



УДК 528.71:551.21

В. Н. Двигало, И. Ю. Свирид, А. В. Шевченко, А. В. Сокоренко,  
Ю. В. Демянчук

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,  
Петропавловск-Камчатский, 683 006;  
e-mail dvig@kscnet.ru*

## Состояние активных вулканов Северной Камчатки по данным аэрофотосъёмочных облётов и фотограмметрической обработки снимков 2010 г.

Представлены результаты стереофотограмметрической обработки материалов аэрофотосъёмки активных вулканов Северной Камчатки, выполненной 21–22 ноября 2010 г. после многолетнего перерыва. Показана разнообразная динамика практически всех отснятых объектов — от едва заметных колебаний уровня кратерного озера Малого Семячика до гигантского обвала экструзивного купола вулкана Шивелуч.

### Введение

Аэрофотосъёмка вулканов Камчатки, начиная с 70-х годов прошлого столетия до первых трёх лет текущего, являлась основой регулярных дистанционных наблюдений за состоянием действующих и потенциально активных вулканов. Частота съёмки отдельного вулкана определялась поставленной задачей, характером деятельности изучаемого объекта и зависела, в основном, от погодных условий. Благодаря доступности авиации в те годы удавалось снимать вулканы непосредственно перед началом извержения, неоднократно в процессе, и обязательно после окончания событий. В последующие годы, вследствие неизбежного наступления эры рыночных экономических отношений, ситуация с регулярностью дистанционных наблюдений методами аэрофотограмметрии неизменно ухудшалась. Аэрофотосъёмка стала возможной только при совмещении с редкими транспортными рейсами, по большей части к вулканам, расположенным вблизи г. Петропавловска-Камчатского. Чаще всего, примерно один раз в два года, выполнялась съёмка вулканов Авачинский, Корякский, Карымский, Мутновский и Горелый.

Из вулканов Ключевской группы за последние 10 лет удалось выполнить съёмку (также попутными рейсами) только кратерной части Безымянного — в 2006 и в 2009 гг. Причём, работа в режиме совмещённых рейсов не всегда позволяла произвести съёмку в нужный период и с необходимыми расчётными параметрами. Данное обстоятельство снижало качество получаемых материалов и часто существенно усложняло их фотограмметрическую обработку. Плановая съёмка Ключевского не выполнялась ни разу с 1994 г., Шивелуча — с 2003 г.

Впервые в истории Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН целенаправленная топографиче-

ская аэрофотосъёмка активных вулканов Северной Камчатки была осуществлена 21–22 ноября 2010 г.

В эти два дня, за пять часов полёта, с вертолёта Ми-8 была произведена плановая маршрутная аэрофотосъёмка (камерой АФА-ТЭ 140) северной части кальдеры Академии Наук, конуса влк. Карымский, вершины влк. Малый Семячик центральной части кальдеры Узон, конуса влк. Кизимен, влк. Безымянный и зоны основных отложений его пирокластики на восточном склоне. Произведена так же перспективная аэрофотосъёмка по замкнутому маршруту конуса влк. Ключевского и плановая съёмка влк. Молодой Шивелуч.

Кроме перечисленных, в данной работе использованы материалы плановой стереосъёмки кратера вулкана Безымянный, выполненной А. В. Сокоренко 27 июля 2010 г. ручной цифровой камерой Canon EOS 20D. Востребованными оказались также стереопары экструзивного купола вулкана Шивелуч, полученные по нашей просьбе Ю. В. Демянчуком 14 апреля 2010 г. и 25 октября 2010 г. из района пос. Ключи.

Фотограмметрическая обработка снимков полуострова «Новогодний» и кальдеры Узон, полученных 21 ноября 2010 г., не производилась, поскольку заметных изменений в морфологии этих объектов со времени последних наблюдений не выявлено. Совершенно иная ситуация возникла с конусом Ключевского вулкана — он изменился настолько, что нам не удалось идентифицировать на перспективных стереопарах и материалах прежних съёмки достаточное количество общих точек, необходимых в качестве опорных. Фотограмметрическая обработка стереопар Ключевского будет возможна только после их плано-высотной привязки геодезическими методами. Динамика всех остальных отснятых объектов была детально изучена и оказалась

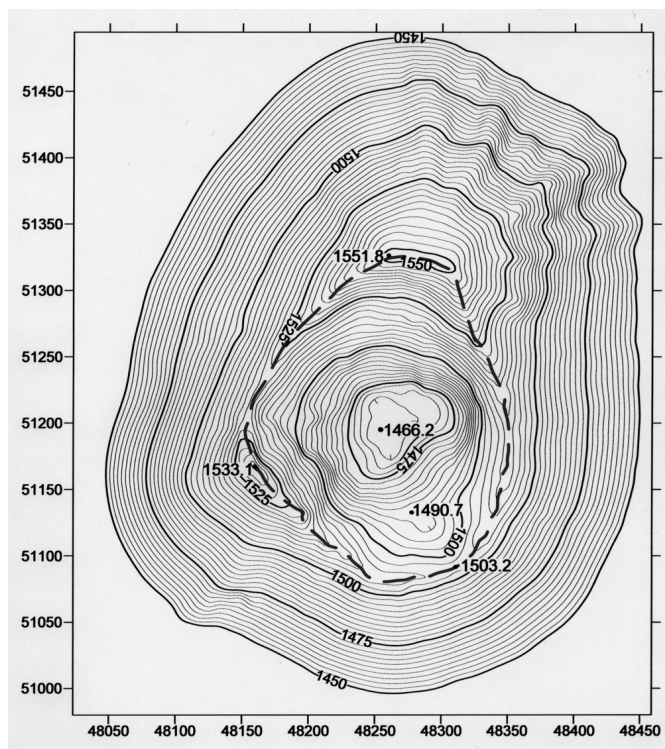


Рис. 1. Рельеф вершины вулкана Карымский 12 июля 2007 г.

очень разной — от едва заметных колебаний уровня кратерного озера Малого Семячика до гигантского обвала экструзивного купола вулкана Шивелуч.

### Вулкан Карымский

Извержение вулкана Карымский продолжается с 1 января 1996 г. уже более 15 лет. Первые 8 лет этого периода происходили умеренной силы эксплозивно-эффузивные извержения, сформировавшие на юго-западном склоне конуса лавовое поле площадью 1,28 км<sup>2</sup> и объёмом 0,035 км<sup>3</sup>.

Все последующие годы, вплоть до настоящего времени, на вулкане отмечаются только эксплозивные извержения. Основным следствием такого характера деятельности вулкана являются изменения рельефа, более всего проявляющиеся в морфологии кратера и верхней половины его конуса.

Предыдущее состояние вершины вулкана аэрофотосъёмкой фиксировалось 12 июня 2007 г. Морфология кратера на эту дату отображена топопланом, представленным на рис. 1. Кратер в тот день имел форму деформированной воронки с наибольшими размерами по гребню 244×199 м и наибольшей глубиной — 85,6 м. Высшая точка вершины конуса, расположенная в северной части гребня, имела отметку 1551,8 м.

