

**ИЗВЕРЖЕНИЕ 2010–2012 гг. ВУЛКАНА КИЗИМЕН –
САМОЕ ПРОДУКТИВНОЕ
(ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ)
НА КАМЧАТКЕ В НАЧАЛЕ XXI ВЕКА.
ЧАСТЬ I. Этап 11.11.2010–11.12.2011 гг.**

© 2013 г. В. Н. Двигало, И. В. Мелекесцев, А. В. Шевченко, И. Ю. Свирид

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

Поступила в редакцию 30.10.2012 г.

Приведены результаты детального анализа аэрофотоснимков и космических изображений района вулкана Кизимен, характеризующие геолого-геоморфологический эффект последствий его продолжающегося извержения в 2010–2011 гг. Показано, что по общему объему ($>0.5 \text{ км}^3$) и массе ($>10^9 \text{ т}$) изверженного (резургентного + ювенильного) вещества оно – самое продуктивное на Камчатке за первые 12 лет XXI века. Доминирует ($>90\%$) ювенильный материал, отвечающий по составу андезитам. На долю пирокластики (тефра, отложения ювенильных пирокластических лавин и раскаленных обломочных лавин) приходится $>0.3 \text{ км}^3$ и $>0.45 \times 10^9 \text{ т}$ лав (очень мощный глыбовый лавовый поток длиной 3.052 км и площадью 2.163 км^2) – около 0.195 км^3 и $0.45 \times 10^9 \text{ т}$. За исключением тефры, выпавшей на площади порядка 100 тыс. км², весь остальной материал был аккумулирован на конусе вулкана Кизимен и у его подножия. Средняя интенсивность выноса ювенильного вещества составила за 13 месяцев (11.11.2010–11.12.2011 гг.) около $15 \text{ м}^3/\text{с}$ (29 т/с). Заметные изменения произошли и в привершинной части конуса вулкана.

DOI: 10.7868/S0203030613060023

**МОРФОЛОГИЯ, СТРУКТУРНОЕ
ПОЛОЖЕНИЕ И ИСТОРИЯ
ИЗУЧЕНИЯ ВУЛКАНА**

Действующий вулкан Кизимен ($55^{\circ}08' \text{ с.ш.}$, $160^{\circ}19' \text{ в.д.}$, абс. высота – 2376 м в 1972 г.) – сложнопостроенная форма рельефа (рис. 1), не имеющая по своей морфологии точного аналога среди других вулканических образований в пределах Курило-Камчатской области. Верхняя и средняя части постройки вулкана образованы комбинацией из разных по размеру, степени сохранности, возрасту и составу лавовых потоков и экструзивных куполов с мощными агломератовыми мантиями. В строении подножия вулкана ведущая роль принадлежит крутонаклонным ($8\text{--}10^{\circ}$) равнинам, сложенным обвальными-взрывными толщами, и обширным, пологонаклонным ($2\text{--}5^{\circ}$) равнинам пирокластических потоков. Вскрытая мощность обвальными-взрывных толщ и пирокластических отложений достигает в разных местах от 40 до 170 м [Мелекесцев и др., 1992].

Однако по размерам Кизимен типичен для действующих вулканов Камчатки. Площадь его основания вместе с равнинами подножия – около 120 км^2 . Относительная высота постройки над руслом р. Левая Шапина – 1950–2000 м. Крутизна склонов конуса в средней и верхней частях – $30\text{--}40^{\circ}$. Суммарный объем постройки, включая отложения равнин подножий, около 25 км^3 .

Вулкан Кизимен располагается на восточном борту Шапинского грабена и приурочен к системе крупноамплитудных сбросов северо-восточного простирания зоны сочленения этого грабена с горстом хребта Тумрок (рис. 2). Фундаментом вулкана служат вулканогенные и вулканогенно-осадочные породы верхнемиоценовой шапинской свиты, а также вулканы тумрокского комплекса верхнеплиоцен-плейстоценового возраста [Шанцер и др., 1969; Мелекесцев и др., 1992]. Предполагается, что кровля этого фундамента (по структурным построениям И.В. Мелекесцева) находится на абсолютной отметке от 200 до

