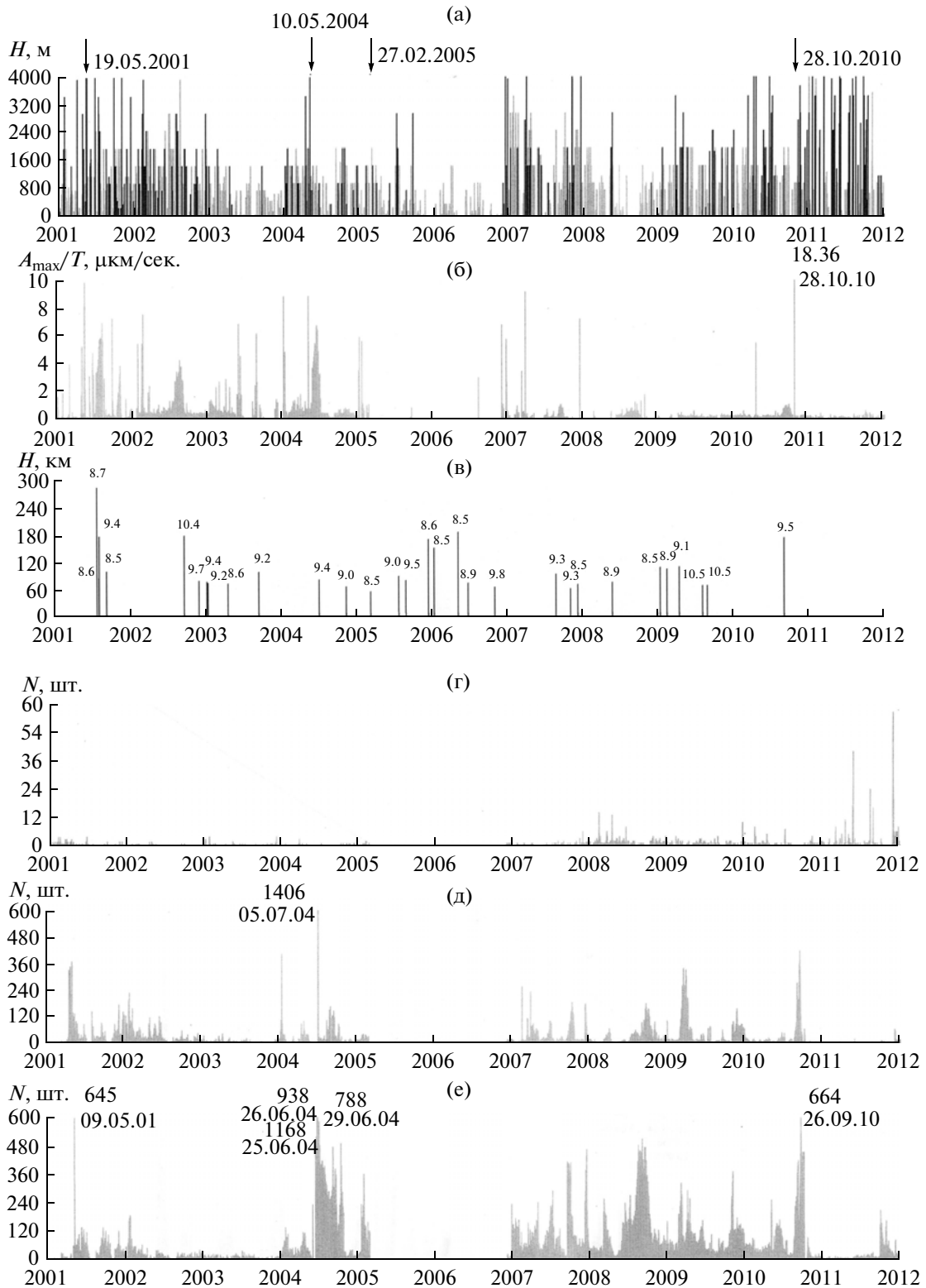


Рис. 3. Суточные характеристики сейсмической и вулканической активности вулкана Шивелуч в 2001–2011 гг. а – изменение высот парогазовых (светлые линии) и пепловых выбросов (затемненные линии), стрелками показаны пароксизмальные эксплозивные извержения; б – максимальная амплитуда вулканического дрожания $A_{max}/T_{max}/с$; в – глубины тектонических землетрясений за указанный период, цифры показывают энергетический класс землетрясений; г – число вулканических землетрясений I – типа; д – число землетрясений II–III типа; е – число землетрясений IV типа. Тип землетрясений дан по классификации П. И. Токарева [Токарев, 1965]. Характеристики сейсмической активности приведены по данным обработки КФ ГС РАН.