К 21 ноября 2010 г. высота вулкана незначительно возросла до 1553,5 м. Его плановые размеры изменились также не очень сильно — до 234×233 м. Тем не менее, морфология вершины вулкана и, особенно, кратер основательно преобразилась (рис. 2).

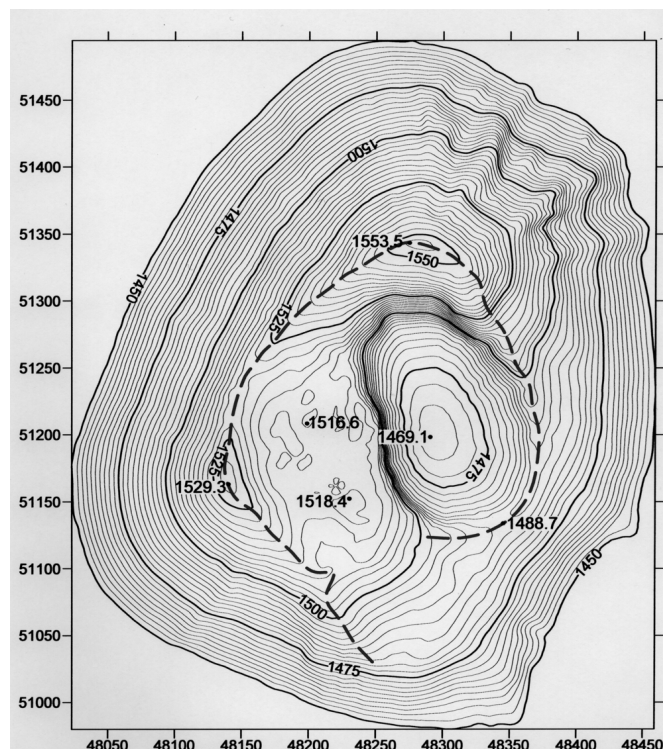


Рис. 2. Рельеф вершины вулкана Карымский 21 ноября 2010 г.

В кратере появилась террасовидная площадка с почти горизонтально расположенной на высоте около 1515 м бугристой поверхностью. Площадка имеет размеры 150×90 м и занимает почти половину юго-восточной части кратера. Высота бортов кратера над этой площадкой различна и меняется от 0 м в южной части, где гребень отсутствует на протяжении 140 м и кратер открыт на юго-восток, до 14 м в западной и до 25 м в северной части площадки. Вся северо-восточную половину кратера занимает эллипсовидная в плане активная воронка с осями 220 и 120 м, с наибольшей глубиной от вершины вулкана — 84,4 м. Глубина воронки от среднего уровня террасовидной площадки — 46 м.

Объяснить такое, ранее не наблюдавшееся строение кратера вулкана Карымский можно, если предположить, что в результате слабых, длительное время продолжавшихся эксплозий, кратер вулкана был сначала заполнен материалом выбросов до уровня 1515 м, а затем, в период временного затишья и оттока магмы, его северо-восточная половина просела, образовав вышеописанный провал. Возможны, конечно, и другие объяснения.

Изменился, также, и рельеф привершинной части склона конуса на юго-востоке от кратера. Здесь в период между съёмками 2007 и 2010 гг. произошло сползание 795 400 м<sup>3</sup> накопившихся отложений пирокластики. Оползень сошёл с участка площадью 73 700 м<sup>2</sup>, расположенного на высотах от 1150 до 1480 м. Частично изменения в рельефе верхней части области оползня можно оценить сопоставляя

конфигурацию горизонталей в правых нижних углах рис. 1 и 2. Вся масса материала оползня отложилась в пределах площади  $96\,450\text{ м}^2$  ниже по склону на высотах от 770 до 958 м.

Всего за время данного цикла извержений на конусе вулкана, в пределах поверхности, расположенной выше 900-ой горизонтали, накопилось  $0,0648\text{ км}^3$  отложений пирокластики. В этом объёме, конечно же, присутствует неизвестное нам количество снега, который слоями может сохраняться под пирокластическими отложениями довольно длительное время. В летние месяцы наличие снежных прослоек только способствует возникновению оползней. Поэтому весь район подножья конуса вулкана Карымский надо считать зоной вполне серьёзной оползневой опасности.

### Вулкан Малый Семячик

Аэрофотограмметрические наблюдения за состоянием кратерного озера вулкана Малый Семячик стали производиться после событий первой половины 80-х — первой половины 90-х гг. прошлого столетия. Именно тогда, впервые на этом вулкане, по аэрофотоснимкам, была выявлена активизация его донной фумаролы [1].

Повышенная активность вулкана проявилась (в 1982–1991 гг.) в резком росте минерализации, температуры и уровня воды озера, в существовании в этот период мощного грифона над активной зоной кратера [3, 4]. В 1992 г. произошёл резкий спад активности, выразившийся в падении уровня и температуры воды вплоть до полного замерзания поверхности озера зимой 1996 г.

Предыдущая аэрофотосъёмка Малого Семячика, также как и Карымского, была выполнена 12 июля 2007 г. Фотограмметрическая обработка снимков дала следующие параметры озера: его площадь составила  $280\,200\text{ м}^2$ , абсолютная отметка уровня воды в Балтийской системе высот — 1171,9 м. Указание на систему высот в данном случае необходимо по той причине, что в 70-е — 90-е годы все геодезические и фотограмметрические измерения на изучаемых объектах Институт вулканологии производил в условных системах координат и условных системах высот. В настоящее время системы координат остались прежние — условные, а высотные составляющие всех наших измерений стали определяться в Балтийской системе высот. На Малом Семячике разница между используемой ранее условной и Балтийской системами высот равна 13,7 м. Именно на эту величину необходимо уменьшать все ранее опубликованные нами данные по уровню озера, чтобы перейти к Балтийской системе высот.

Аэрофотосъёмка, произведённая 21 ноября 2010 г. показала незначительный рост уровня воды (на 0,6 м с 2007 г.) до абсолютной отметки 1172,5 м и площади — до  $285\,900\text{ м}^2$ . Поверхность озера, несмотря на отрицательные температуры конца ноября, совершенно свободна ото льда. Полученные, по этим чрезвычайно редко выполняемым съёмками, данные

позволяют сделать следующий вывод: уровень озера стабилен, его незначительное повышение может быть следствием сезонных колебаний. О температурном режиме озера можно будет судить только по результатам зимних или весенних съёмок.

### Вулкан Кизимен

До 2010 г. Институтом вулканологии ДВО РАН аэрофотосъёмка вулкана Кизимен и прилегающих территорий производилась дважды — 08 августа 1979 г. и 27 июля 1989 г. Съёмка 1979 г. выполнена на пяти параллельных перекрывающихся на 30% маршрутах с высоты 4000 м аэрофотоаппаратом АФА-ТЭ 100 с фокусным расстоянием 98,82 мм. Съёмкой охвачена площадь  $20\times 20\text{ км}$  с постройкой конуса Кизимена в центре. Повторная аэросъёмка 1989 г. выполнена с теми же параметрами, но более совершенным аппаратом ТАФА-10. Данные материалы использовались авторами работы [7], в которой подробнейшим образом представлено структурное положение, геологическое строение и морфология вулкана.