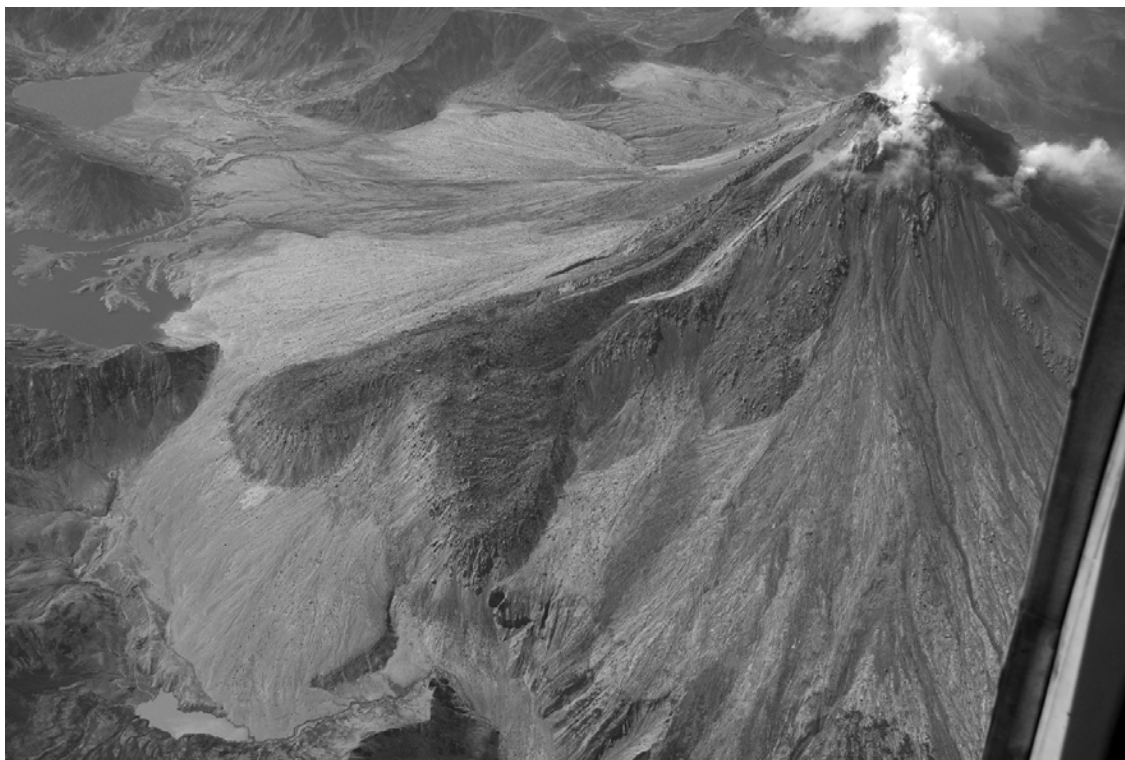


Рис. 1. Извергающийся вулкан Кизимен 14.07.2012 г. Вид с ССВ.

На среднем плане – двухлопастной лавовый поток 2011–2012 гг. Склоны конуса полностью перекрыты пирокластикой текущего извержения, у подножия – пирокластические равнины. Вверху слева – оз. Теплякова, ниже – новые подрудные озера. Фото А.А. Овсянникова.

300 м [Мелекесцев и др., 1992], а высота современной постройки вулкана, следовательно, превышает 2000 м.

Район Шапинского грабена вместе с примыкающими участками лавовых плато в пределах Центральной Камчатской депрессии и горста хребта Тумрок – один из самых активных в сеймотектоническом отношении. Свидетельство этого – густая сеть разрывных тектонических и сеймотектонических нарушений разных типов и возраста, вплоть до голоценовых. Серии сильных коровых землетрясений неоднократно происходили здесь [Гарбузова, Соболевская, 2008] и в историческое время (XVIII–XXI вв.). Разбита многочисленными разрывными нарушениями и сама постройка вулкана Кизимен [Мелекесцев и др., 1992].

Вулкан Кизимен возник на границе позднего плейстоцена и раннего голоцена 12–11 тыс. лет назад. На основе реконструкции истории развития вулкана был предложен прогноз дальнейшей его активности [Мелекесцев и др., 1992]. Первые общие сведения о морфологии и геологическом

строении вулкана были получены Б.И. Пийпом, исследовавшим его летом 1943 г. [Пийп, 19466]. Позднее вулкан изучался и другими учеными [Шанцер и др, 1969, 1973, 1991; Churikova et al., 2007]. Ими были приведены данные о химическом составе лавовых потоков, а также установлено наличие лав андезибазальтового состава.

К действующим вулканам Кизимен был отнесен К. Дитмаром, наблюдавшим на нем в августе 1852 г. с расстояния 70 км фумарольную активность, которая, по свидетельству жителей близлежащих поселений, продолжалась к тому времени приблизительно 25 лет [Дитмар, 2009].