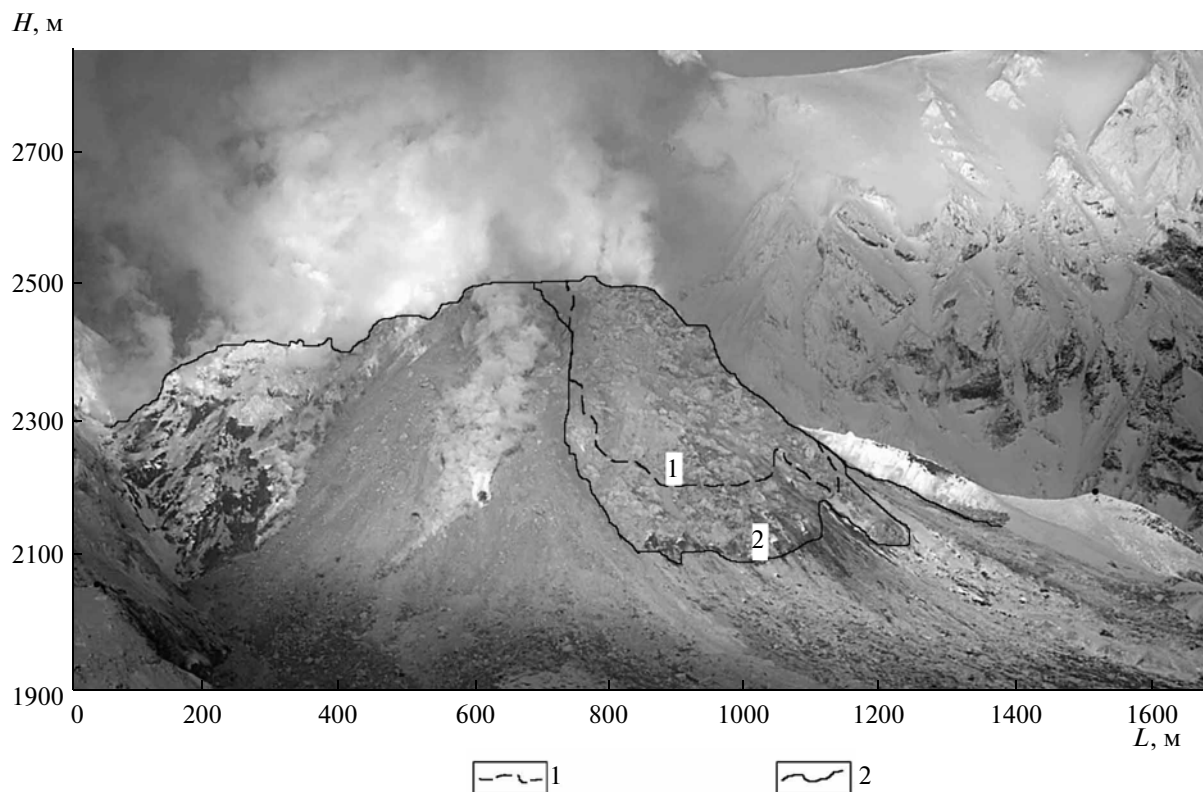


Рис. 4. Контуры вязких лавовых потоков на вулкане Шивелуч в результате извержений. 1 – с 10.07.2007 г. по 14.09.2007 г.; 2 – с 10.07.2007 г. по 07.11.2007 г.

полнение кальдеры вулкана Молодой Шивелуч, что приводило к увеличению диаметра основания купола.

2008 г. Выжимание вязкой лавы и продвижение лавового потока по ЮВ склону продолжалось, 8 января лавы достигла основания конуса. Продвижение лавы хорошо было видно в ночное время, когда наблюдалось свечение от вершины до основания лавового купола.

Эксплозивная деятельность в 2008 г. уменьшилась, за год было зарегистрировано 6 пепловых выбросов. С 22 января лавовый поток появился на южной стороне купола. Интенсивная фумарольная деятельность в центральной части купола свидетельствовала об усилении экструзивного процесса в центральной части купола. К 17 февраля лавовый поток на южной стороне купола продвинулся по склону на 300–400 м, а по руслу р. Байдарная начали сходить грязевые потоки. Парящие площадки стали наблюдаться в 10 км от лавового купола. К 21 апреля лавовый поток длиной 500 м опустился до середины конуса. В конце мая на вершине купола наблюдалась слабая фумарольная деятельность. В ночное время отмечалось слабое свечение на границах южной и западной частей купола. Ослабление экструзивной деятельности до полной остановки происходило с

20 мая до 5 октября. После этого вновь возобновилось свечение вдоль границ южной части купола.

Усиление экструзивной деятельности продолжалось до конца года. Эксплозивная деятельность в течение года была слабой, за год произошло всего 6 пепловых выбросов. Заметных разрушений купола в результате взрывов не произошло. За 2007–2008 гг. купол вырос на 96 м, в основном за счет восточной части купола.

2009–2010 гг. В конце января–начале марта 2009 г. произошло усиление как экструзивной, так и эксплозивной активности вулкана. Наблюдалось увеличение высоты купола на 38 м, максимальная отметка купола стала 564 м (рис. 5). Необходимо отметить, что при выполнении тригонометрического нивелирования наведение сетки нитей теодолита производится на кромку кратера ближнюю к наблюдателю. При расстоянии от наблюдателя до вулкана 46 км и средней высоте купола от уровня моря 2500 м угол наклона визирного луча составляет 3°. Диаметр вершины лавового купола изменялся в 2000–2010 гг. от 300 до 700 м. В этом случае изменения высот дальней от наблюдателя кромки лавового купола могли достигать 16–38 м. Приращение высоты экструзивного купола за прошедшие годы в целом происходило равномерно, поэтому наблюдаемые измене-

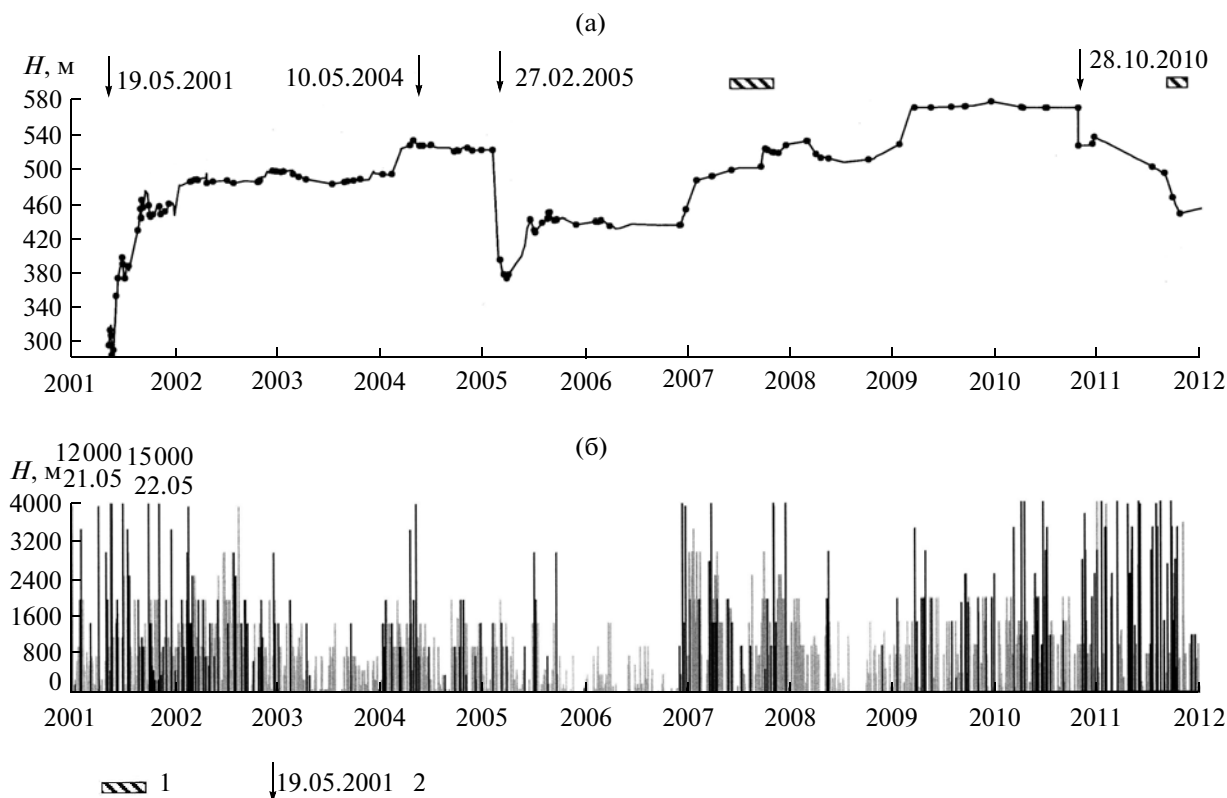


Рис. 5. Характеристика извержений вулкана Шивелуч в 2001–2011 гг.
 а – изменения максимальной отметки лавового купола вулкана Шивелуч по теодолитным наблюдениям из п. Ключи: 1 – периоды излияния лавовых потоков на склоны лавового купола, 2 – крупные эксплозивные извержения;
 б – изменение высот парогазовых (светлые линии) и пепловых выбросов (залитые линии), стрелками показаны параксизмальные эксплозивные извержения.