Фотограмметрическая обработка аэроснимков 21 ноября 2010 г. (рис. 3) показала первые пока ещё незначительные изменения в строении вершины вулкана, вызванные его активизацией, и проявившиеся в появлении новых термальных площадок и фумарольных полей. И термальные площадки, дешифрированию границ которых способствовал полутораметровый слой снега, растаявший в их пределах, и новые фумаролы возникли в двух впадинах юго-восточного привершинного участка склона.

Одна из впадин открытая на юго-восток, скорее всего, кратер вулкана Кизимен, возникший некогда в результате взрыва на месте восточной половины вершинного экструзивного купола (рис. 4). Его размеры в плане  $110\times 154\text{ м}$ , наибольшая глубина — 83 м относительно высшей точки купола. Южная термальная площадка образовалась на южном гребне и, возможно, на южной стенке кратера, которая в момент съёмки оказалась закрытой фумарольными газами, выделяющимися из группы новых фумарол. Все фумаролы данного участка компактно расположены вдоль подножья южной стенки кратера на высоте близкой к 2300 м. Видимая область термальной площадки на гребне имеет наибольшие размеры  $25\times 50\text{ м}$  и площадь  $800\text{ м}^2$ .

На заснеженной поверхности северной стенки кратера, в интервале высот от 2317 до 2339 м, виден чёткий ряд отверстий выстроившихся строго по прямой линии длиной 25 м. Линия ориентирована в направлении восток-запад. Самое крупное отверстие имеет размеры  $2\times 4\text{ м}$ . Строго на продолжении этой линии в 100 м от восточного отверстия, на высоте 2264 м, за пределами кратера, ещё одно — диаметром 2 м, образовавшееся, как и все остальные, в результате поступления тепла по наметившемуся здесь разлому.

Второе мощное фумарольное поле и наибольший по площади прогрев поверхности образовались

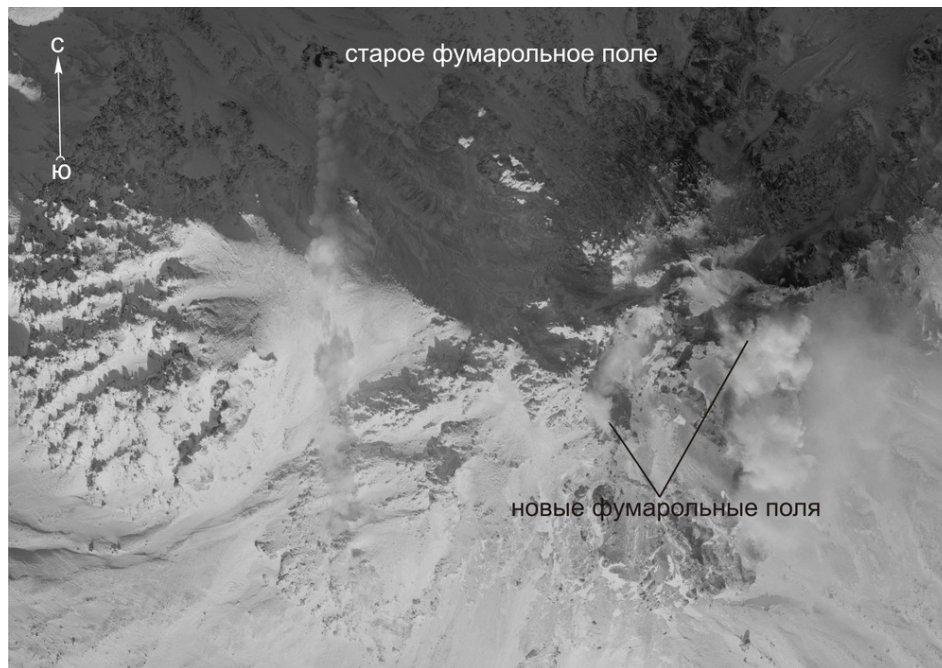


Рис. 3. Плановый аэрофотоснимок вершины вулкана Кизимен 21 ноября 2010 г.

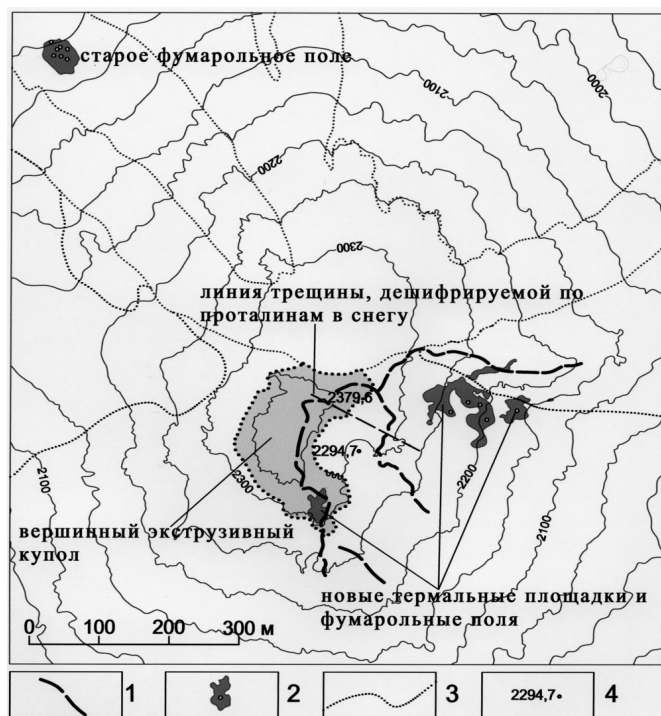


Рис. 4. Строение вершины вулкана Кизимен 21 ноября 2010 г. 1 — границы понижений рельефа вершины, в пределах которых возникли новые фумаролы и термальные площадки; 2 — термальные площадки и фумарольные поля; 3 — контуры лавовых потоков; 4 — абсолютные отметки.