ния (прирост высоты) авторы связывают с усилением эксплозивной деятельности.

На усиление эксплозивной деятельности указывало увеличение пепловых выбросов, сопровождающихся пирокластическими потоками. За год отмечено 22 выброса, но следует отметить, что некоторые выбросы в ночное время могли быть пропущены. К концу года относительная высота купола достигла отметки 571 м. В дальнейшем до извержения 27 октября 2010 г. прироста высоты купола не наблюдалось.

В 2010 г. сохранилась высокая эксплозивная деятельность, было зарегистрировано 25 пепловых выбросов. Восточная сторона купола покрывается мощным лавовым потоком. Постепенно излияние лавовых потоков с восточной стороны перешло в центр купола и затем 10 марта 2010 г. раскаленная лава появилась на западном склоне. Периоды усиления эффузивной деятельности хорошо отмечались на ночных снимках. В отдельные дни (23.06.2010) в результате поступления новых порций лавы на СВ склоне наблюдалось свечение от вершины до подошвы. К концу ок-

тября по данным видеосъемки вершина купола была покрыта слоем лавы толщиной 30–40 м.

Одно из крупнейших эксплозивных извержений после начала формирования новых экстрезий в августе 1980 г. произошло 27 октября 2010 г. До извержения диаметр вершины купола был равен 700 м, а абсолютная высота лавового конуса была равна 2740 м., относительная отметка конуса 563 м. (см. рис. 2б). За основание купола принимался уровень до начала выжимания экстрезии в августе 1980 г.

Представительные данные о последствиях извержения получены из результатов обработки аэросъемки, выполненной 22 ноября 2010 г. [Двигалo и др., 2010]. В ходе извержения была разрушена значительная часть постройки, с ЮВ стороны (см. рис. 2в). Образовалась шарра с размерами 2.5 × 1.1 км. Отложения обломков купола и тефры распространились на 20 км от лавового купола, площадь отложений составила более 25 км² (рис. 6). Объем разрушенной части лавового купола вместе с объемом канала, по которому происходило перемещение изверженного материала, составил 0.27 км³ [Двигалo и др., 2010]. Через 4 часа после



Рис. 6. Поле отложений обломочной лавины, образовавшейся в результате обрушения экструзивного купола 28 октября 2010 г. (время местное). Пунктиром отмечено поле отложений, определенное менее точно. Основа – космический снимок.

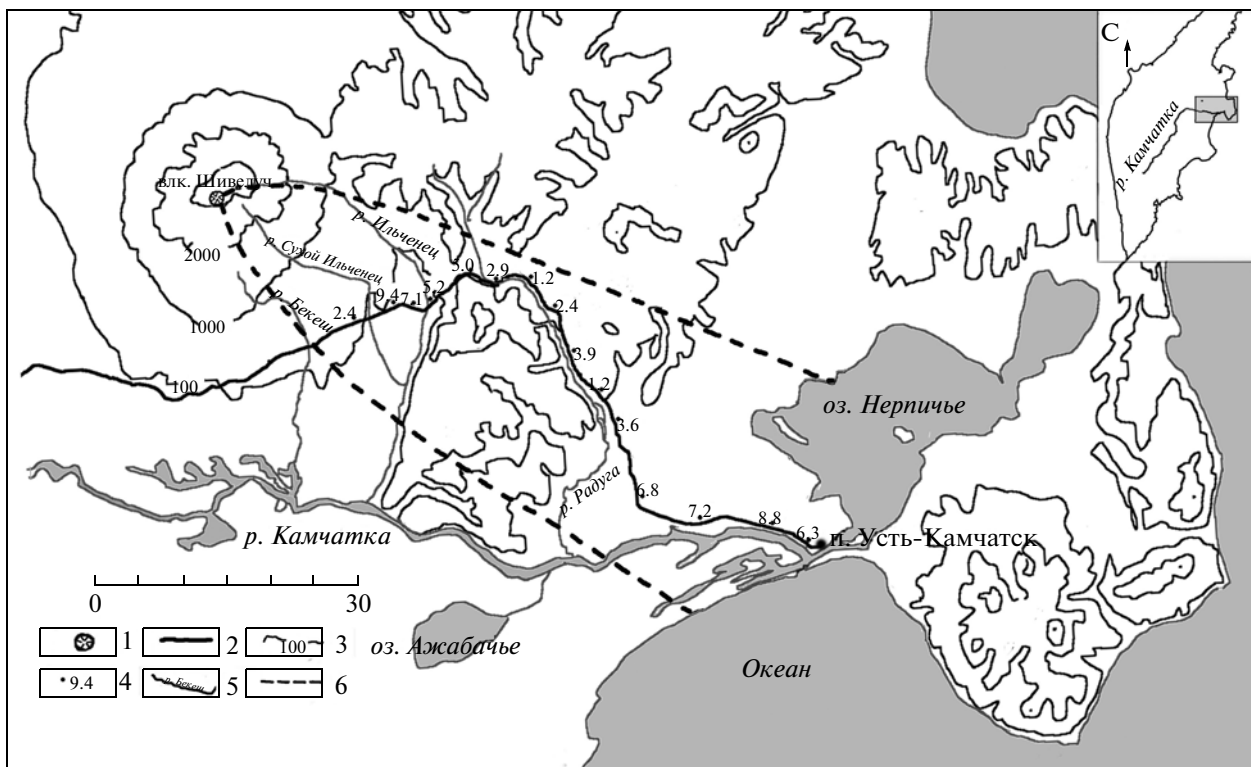


Рис. 7. Схема распространения пеплового шлейфа и расположения точек отбора проб пепла.
 1 – лавовый купол вулкана Шивелуч, 2 – автогасса, 3 – горизонталы, 4 – точка отбора пепла, цифра показывает массу пробы в кг/м², 5 – сухие реки, 6 – границы пеплового шлейфа.

начала извержения в п. Усть-Камчатск, расположенном в 75 км от вулкана, начался пеплопад. Протяженность пеплового шлейфа, определенная по космическим снимкам, составила 2500 км.

Для оценки объема отложений пепла было отобрано 20 образцов на расстояниях от 17 до 72 км от вулкана. Места отбора проб показаны на рис. 7. В 21 км от лавового купола максимальная величина пепловых отложений достигала – 9.4 кг/м². Ось пеплопада была направлена на юго-восток в сторону п. Усть-Камчатск. Отложения пепла покрыли площадь более 2 тыс. км².

В работе [Трубников, Адамчук, 1982] было показано, что изменение мощности Δ тефры с расстоянием R можно аппроксимировать зависимостью:

$$\Delta = \frac{c}{R^n}, \tag{1}$$

где Δ – толщина слоя изверженного материала, c – средняя мощность слоя, n – переменная величина, в среднем n ≈ 2.