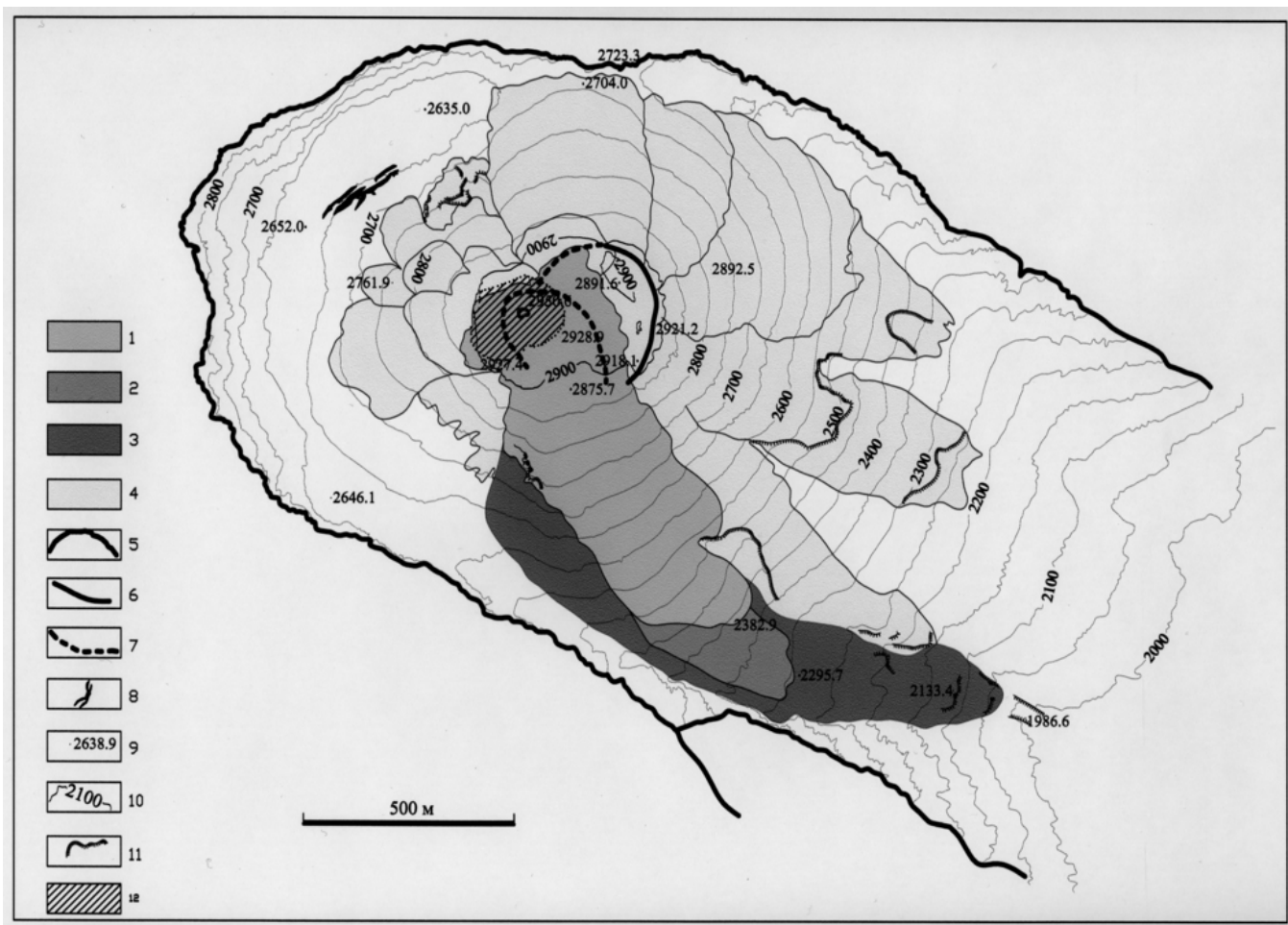
на высотах от 2100 м до 2270 м во впадине, примыкающей к кратеру с северо-востока. Впадина эта возникла в прошлые времена, скорее всего в результате обрушения данного участка склона. К сожалению,

в этой подветренной части вершины, из-за турбулентности атмосферы и завихрения фумарольных газов, зафиксировать точно выходы фумарол оказалось делом невозможным. Однако можно сказать, что расположены они в пределах термальных площадок, отображённых на рис. 4. Общая площадь прогрева поверхности в северо-восточной впадине составила 5440 м<sup>2</sup>. По-видимому, возникновение новых термальных площадок и новых фумарол сопровождалось слабыми эксплозиями. Последствием этих событий является пепел, покрывший вершину вулкана (см. рис. 3).

Старое фумарольное поле, расположенное на термальной площадке (средняя высота — 1953 м и площадь 1850 м<sup>2</sup>) северо-западного склона вулкана, осталось без заметных изменений. Не изменилась существенно и активность его фумарол. Протяжённость видимой части парогазового шлейфа старого фумарольного поля 21 ноября 2010 г. не превысила 200 м.

#### Вулкан Безымянный

Аэрофотосъёмка вулкана Безымянного в 2010 г., как уже отмечено выше, произведена дважды. В июле А. В. Сокоренко получил стереопару кратера, близкую к плановой, ручной цифровой камерой Canon EOS 20D. Повторно, 21 ноября 2010 г. была выполнена маршрутная съёмка (аэрофотоаппарат АФА-ТЭ-140) кратера и зоны основных отложенных пирокластики на восточных склонах вулкана. Двукратная съёмка с интервалом в 4 месяца позволила не только детально исследовать строение купола «Новый», осуществить картографирование и количественную оценку его основных элементов и параметров, но и, впервые за последние два десятилетия, определить общий объём извержен-



**Рис. 5.** План кратера вулкана Безымянный на 21 ноября 2010 г. 1 — лава майского извержения 2010 г.; 2 — лава извержения 16 декабря 2009 г.; 3 — лавовый поток весеннего извержения 2009 г.; 4 — лавовые потоки извержения периода 1995 — 2005 гг.; 5 — контур кратера, возникшего на куполе в 2004 г.; 6 — контур кратера, образовавшегося после 1956 г.; 7 — контур кратера последнего (май 2010 г.) извержения (его гребень перекрыт лавой); 8 — зияющие трещины, возникшие к 2006 г.; 9 — абсолютные отметки; 10 — горизонталы и их высоты; 11 — обрывы; 12 — площадь термоаномалии.

ных в кратер и на восточные склоны вулкана пород купола, и вновь зафиксировать крупные деформации в районе его активного жерла.

Сравнивая современное состояние купола «Новый» с данными детального изучения по аэроснимкам 31 июля 2006 г. [8], можно сказать точно, что, положение его активного жерла, прежде мигрировавшего в пределах вершины, с тех пор в плане не изменилось. Вырос только (на 74 м) уровень поверхности лавы над жерлом. Сохранились, практически в неизменном виде, северный и северо-восточный сектор вершины купола с фрагментами гребней кратеров 2004 г., его западный, северный и северо-восточный склоны, покрытые лавовыми потоками 1995–2006 гг.

Абсолютная высота купола уменьшилась на 30 м и составила 2950,6 м. Уменьшение абсолютной высоты купола произошло только за счёт уничтожения 70-ти метрового обелиска, возвышавшегося в 2006 г. над поверхностью кратера.