Для оценки массы и объема тефры получены формулы при различных, наиболее типичных формах изопахит [Широков, 1985]. Для извержения 27 октября 2010 г. расчет весовой массы пепла был выполнен для территории, протяженностью

200 км от вулкана. Всю площадь пепловых отложений разделили на три участка: первый ближний к лавовому куполу секторный участок с углом раствора 45° и радиусом 11 км, второй в виде трапеции с удалением оснований на 11 и 72 км от вулкана, третий участок в виде прямоугольника включает дальнюю зону с удалением от 70 до 200 км от вулкана. Для расчетов были приняты следующие средние значения мощности отложений: 16.8; 4.5; 0.4 кг/м² для каждого участка соответственно.

Среднее значение мощности отложений для второго участка получены из полевых определений. Для первого (секторного) и третьего (прямоугольного) участков средние мощности отложений рассчитаны из соотношения (2) в предположении, что n₀ = n₁ = 0.8.

$$\Delta_0 = \Delta_1 \left(\frac{R_1}{R_0} \right)^{n_1}. \tag{2}$$

На практике не всегда распределение тефры и пеплов происходит согласно зависимости (1). Во время извержений на характер отложений оказывают большое влияние метеорологические условия. Для каждого извержения число точек отбора проб при определении мощности отложений не

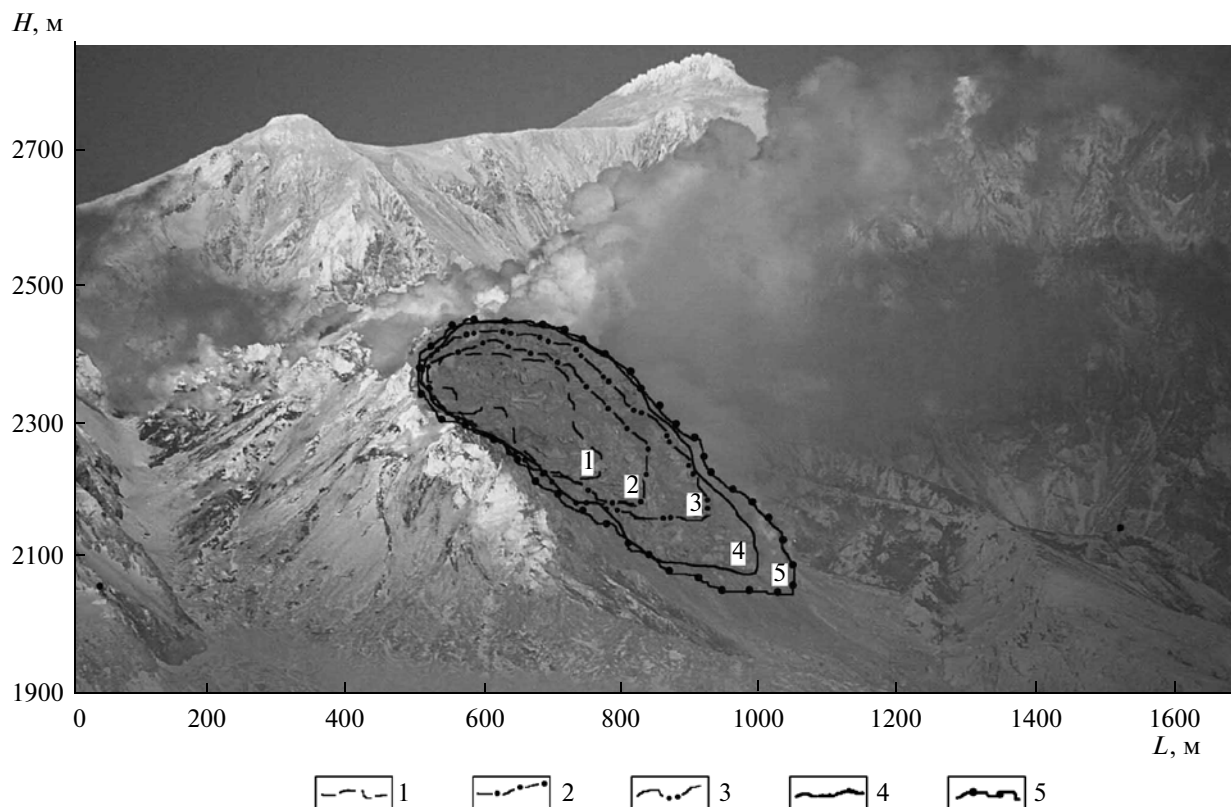


Рис. 8. Контуры вязких лавовых потоков на вулкане Шивелуч в результате извержений.

1 – 03.10.2011–07.10.2011 гг.; 2 – 03.10.2011–15.10.2011 гг.; 3 – 03.10.2011–24.10.2011 гг.; 4 – 03.10.2011–14.11.2011 гг.; 5 – 03.10.2011–29.11.2011 гг.

может быть слишком большим по техническим причинам. Поэтому точно установить закон распределения отложений не всегда удается, что приводит к ошибкам в определении массы и объемов отложений, достигающим десятки процентов. Общая масса пепла для извержения в. Шивелуч 27 октября 2010 г. составляет 7.8 млн. т.

Сразу после извержения на вершине купола и его ЮВ склоне отмечалось интенсивное парение. С 10 ноября возобновились пепловые выбросы, до конца года было зарегистрировано 7 пепловых выбросов.

2011 г. С начала года вулканическая активность проявлялась в виде отдельных пепловых выбросов и парогазовой деятельности на западном склоне купола и в его центральной части. 3 октября на ЮВ кромке вершины купола было отмечено появление лавового потока. С этого времени началась интенсивная экструзивно-эффузивно-эксплозивная фаза в деятельности вулкана. До конца года шло заполнение ЮВ шарра, образованной во время извержения 27.10.2010 г., новыми лавовыми потоками (рис. 8).

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сейсмические события и деформации лавового купола, сопровождающие извержения вулкана в 2001–2011 гг. Изменение характеристик сейсмического режима и изменение морфологии экструзивного купола, как правило, предшествуют и сопровождают формирование экструзий. Для андезитового вулкана Шивелуч характерны те же типы землетрясений, которые выделены для Ключевской группы вулканов:

– тектонические землетрясения, происходящие на глубинах от 30 до 300 км;

– землетрясения сходные с тектоническими с глубиной очага 5–30 км, I – тип по классификации П.И. Токарева;

– неглубокие вулканические землетрясения с глубиной очагов до 5 км под вулканом (II–III тип);

– поверхностные события, связанные с лавинами, камнепадами, сходом пирокластических потоков, выбросами газа и пепла (IV тип);

– вулканическое дрожание (ВД) – низкочастотные колебания продолжительностью от нескольких минут до нескольких часов, сопровождающие выбросы пепла и газов. [Токарев, 1966].