Наибольшие изменения произошли в районе южного и юго-восточного сектора вершины и склонов купола. Здесь в период с 2006 г. сформировалось три новых потока лавы, излившихся из одного жерла по единому руслу поверх друг друга (рис. 5). Самый крупный и нижний из потоков, предположительно весеннего извержения 2009 г., покрыл поверхность площадью 374 800 м<sup>2</sup>, имеет протяжённость 1645 м, наибольшую ширину 326 м и объём 7,5 млн. м<sup>3</sup>. По этому потоку, в ходе извержения начавшегося 16 декабря 2009 г., излился второй, у которого видна только прифронтальная область. Большая часть его поверхности перекрыта следующим потоком майского извержения 2010 г. Поэтому параметры второго потока определены приближённо — по наибольшей длине, составившей около 1120 м, предполагаемой ширине не более 245 м, и средней мощности — 14 м, измеренной в пределах видимого участка. Тогда площадь и возможный объём потока соответственно будут близки к 274 400 м<sup>2</sup> и 3,9 млн. м<sup>3</sup>. Третий

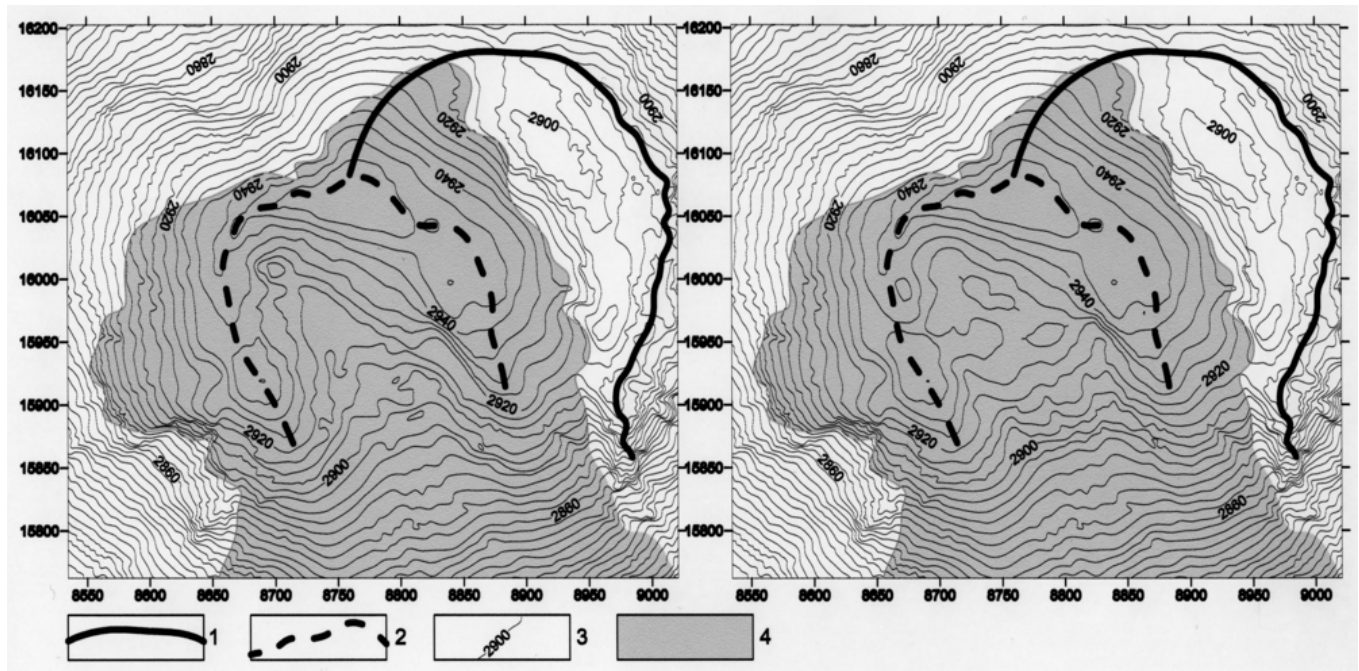


Рис. 6. Фрагменты топопланов вершины купола «Новый», характеризующие изменения рельефа над жерлом вулкана в период с 27,07 по 21 ноября 2010 г. 1 — контур кратера, возникшего на куполе в 2004 г.; 2 — контур кратера последнего (май 2010 г.); 3 — горизонталы и их высоты; 4 — лава майского извержения 2010 г.

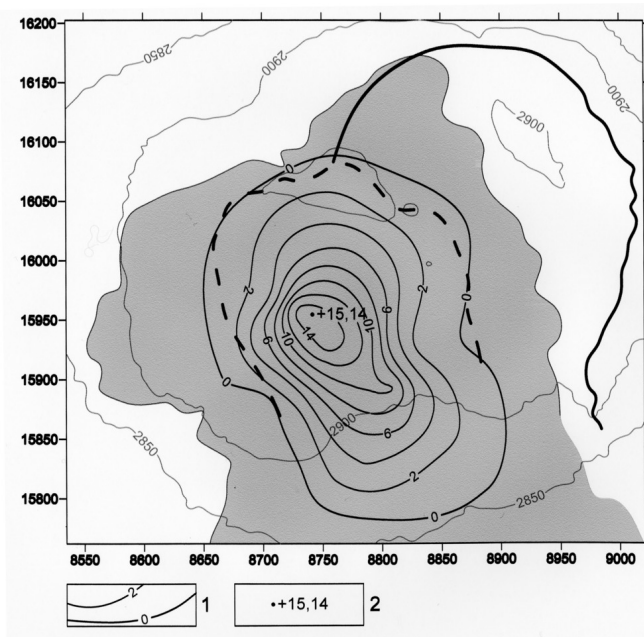


Рис. 7. Область и величины деформаций над активным жерлом Безымянного в изоанабазах. 1 — изоанабаза (проведены через 2 м); 2 — значение и место наибольшего положительного вертикального смещения поверхности лавы.

поток — перекрыл большую часть вершины купола, частично заполнив сохранившиеся фрагменты кратера 2004 г. и излился за пределы действующего кратера в двух почти противоположных направлениях — на юго-восточный и западный склоны

купола. Его параметры: объём составил 4,3 млн. м<sup>3</sup>, площадь — 287 100 м<sup>2</sup>, длина — 980 м и наибольшая ширина — 370 м.

Как и в 2006 г. поверхность лавы в активном кратере к концу майского извержения 2010 г., находясь ещё в пластичном состоянии, основательно просела, чётко обозначив границы открытого на юго-восток кратера. Такая деформация поверхности изливающейся лавы могла произойти как за счёт оттока магмы в подводящем канале, так и за счёт продолжавшегося вытекания в открытую часть кратера. Поскольку, лава переливалась во время извержения через наиболее высокий западный гребень кратера, величина этой просадки должна быть не меньше вертикального расстояния от поверхности лавы на дне кратера до его перекрытых свежей лавой гребней, т. е. не менее 40 м. Примерно такого же порядка «дыхание» лавы в кратерной зоне купола было зафиксировано в 2006 г. [8].