Детальное распределение землетрясений по типам за период 2001–2011 гг. согласно классификации П.И.Токарева, приведено на рис. 3г, 3д, 3е. На рис. 3а, 3б, в приведены характеристики вулканической активности, максимальная амплитуда вулканического дрожания (ВД) и тектонические землетрясения непосредственно под вулканической постройкой с глубинами очагов от 80–90 до 200 км и более.

Следует отметить, что в ходе извержения 28 февраля 2005 г. станция, с которой поступала основная информация о сейсмичности в районе вулкана Шивелуч, была разрушена. До установки новых станций систематические данные о сейсмичности в районе вулкана Шивелуч с марта 2005 г. до конца декабря 2006 г. отсутствуют.

Для исследования использованы данные местного каталога вулканических землетрясений района Северной группы вулканов и регионального каталога землетрясений Камчатки. Оба каталога размещены на сайте КФ ГС РАН (<http://www.emsd.iks.ru>). Выборка землетрясений выполнялась для района размером 50 × 60 км, в центре которого расположен вулкан Шивелуч. Выбирались вулканические землетрясения с энергетическим классом $K_s \geq 4.0$ и тектонические землетрясения с $K_s \geq 8.5$.

В предыдущих исследованиях для вулкана Шивелуч было установлено, что по мере заполнения кратера экструзиями, усиливается сейсмическая активность [Федотов и др., 2004]. На рис. 3а, 3б показано, что повышение сейсмичности наблюдается практически во всех случаях перед главными эксплозивными фазами извержений.

19 мая 2001 г. за несколько часов до начала эксплозивной фазы наблюдалось усиление ВД до 10 мкм/с (см. рис. 3а, 3б). Перед извержением 19.05.2001 г. также отмечен рост экструзивного купола. То же повторяется перед извержением 10 мая 2004 г.: непосредственно перед извержением отмечается повышение уровня ВД и за полтора месяца до начала извержения наблюдается рост высоты купола на 30 м.

После основной фазы извержения 10 мая 2004 г. резко повышается количество поверхностных землетрясений IV типа (см. рис. 3е). Повышенный фон сейсмичности в виде землетрясений II–III сохраняется до конца года, затем происходит снижение фона сейсмичности и вновь резкий подъем в январе–феврале перед извержением 28.02.2005 г.

В результате извержения 28.02.2005 г. произошло частичное разрушение западной стороны купола. Максимальная высота купола понизилась на 125 м, с 517 до 392 м (см. рис. 5). После прекращения эксплозивной фазы извержения вновь наблюдается рост лавового купола. Как и раньше, после эксплозивного извержения 22 апреля

1993 г. наибольший прирост купола происходит в первый месяц после окончания главной эксплозивной фазы извержения [Жаринов и др., 1995].

После эксплозивной фазы извержения 19 мая 2001 г. рост купола с 6 июня по 17 октября происходил со скоростью 0.8 м/сутки. После извержения 27 февраля 2005 г. с 6 марта по 10 июня скорость роста купола была 0.5 м/сутки, за три месяца высота купола увеличилась на 43 м. С конца июня до середины декабря рост купола остановился, снизилась также эксплозивная активность. После возобновления пепловых выбросов и появления свечения на куполе его рост возобновился. С декабря 2006 г. по март 2009 г. максимальная высота купола увеличилась на 200 м (скорость роста составляла 0.14 м/сутки). Периоды усиления эксплозивной деятельности в 2007–2011 гг. и непрерывного роста купола совпадают с повышенным уровнем сейсмичности в постройке вулкана и ниже на глубинах до 5 км. Это отражают графики количества землетрясений II–III и IV типов (см. рис. 3д, 3е), а также графики изменения высоты купола (показателя экструзивной деятельности) и пепловых выбросов (показателя эксплозивной деятельности). За 1.5–2.0 месяца до главной эксплозивной фазы 27 октября 2010 г. количество землетрясений II–III типа менялось от 30 до 300/сутки и IV типа от 50 до 500/сутки.

Взаимосвязь сейсмичности на больших глубинах (105–120 км) с началом формирования лавового купола в 1980–1994 гг. рассмотрена в работе [Gorelchik et. al., 1997]. Было установлено, что пространственно-временное распределение эпицентров землетрясений показывает на коровомантлийное питание вулкана Шивелуч. Значительные изменения в уровне сейсмичности на глубинах 100–120 км под вулканом должны влиять на будущую вулканическую активность.

Действительно, во время интенсивного роста и разрушения купола в 2001–2011 гг. наряду с поверхностными землетрясениями происходили землетрясения на глубинах от 70 до 200 км и более. В основном эпицентры землетрясений располагались на глубинах от 70 до 130 км (см. рис. 3в). Этот факт подтверждает, что питание вулкана происходило с глубин не менее 100 км.

Эффективная вязкость андезитовых лав вулкана Шивелуч. Вязкость магмы является одним из наиболее важных параметров, определяющих характер извержения, влияющих на образование экструзивных куполов. Вязкость лавы – это сопротивление вещества течению, она обратна текучести и зависит от химического состава вещества магмы; количества и состояния, находящейся в ней газовой фазы; количества переносимых магмой твердых частиц; от ее температуры и давления [Влодавец, 1984]. Кислые магмы более вязкие, чем основные. Чем больше магма содержит

Таблица 1. Характеристика вязких лавовых потоков вулкана Шивелуч во время извержений 10.07.2007–07.11.2007 и 03.10.2011–29.11.2011 гг.

№ п.п	Дата	Длинапотока, <i>m</i>	Средняя скорость <i>V</i> , м/час	Средняя мощность <i>h</i> , м	Объемпотока, км ³	Площадь, км ²	Эффективная вязкость, Пз
1	10.07.2007–14.09.2007	382	0.24	30	0.0034	0.114	$5.1 \cdot 10^{11}$
2	10.07.2007–07.11.2007	596	0.21	30	0.0063	0.210	$6.0 \cdot 10^{11}$
3	03.10.2011–07.10.2011	308	3.21	29	0.0013	0.046	$3.3 \cdot 10^{11}$
4	03.10.2011–15.10.2011	377	1.31	34	0.0025	0.075	$1.1 \cdot 10^{11}$
5	03.10.2011–24.10.2011	492	0.98	40	0.0049	0.123	$2.0 \cdot 10^{11}$
6	03.10.2011–14.11.2011	583	0.58	50	0.0088	0.175	$5.4 \cdot 10^{11}$
7	03.10.2011–29.11.2011	640	0.47	50	0.0096	0.192	$6.6 \cdot 10^{11}$

кремния и алюминия, тем больше ее вязкость. Вязкость лавы характеризует реологические свойства лавового потока, проявляется в процессе извержения.