Но, всё же, больший интерес представляют положительные вертикальные деформации лавы, над активным жерлом, выявленные благодаря двукратной съёмке купола с интервалом в 4 месяца. Характер изменений рельефа над жерлом вулкана в этот период, полученный в результате создания и сопоставления цифровых моделей рельефа (ЦМР) на каждую дату, представлен на рис. 6 крупномасштабными планами вершины купола. Разностная картина в изоанабазах, проведённых с интервалом 2 м (рис. 7), отображает более наглядно собственно границы области деформаций, величины положительных вертикальных смещений и зону наибольших смещений поверхности. Деформации прояви-

лись на дне и внутренних стенках кратера, на площади близкой к  $56\,250\text{ м}^2$ . Наибольшее вертикальное смещение —  $15,1\text{ м}$  измерено над районом активного жерла. Деформированная область лавы покрылась сетью новых радиальных трещин и полностью оказалась в зоне обширной термоаномалии, отчётливо выделяющейся проталинами на заснеженной поверхности купола. Площадь термоаномалии, составившая  $32\,700\text{ м}^2$ , обозначена на рис. 5.

Следует отметить, что оба фактора — положительные деформации и термоаномалии в районе жерла — являются неизменными и обязательными признаками начала каждой активизации вулкана Безымянный. Проявляются они с тех пор, как на поверхность его купола стали изливаться лавовые потоки, всегда перекрывающие жерло, т.е. с 1977 г. [3]. Однако о полной готовности вулкана к очередному извержению свидетельствует ещё один внешний показатель, неоднократно наблюдавшийся в течение 2–3-х недель до начала эксплозивного извержения — мощные, периодически повторяющиеся парогазовые продувки, во время которых интенсивная фумарольная деятельность охватывает всю вершину купола. Именно этого предвестника в конце 2010 г. дожидаться не удалось. Очень высокая активность вулканов Ключевской группы в начале осени — к декабрю резко снизилась. Вскоре (09 декабря 2010 г.) началось извержение вулкана Кизимен.

Аэросъёмка восточных склонов Безымянного, очень редко выполняемая в последние два десятилетия, позволила подготовить ЦМР не только на кратер, но и на район поля основных отложенных пирокластических и обвальных лавин. В итоге был определён геологический эффект деятельности Безымянного за период с 19 сентября 1988 г. Объём отложенных в кратере и на восточных склонах пород составил за 22 года —  $0,4433\text{ км}^3$ .

### Вулкан Шивелуч

Дистанционные наблюдения за состоянием кратера Молодого Шивелуча с применением методов аэрофотосъёмки и фотограмметрии регулярно производились Институтом вулканологии ДВО РАН с 1979 по 2003 гг.

Стереопары кратера 1979 и 1980 гг. позволили выявить признаки активизации и нового извержения вулкана, начавшегося в августе 1980 г. [3]. Аэрофотосъёмки 1980–2003 гг. дали детальную картину хода извержения, точные параметры экструзивного купола и его отложений, помогли понять и количественно охарактеризовать особенности различных этапов его формирования [2, 6, 9].

27 октября 2010 г. на вулкане произошли события, которые СМИ интерпретировали как необычное по силе извержение. Вулкан в тот день был закрыт до основания плотной облачностью, поэтому основным фактором, определившим данное событие, явились обильные пеплопады на обширной территории к юго-востоку от вулкана до посёлков Ключи и Усть-Камчатск.

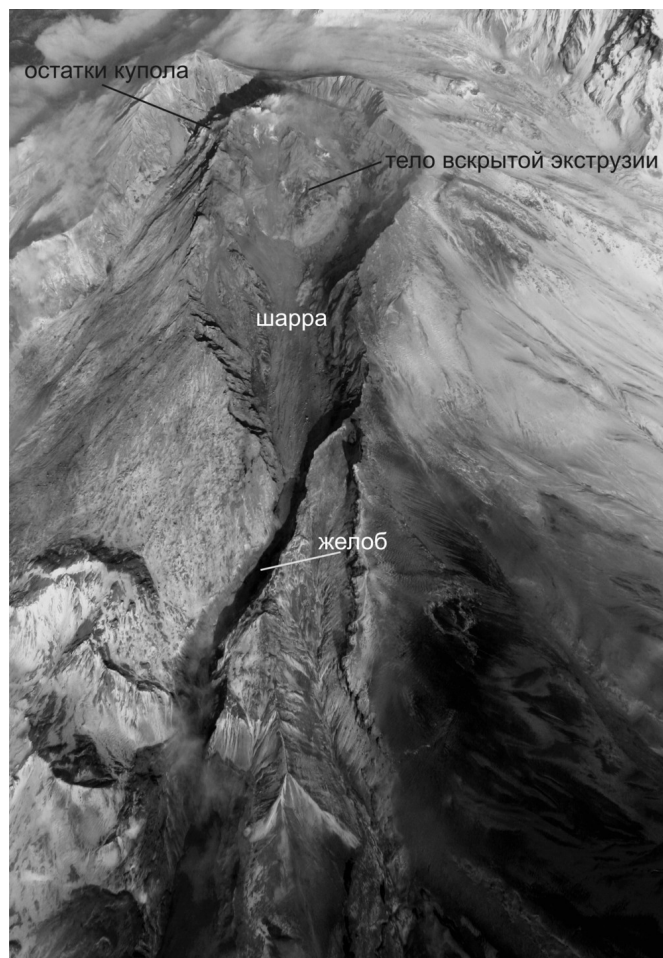
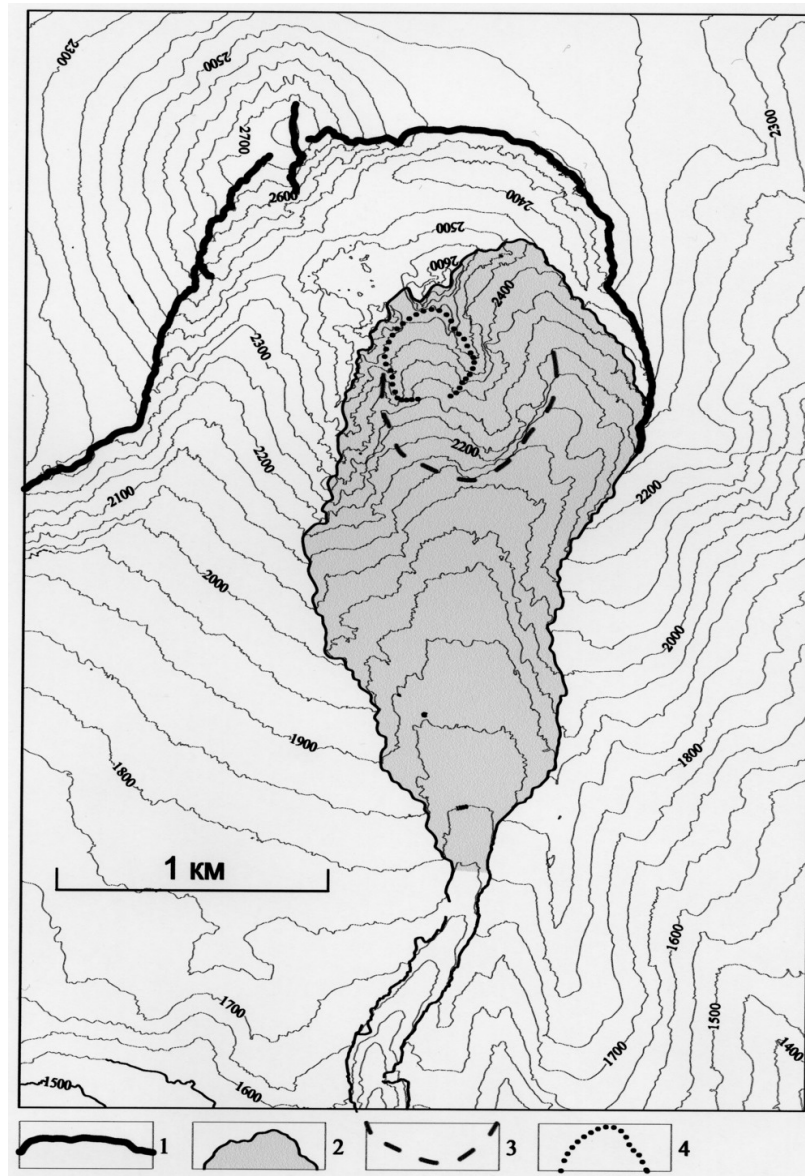