Много определений эффективной вязкости базальтовой лавы было выполнено при изучении Большого трещинного Толбачинского извержения (БТТИ) [Слезин, Федотов, 1984]. Вязкость лавовых потоков вычислялась по формуле движения вязкого слоя жидкости по наклонной плоскости под действием силы тяжести [Ландау, Лифшиц, 1963]:

$$\eta = \frac{\rho g h^2 \times \sin \alpha}{3\bar{V}}, \quad (3)$$

где: ρ – плотность лавы; g – ускорение силы тяжести; h – мощность потока лавы; α – угол наклона местности; \bar{V} – средняя скорость перемещения лавы. Эффективная вязкость лавы, измеренная на расстоянии 1–2 км от истока, составляла 10^7 – 10^8 Пз. Наименьшие значения вязкости получены при появлении лавы непосредственно вблизи истока $\sim 3 \times 10^6$ Пз.

Значения величин, входящих в формулу (3), изменяются в некоторых пределах, что отражается на точности определения эффективной вязкости. Наибольшим изменениям подвержена величина h – мощность и температура лавового потока. Температура андезитовой лавы при поступлении на дневную поверхность может достигать 1000°C . Через месяц после окончания извержения 28 февраля 2005 г. температура пирокластического потока на глубине 167 см была 402°C . Считая сходными характеристики остывания лавовых и пирокластических потоков, понижение температур в течение месяца достигает сотни градусов. При вычислениях эффективной вязкости, во многих случаях принималась средняя плотность лавового поля ($\rho = 2.2 \text{ г/см}^3$). Из-за непостоянства входных параметров вычисленные значения эффективной вязкости могут меняться в пределах десятков процентов.

По мере остывания лавовых потоков на дневной поверхности их вязкость увеличивается. У подножья эруптивного конуса южного прорыва БТТИ в ходе извержения было образовано лаво-шлаковое плато. Рассматривая расположение плато как процесс, подобный течению лавового потока, была определена эффективная вязкость, определяющая это расположение. При средней мощности лавового покрова 30–40 м и уклоне один градус эффективная вязкость была 10^{12} Пз.

Процесс растекания андезитовых лавовых потоков по склону экструзивного купола можно также рассматривать, как течение вязкой жидкости по наклонной плоскости и оценить их эффективную вязкость.

Образование лавовых потоков на экструзивном куполе вулкана Шивелуч было отмечено в 2007 и в 2011 гг. (см. рис. 4, 7). В табл. 1 приведены характеристики лавовых потоков во время извержений в указанные годы. Наименьшая вязкость получена для лавового потока в первые дни его появления (поток № 3, 2011 г.) – 3.3×10^{10} Пз. В дальнейшем, по мере остывания, эффективная вязкость лавовых потоков увеличивалась от 1.1×10^{11} до 6.6×10^{11} Пз. Характерно, что эффективные вязкости лавовых потоков извержений 2007 и 2011 гг. близки. При расчетах по формуле (1) взяты средние скорости перемещения лавовых потоков за периоды от 4 до 120 дней. Крутизна склона лавового купола, определенная по снимкам, в 2007 и 2011 гг. была равна 36° и 32° соответственно, плотность лавы принята равной 2.2 г/см^3 . Близость, полученных значений вязкости в разные годы, говорит о том, что поступающая на поверхность магма содержала мало газа. При охлаждении магмы с небольшим газосодержанием вязкость возрастает медленно и лава может спокойно вытекать в виде потоков длительное время.

Полученные величины вязкости лавовых потоков соответствуют андезитам и андезибазальтам.

Химический состав пеплов вулкана Шивелуч. Для общего представления о составе продуктов

Таблица 2. Химический состав пепла извержений вулкана Шивелуч (1964, 1993, 2002, 2003, 2004, 2010 гг.)

Окислы	12.11.1964	1993	1993	10.03.2002	10.07.2003	10.05.2004	27.10.2010
SiO ₂	54.24	61.74	63.06	62.97	62.48	62.16	65.14
TiO ₂	0.90	0.40	0.61	0.57	0.86	0.54	0.48
Al ₂ O ₃	18.91	17.87	16.73	17.15	16.64	16.72	15.70
Fe ₂ O ₃	2.38	2.94	2.67	2.90	3.23	1.87	2.59
FeO	3.26	1.87	1.96	2.23	1.67	2.64	1.33
MnO	0.14	0.12	0.02	0.01	0.08	0.13	0.08
MgO	5.80	2.80	1.68	3.14	3.52	3.68	2.65
CaO	8.48	5.80	6.40	4.86	5.29	5.28	4.95
Na ₂ O	4.10	3.51	3.56	4.40	4.17	4.37	4.28
K ₂ O	0.96	1.27	1.32	1.40	1.44	1.35	1.49
H ₂ O	0.41	0.13	—	0.17	0.19	0.07	0.17
п.п.п.	—	0.90	1.66	0.59	0.63	0.60	0.78
P ₂ O ₅	—	0.29	0.13	0.07	0.19	0.18	—
Сумма	99.82	99.54	99.82	100.46	100.39	99.59	99.69
Источник	[Пийп, Мархинин, 1965]	[Хубуная и др., 1995]	[Хубуная и др., 1995]	[Федотов и др., 2004]	[Федотов и др., 2004]	[Федотов и др., 2004]	[Данные Демянчук, Малик]

извержений вулкана Шивелуч в табл. 2 приведены химические составы пеплов некоторых извержений 1964–2010 гг. После катастрофического извержения 12 ноября 1964 г. пеплы вулкана Шивелуч становятся более обогащенными содержанием SiO₂. За прошедшие 46 лет содержание кремнезема увеличилось до 10%. В минувшее десятилетие химический состав пеплов менялся незначительно. Анализы пеплов, отложенных во время извержения 28 октября 2010 г. обнаружили тенденцию к повышению кремнезема на 3% от определений отложений пеплов 1993, 2002–2004 гг. Химический состав пирокластических отложений и постройки вулкана близок аналогичным значениям образцов пепла.

Оценка объемов и глубины магматических очагов вулкана Шивелуч. Оценку всего объема избыточного количества магмы V , накопленного в сферическом очаге под действием избыточного давления p можно выполнить, применяя выражение, полученное в работе [Dieterich, Decker, 1975], в котором учитываются приращения объемов за счет сжатия окружающих пород и за счет сжатия магмы под действием избыточного давления p :

$$V = \frac{4}{3} \eta R^3 p (\beta_c + \beta_m), \quad (4)$$

где β_c и β_m сжимаемость окружающих пород и магмы соответственно.

В работе [Федотов, 2006] получено выражение для оценки радиуса R и объема сферического магматического очага:

$$V = \frac{4}{3} \eta R^3 p 10^{-6} (1.8 + 9) = 4.56 R^3 p \cdot k \cdot 10^{-5}. \quad (5)$$

Сжимаемость гранитов и базальтов при температуре 200–300°C и давлении 500 бар близка

$\beta_c = (1.8 \pm 0.4) \cdot 10^{-6} \text{ бар}^{-1}$. Значение сжимаемости магмы взято в 5 раз больше с учетом увеличения сжимаемости при плавлении пород [Федотов, 2006], $\beta_m = 9 \cdot 10^{-6} \text{ бар}^{-1}$.

Удобно проводить оценку объема магматического очага по объему ювенильного материала, поступившего на дневную поверхность во время извержения¹ [Федотов, 2006].

$$V = 0.9 \cdot \Delta V_{\text{п}} \frac{10^5}{\Delta P} k, \quad (6)$$

где $\Delta V_{\text{п}}$ – объем продуктов извержения в пересчете на объем магмы, ΔP , бар – сброс

избыточного давления в магматической питающей очаге вулкана, $k = 1 \text{ бар}^{-1}$. Основной вклад в объем изверженных продуктов вносят отложения пирокластических потоков и пепловые отложения. Результаты оценок объемов магматических очагов приведены в табл. 3. При расчетах были приняты следующие значения составляющих выражения (1): средняя плотность пирокластических потоков $\rho_{\text{пп}} = 1.47 \text{ г/см}^3$, средняя плотность пепла $\rho_{\text{пепл}} = 1.0 \text{ г/см}^3$, средняя плотность магмы,

¹ Для сохранения размерности в формулах (5 и 6) добавлен коэффициент k , опущенный при подстановке значений сжимаемости лавы и окружающих пород.

Таблица 3. Характеристики магматических очагов вулкана Шивелуч

Дата извержения	Отложения пирокластических потоков, км ³	Объем разрушенной части купола, км ³	Отложения пепла, км ³	Объем лавовых потоков, км ³	Суммарный объем в пересчете на объем магмы, км ³	Изменение избыточного давления, бар	Глубина верхней кромки очага, км	Высота лавовой колонны от основания купола h_0 , км	Объем магматического очага, км ³
12.11.1964	0.3÷0.5	1.5	0.3	—	0.30÷0.43	100–150	7.7÷16.1	0.700	180–260 270–388
28.02.2005	0.16	0.04	—	—	0.098	100–150	5.1÷10.1	0.39–0.52	58–88
28.10.2010	0.02	0.28	—	—	0.018	25–100	5.9÷12.4	0.53–0.56	16–65

Примечание. Данные об объемах отложений пирокластических потоков, объеме разрушенной части купола и отложениях пепла извержения вулкана Шивелуч 12.11.1964 г. взяты из работы [Богоявленская и др., 1985], данные для извержений 28.02.2005 и 28.10.2010 гг. — наблюдения авторов.

$\rho_{\text{магмы}} = 2.4 \text{ г/см}^3$. Для извержений 12.10.1964 и 28.05.2005 гг. изменения избыточного давления $\Delta P = 100\text{--}150$ бар. Такие перепады избыточного давления могут быть при образовании новых даек.

Для извержения 27.10.2010 г. избыточное давление принято $\Delta P = 25\text{--}100$ бар, принимая во внимание, что отложений пирокластических потоков при этом извержении был на порядок меньше, чем во время извержения 28.02.2005 г.

Оценка глубины питающих магматических очагов выполнена тем же способом, как это было сделано в работе [Жаринов, Демянчук, 2008]. Полагая, что лавовая колонна с плотностью $\rho_{\text{л}}$ и высотой h будет находиться в равновесии с перекрывающими породами с плотностью $\rho_{\text{п}}$ и мощностью H , можно записать:

$$\rho_{\text{л}}gh = \rho_{\text{п}}gh. \quad (7)$$

Мощность перекрывающих пород или глубина магматического очага (МО) будет:

$$H = h \frac{\rho_{\text{л}}}{\rho_{\text{п}}}. \quad (8)$$

Высота лавовой колонны от основания (подошвы) купола:

$$h_0 = h - H. \quad (9)$$

Обозначив $\beta = \frac{\rho_{\text{л}}}{\rho_{\text{п}}}$ и проведя вычитание из правой

и левой частей равенства (8) величину $H \frac{\rho_{\text{л}}}{\rho_{\text{п}}}$, после преобразований получим глубину магматического очага:

$$H = \beta \frac{h_0}{1 - \beta}. \quad (10)$$

При таком способе определения глубины магматического очага предварительно знать длину магматического канала не нужно. Следует отметить, что при этих расчетах большое значение имеет выбор плотностей лавы и перекрывающих

пород. Для различных по составу экструзивных куполов глубины залегания МО будут меняться при прочих равных условиях. По формуле (10) можно определять относительные изменения глубины очага.

Расчеты по формуле (6) для извержения 12.10.1964 г. дают наибольшую величину объема магматической системы: $V = 180\text{--}388 \text{ км}^3$, а также наибольшую глубину расположения верхней границы этой системы $H = 7.7\text{--}16.1 \text{ км}$. ($H_{\text{ср}} = 11.9$). Для извержений 28.02.2005 и 27.10.2010 гг. величины объемов питающих магматических систем варьируют в пределах $58\text{--}88 \text{ км}^3$ и $16\text{--}65 \text{ км}^3$ соответственно. Верхние границы питающих магматических систем расположены в диапазоне $5.1\text{--}12.4 \text{ км}$ ($H_{\text{ср}} = 8.4 \text{ км}$).

Трудно предположить значительные изменения объемов и глубин расположения питающих магматических систем за небольшой отрезок времени между пароксизмальным извержением 1964 г. и последующими извержениями в 2005 и 2010 гг. Возможно более сложное строение магматической системы, чем один крупный сферический очаг. Можно допустить существование двух связанных питающих магматических очагов, корового или промежуточного, и не глубокого периферического очага, расположенного на меньшей глубине. Теоретические расчеты размеров таких очагов и глубин их расположения выполнены в работе [Федотов и др., 2000]. В ней приведены приближенные оценки размеров магматических очагов вулканов по данным о количестве изверженных продуктов, по которым объем периферического очага вулкана Шивелуч на глубине 4 км не меньше 100 км^3 , а объем его корового очага на глубине 20 км может превышать 200 км^3 . Для подтверждения существования таких питающих магматических систем необходимы дальнейшие исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формирование экструзивного купола в 2001–2011 гг. продолжалось почти непрерывно. Наиболее значительные эксплозивные события происходили в 2001, 2004, 2005 и 2010 гг. После усиленной эксплозивной деятельности наблюдались периоды повышенной экструзивной активности. Расход продуктов извержений в такие периоды был максимальным (скорость прироста объема купола достигала 0.6 млн. м³/сутки). В 2005 и 2010 гг. произошли крупные эксплозивные извержения с частичным разрушением лавового купола. Объемы разрушенных частей купола во время извержений 28 февраля 2005 г. и 27 октября 2010 г. соответственно были 0.04 и 0.28 км³; отложения пирокластических потоков — 0.16 и 0.02 км³.