Рис. 8. Молодой Шивелуч 22 ноября 2010 г.

Аэрофотосъёмка Шивелуча, выполненная нами после семилетнего перерыва 22 ноября 2010 г., действительно зафиксировала колоссальные изменения морфологии экструзивного купола и прилегающих территорий (рис. 8), показавшие, что всё-таки основной внешний эффект произошедшим 27 октября 2010 г. событиям был обеспечен скорее не извержением вулкана, а грандиозным обрушением активного экструзивного купола.

Обрушением была охвачена почти половина постройки купола и около  $1/3$  поверхности осыпной мантии его южных склонов, сформированной к этому времени в пределах кратеров Молодого Шивелуча. Корона купола, имевшая ко времени обрушения диаметр близкий к  $700\text{ м}$  и наибольшую высотную отметку  $2740\text{ м}$ , практически полностью исчезла. Незначительные фрагменты короны, в виде отдельных обелисков, остались только в северной и западной частях экструзии. Абсолютная отметка самого высокого обелиска, сохранившегося в северной части купола ко дню аэрофотосъёмки равна  $2687,7\text{ м}$ .

Вместе с короной обрушился весь юго-восточный сектор осыпной мантии, образовав структуру, которую с полным основанием [5] можно назвать —



**Рис. 9.** План купола и шарра Молодого Шивелуча на 22 ноября 2010 г. 1 — контур кратера 1964 г.; 2 — контур шарра и верхней части желоба; 3 — контур основания вскрытого тела экструзии; 4 — контур гребня воронки взрыва.

шарра (рис. 9). Наибольшие размеры шарра в плане составили —  $2455 \times 1084$  м, площадь по верхней кромке —  $1782\,000\text{ м}^2$ . Глубина в северной части — 650 м, в районе устья, около 60 м. Боковые стенки шарра, местами это отвесные обрывы, имеют высоту до 160 м. Почти плоское дно, шириной до 330 м, перекрытое отложениями осыпей, оказалось на уровне поверхности кратеров Шивелуча, возникших после извержения 1964 г.

Наиболее примечательной деталью северной стенки шарра, является вскрытое обрушением тело одной из экструзий купола. По виду это монолитный, вертикально расположенный цилиндр с разрушенной взрывами и обрушением верхней частью. Диаметр цилиндра 657 м. Над осыпями дна шарра вскрытая экструзия возвышается на 473 м. Вершина

экструзии имеет сложное строение. Северо-западную её половину занимает фрагмент открытого на юг крупного воронкообразного углубления с диаметром по гребню — 314 м и наибольшей глубиной — 226 м. На северной стенке этой воронки и вблизи низшей точки её дна (абсолютная отметка — 2312 м) сосредоточено большое количество мелких фумарол. Остальная часть вершины представляет собой поверхность сформированную обрушениями, характер которой вполне отражает топоплан шарра, представленный на рис. 9. Возможно, что причиной произошедших событий стал мощный взрыв или серия взрывов, образовавших данную воронку-кратер, разрушивших вершину экструзии и вызвавших грандиозный обвал купола.



Вся сохранившаяся поверхность по обе стороны шарра покрыта отложениями многочисленных мелкообломочных лавин и грязевых потоков, распространившихся веером на расстояние до 3 км от центра обнажившейся экструзии. Но основной объём материала обрушений был перемещён по барранкосу — жёлобу, возникшему ниже устья шарра в результате выпаживающего действия перемещающегося материала обрушений. Протяжённость этого жёлоба равна 2,2 км. Глубина различается: в районе устья — 57 м, в средней части — 140 м и в конце барранкоса сходит на нет. Ширина также непостоянна и меняется от 95 м до 350 м. Объём жёлоба равен 0,0216 км<sup>3</sup>.

Выше отмечено, что аэрофотосъёмка активного купола вулкана не выполнялась семь лет, в основном — по причине очень высокой стоимости аренды вертолёта Ми-8 — единственного доступного на Камчатке авианесущего средства аэрофотосъёмочной аппаратуры. Это почти непреодолимое препятствие для регулярных аэрофотограмметрических наблюдений побудило нас к переходу на методы наземной стереофотограмметрии.

Задачу дистанционных наблюдений за развитием купола вулкана Шивелуч по наземным снимкам начали решать в 2008 г. В районе пос. Ключи Ю. В. Демянчуком был разбит съёмочный базис длиной 2,5 км, с которого при наиболее благоприятных погодных условиях производилась стереосъёмка вулкана. Съёмка выполнялась камерой Canon EOS 5D Mark II, снабжённой объективом, имеющим постоянное фокусное расстояние 300 мм. Внешнее ориентирование наземных стереомоделей осуществлялось с использованием большого количества опорных точек, определяемых по имеющимся ориентированным аэрофотосъёмочным стереомоделям. Чаще всего, в качестве опорных точек использовались вершины отдельных скал, которых много на Шивелуче и которые легко и точно опознаются как на аэро, так и на наземных снимках. Расстояние от базиса съёмки до экструзивного купола большое — 42 км, тем не менее, точная калибровка камеры, учёт дисторсии объектива и использование цифровых технологий фотограмметрической обработки снимков, позволили строить объёмные модели купола с погрешностями на опорных и контрольных точках не превысившими 2,5 м.

Ближайшая к моменту обрушений стереосъёмка была выполнена Ю. В. Демянчуком 16 августа 2010 г. По стереопаре, полученной в этот день, построена ЦМР поверхности купола, перекрывающая почти полностью весь район обрушений. ЦМР купола и ЦМР поверхности шарра позволили определить точный объём материала, заключённого между ними. Объём обрушившегося материала постройки, вместе с объёмом канала, по которому происходил транспорт материала, составил 0,2764 км<sup>3</sup>, или 636 млн. т. Этот объём в 16 раз превышает объём

катастрофических обрушений, произошедших в 2007 г. в Долине Гейзеров.

Достигнув базиса эрозии в конце транспортного канала, материал обрушений распространился далее по поверхности отложений извержения 1964 г. на расстояние 16 км, частично заполнив русло реки Кабеку в 20 км от вершины экструзивного купола.