Объемы разрушений купола 27.10.2010 г. были в 7 раз больше, чем разрушения 28.02.2005 г., в то же время объемы отложений пирокластических потоков в 2010 г. в 7 раз были меньше аналогичных отложений в 2005 г. Извержение 27.10.2010 г. больше похоже на разрушение купола вследствие гравитационного обвала.

Отметим главные результаты, полученные на основании изучения формирования новых экструзивных образований на вулкане Шивелуч в 2001–2011 гг.

Начальный экструзивный этап извержения в последнее десятилетие сменился на эксплозивно–экструзивно–эффузивный. По мере заполнения кратера экструзиями увеличивается сейсмичность под вулканом на глубинах до 5 км и в постройке вулкана. Значительное усиление сейсмичности на глубинах от 70 до 130 км происходит непосредственно перед крупными эксплозивными событиями, что можно рассматривать как предвестник эксплозивного извержения.

Наибольший объем питающего магматического очага был получен авторами при извержении вулкана 12 ноября 1964 г. (220–360 км³); во время последнего эксплозивного извержения 27 октября 2010 г. с частичным разрушением лавового купола объем магматического очага был в пределах 16–65 км³.

Эффективная вязкость лавовых потоков во время извержений 2007, 2011 гг. менялась в диапазоне 1.1–6.6 × 10¹¹ Пз.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы 4 фундаментальных исследований Президиума РАН, проект 2.7, и Проекта РФФИ № 11-05-00602-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Богоявленская Г.Е., Брайцева О.А., Мелекесцев И.В. и др. Катастрофические извержения типа направленных

взрывов на вулканах Сент-Хеленс, Безымянный, Шивелуч // Вулканология и сейсмология. 1985. № 2. С. 3–27.

Большое трещинное Толбачинское извержение, Камчатка, 1975–1976 гг. / Отв. ред. С.А. Федотов. М.: Наука, 1984. 638 с.

Влодавец В.И. Справочник по вулканологии. М.: Наука, 1984. 340 с.

Гирина О.А. Пирокластические отложения современных андезитовых вулканов Камчатки и их инженерно-геологические особенности. Владивосток: Дальнаука, 1998. 173 с.

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. 16–23.

Горбач Н.В. Формирование экструзивного купола вулкана Шивелуч и состав его лав в 2004–2005 гг. // Материалы Международного симпозиума “Проблемы эксплозивного вулканизма”. К 50-летию катастрофического извержения вулкана Безымянный, 25–30 марта 2006 г. Петропавловск-Камчатский, 2006. С. 112–119.

Двигало В.Н. Рост купола в кратере вулкана Шивелуч в 1980–1981 гг. по фотограмметрическим данным // Вулканология и сейсмология. 1984. № 2. С. 104–109.

Двигало В.Н. Морфологические предвестники (первые признаки) активизации некоторых вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С. 3–16.

Двигало В.Н., Свирид И.Ю., Шевченко А.В. и др. Состояние активных вулканов Северной Камчатки по данным аэросъемочных облетов и фотограмметрической обработки снимков 2010 г. // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога “Вулканизм и связанные с ним процессы”. Петропавловск-Камчатский, 2011. С. 26–36.

Жаринов Н.А., Богоявленская Г.Е., Хубуная С.А. и др. Новый эруптивный цикл вулкана Шивелуч — 1980–1993 гг. // Вулканология и сейсмология. 1995. № 1. С. 20–28.

Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В. Рост экструзивного купола вулкана Шивелуч (Камчатка) в 1980–2007 гг. по геодезическим наблюдениям и видеосъемке // Вулканология и сейсмология. 2008. № 4. С. 3–13.

Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика сплошных сред. М.: ГИТТЛ, 1963. 350 с.

Мелекесцев И.В., Двигало В.Н., Кирсанова Т.П. и др. 300 лет жизни Камчатских вулканов: Молодой Шивелуч (анализ динамики и последствий эруптивной деятельности в XVII–XX вв.). Часть I. 1650–1964 гг. // Вулканология и сейсмология. 2003. № 5. С. 3–19.

Нуждаев А.А., Гирина О.А., Мельников Д.В. Некоторые результаты изучения пирокластических отложений извержений 28 февраля и 22 сентября 2005 г. вулкана Молодой Шивелуч наземными и дистанционными методами // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2005. № 2. Вып. 6. С. 62–66.

Пийп Б.И., Мархинин Е.К. Гигантское извержение вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 г. // Бюллетень вулканологических станций. 1965. № 39. С. 28–34.

Слезин Ю.Б. Механизм экструзивных извержений // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4. С. 76–83.

Слезин Ю.Б., Федотов С.А. Физические характеристики извержения // Большое трещинное Толбачинское извержение, Камчатка, 1975–1976 гг. Гл. IV / Отв. ред. С.А. Федотов. М.: Наука, 1984. С. 143–171.

Токарев П.И. Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы (1949–1963 гг.). М.: Наука, 1966. 116 с.

Федотов С.А. Магматические питающие системы и механизм извержений вулканов. М.: Наука, 2006. 455 с.

Федотов С.А., Жаринов Н.А., Двигало В.Н. и др. Эруптивный цикл вулкана Шивелуч в 2001–2004 гг. // Вулканология и сейсмология. 2004. № 6. С. 3–14.

Федотов С.А., Уткин И.С., Уткина Л.И. Оценка размеров коровых очагов вулканов и изменение их размеров

во времени по данным о количестве, составе изверженных продуктов и глубине очага // Вулканология и сейсмология. 2000. № 3. С. 3–14

Хубуня С.А., Жаринов Н.А., Муравьев Я.Д. и др. Извержение вулкана Шивелуч в 1993 г. // Вулканология и сейсмология. 1995. № 1. С. 3–19.

Dieterich J.H., Decker R.W. Finite element modeling of surface deformations associated with volcanism // J. Geophys. Res. 1975. V. 80. № 29. P. 4094–4102.

Gorelchik V.I., Shirokov V.A., Firsov P.P., Chubarova O.S. Shiveluch volcano: seismicity, deep structure and forecasting eruptions (Kamchatka) // J. Volcanology and Geothermal Res. 1997. V. 78. P. 121–132.

Large Explosive Eruptions of Shiveluch Volcano, Kamchatka Resulting in Partial Destruction of the Extrusive Dome (February 28, 2005 and October 27, 2010)

© 2013 г. N. A. Zharinov and Yu. V. Demyanchuk

*Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006 Russia*

e-mail: nzhar@kscnet.ru

Abstract—We give an overview of the 2005–2011 eruptions of Shiveluch Volcano together with the seismicity and deformations of the lava dome during dome growth. It is shown that the generation of the intracrater intrusive dome proceeded at a variable rate. The maximum discharge of erupted lava reached 0.6 million cubic meters per day. Increased explosive activity preceded periods of intensive growth of the lava dome. We determined the volumes and depths of the magma chambers that supplied magma for large eruptions of the volcano on November 12, 1964, February 28, 2005, and October 27, 2010. We calculated the effective viscosity of the 2007 and 2011 lava flows.