Выполнять площадную аэрофотосъёмку отложений обломочной лавины 22 ноября 2010 г. было бесполезно, т.к. уже сформировавшийся снежный покров основательно замаскировал границы отложений и препятствовал опознаванию точек со старых аэросъёмок, которые могли бы использоваться в качестве опорных при построении стереомоделей. Поэтому для оконтуривания отложений был использован снимок, полученный аппаратурой ASTER, установленной на спутнике TERRA<sup>1</sup>. Неизвестно с какой точностью отождествлены контуры отложений на данном снимке, имеющем очень низкое разрешение. Однако площадь изображения отложений в границах этих контуров, после трансформирования и масштабирования снимка (рис. 10), была определена вполне точно и составила в итоге 27,44 км<sup>2</sup>. При такой площади и объёме обрушений, составившем 0,2764 км<sup>3</sup>, средняя мощность поля отложений должна быть немногим более 10 м.

Произошедшие на Шивелуче события позволили прояснить ещё один момент, связанный с формированием экструзивных куполов подобного типа. Вопреки существующему мнению о том, что по мере роста экструзивного купола его корона также увеличивается в диаметре из-за высокой температуры и некоторой пластичности материала экструзии, на Шивелуче в действительности мы наблюдаем обратный процесс. Диаметр вскрытого тела экструзии (657 м) оказался на 30% больше диаметра короны этой же экструзии, который мы смогли определить по наземным снимкам на 16 августа 2010 г. По-видимому это можно объяснить: а) полным отсутствием пластичности лавы выжимаемой экструзии; б) интенсивным растрескиванием и разрушением краёв её короны при выходе на поверхность. Следствием данного процесса являются очень мощные осыпные мантии подобных куполов.

На рис. 11 показаны контуры корон основных экструзий, формировавших купол Молодого Шивелуча в период с 1980 по 2010 гг. Их общий контур вписывается точно в окружность диаметром 1080 м. Из этого можно сделать вывод о диаметре магмоподводящего канала Молодого Шивелуча, который, по крайней мере, на уровне дна северного кратера 1964 г., в среднем должен быть близок к 1000 м.

## Выводы

1. Извержения вулкана Карымский в 2010 г., как и предыдущие шесть лет, имеют чисто эксплозивный характер. Такая деятельность приводит к наибольшим изменениям морфологии кратера и склонов

<sup>1</sup><http://geology.com>



**Рис. 10.** Поле отложений обломочной лавины, возникшей в результате обрушения экструзивного купола 27 октября 2010 г.

конуса. За весь период последнего цикла извержений на конусе вулкана выше 900-й горизонтали накопилось  $0,065 \text{ км}^3$  пирокластики, начинённой прослоями снега. В летнее время наличие снежных прослоек приводит к возникновению оползней. Весь район подножья конуса вулкана Карымский является зоной серьёзной оползневой опасности.

2. Длительные наблюдения за состоянием кра-терного озера Малого Семячика, позволяют сделать

вывод о том, что в 2010 г. явной активности вулкан не проявляет. Уровень озера (1172,5 м) практически стабилен, за последние три года вырос в среднем на 0,6 м, что не превышает величины выявленных ранее сезонных колебаний.

3. Аэрофотосъёмка вершины вулкана Кизи-мен 21 ноября 2010 г. зафиксировала следы первых внешних проявлений начавшегося извержения: термальные площадки, новые фумарольные поля,



**Рис. 11.** Зона внедрения экструзий в активном кратере вулкана Шивелуч. 1 — контур активного кратера; 2 — контур шарра; 3 — контур обнажившегося после обрушений тела экструзии; 4 — контуры корон основных экструзий 1980–2010 гг. 5 — зона внедрения экструзий.

косвенный признак образующихся трещин и отложения первых выбросов пепла.

4. Двукратная аэросъёмка купола «Новый» позволила ещё раз убедиться в неизбежности положительных деформаций лавовой пробки над активным жерлом вулкана при подготовке к каждому следующему извержению. Максимальное измеренное значение вертикальных смещений поверхности лавы в кратере к 21 ноября 2010 г. равно 15,1 м. Средняя продуктивность вулкана в последние 22 года составила 20,1 млн. м<sup>3</sup>/год.

5. Аэрофотосъёмка Молодого Шивелуча выявила и помогла точно оценить последствия грандиозно-

го обвала нового экструзивного купола вулкана, произошедшего 27 октября 2010 г. Обвалившийся объём пород купола составил 0,2764 км<sup>3</sup>, их общий вес 636 млн. т., что в 16 раз превышает объём материала обрушений 2007 г. в Долине Геизеров.

#### Список литературы

1. Гавриленко Г. М., Двигало В. Н., Фазлуллин С. М., Иванов В. В. Современное состояние вулкана Малый Семьячик (Камчатка) // Вулканология и сейсмология, № 2, 1993, С. 3–73.
2. Двигало В. Н. Рост купола в кратере вулкана Шивелуч в 1980–1981 гг. // Вулканология и сейсмология, № 2, 1984, С. 104–109.
3. Двигало В. Н. Морфологические предвестники (первые признаки) активизации некоторых вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология, № 4, 2000, С. 3–20.
4. Двигало В. Н., Андреев В. И., Гавриленко Г. М., Овсянников А. А., Разина А. А., Чирков А. М. Деятельность вулканов Юго-Восточной Камчатки и Северных Курил в 1985–1986 гг. // Вулканология и сейсмология, № 3, 1988, С. 13–23.
5. Двигало В. Н., Мелекесцев И. В. Крупные современные обвалы на конусе вулкана Ключевской по результатам ревизии последствий событий 1944–1945 и 1984–1985 гг.) // Вулканология и сейсмология, № 1, 2000, С. 3–17.
6. Мелекесцев И. В., Двигало В. Н., Кирсанова Т. П., Пономарёва В. В., Певзнер М. М. 300 лет жизни камчатских вулканов: молодой Шивелуч (анализ динамики и последствий эруптивной активности в XVII — XX вв.) Часть II. 1964–1994 гг. // Вулканология и сейсмология, № 1, 2004, С. 5–24.
7. Мелекесцев И. В., Пономарева В. В., Волынец О. Н. Вулкан Кизимен (Камчатка) — будущий Сент-Хеленс? // Вулканология и сейсмология, № 4, 1992, С. 3–32.
8. Свирид И. Ю., Шевченко А. В., Двигало В. Н. Морфология кратера вулкана Безымянный по данным аэрофотограмметрических наблюдений 2006 г. // Сб. материалов ежегодной конференции, посвящённой дню вулканолога. Издательство ИВиС ДВО РАН, 28–31 марта 2007 г., стр. 95–100.
9. Федотов С. А., Жаринов Н. А., Двигало В. Н., Селивёрстов Н. И., Хубуная С. А. Эруптивный цикл вулкана Шивелуч в 2001 — 2004 гг. // Вулканология и сейсмология, № 6, 2004, С. 3–14.