Первые данные о составе фумарольных газов на вулкане Кизимен были получены в 1978–1979 гг. [Кирсанова и др., 1983]. Тогда же была измерена температура (220–240°C) и скорость истечения газов (более 100 м/с) из “ревушей” фумаролы. В 2009 г. измеренные температуры фумарольных газов варьировались от 171 до 340°C [Тембрел, Овсянников, 2009].

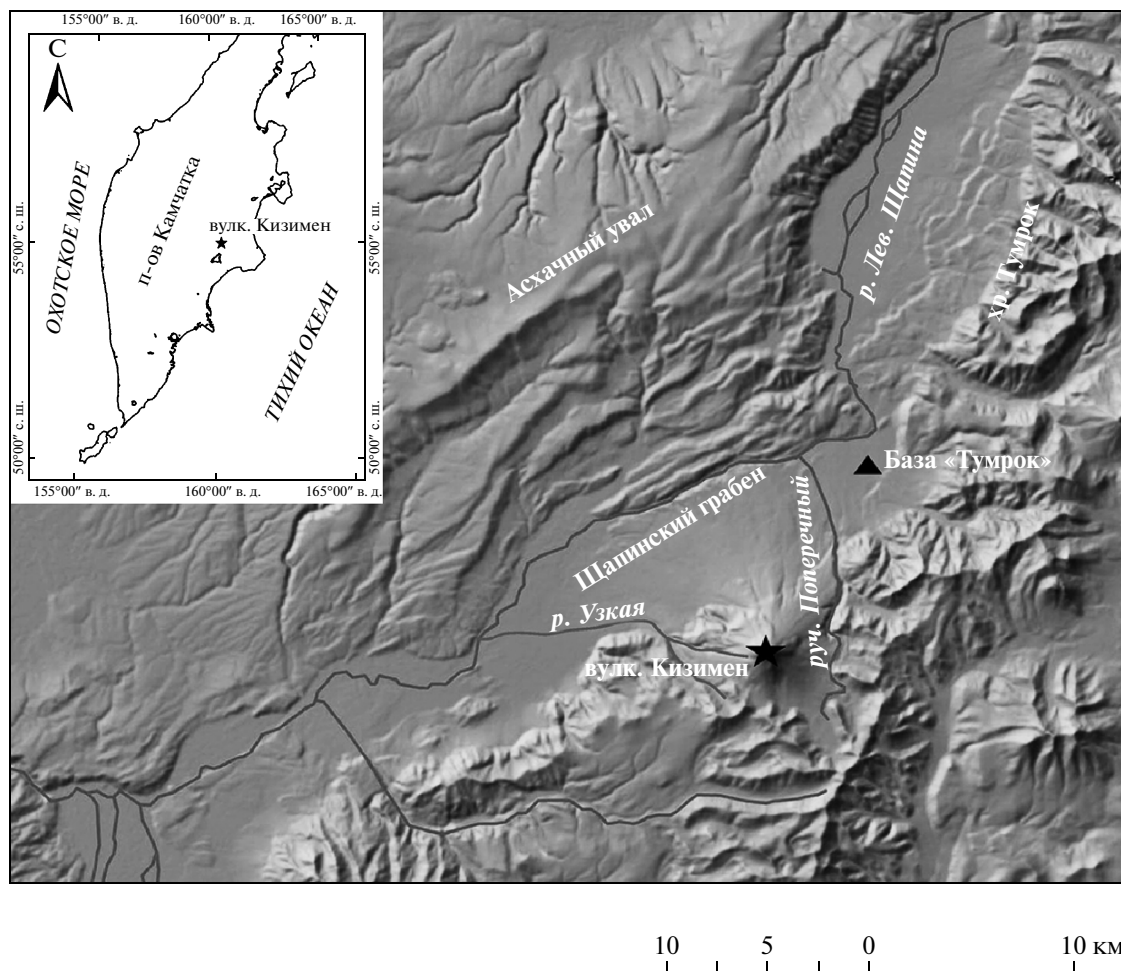


Рис. 2. Схема расположения вулкана Кизимен.

Видны многочисленные, выраженные в рельефе, разрывные нарушения плейстоцен-голоценового возраста.

Гораздо меньше “повезло” вулкану Кизимен в непосредственном полевом исследовании самих последствий его извержений. Самое раннее историческое извержение вулкана в 1928–1929 гг. никто из геологов и вулканологов не наблюдал и продукты его не изучал. Противоречивые сведения об этом извержении получены от жителей селений, расположенных на значительном удалении от вулкана. Побывав на вулкане Кизимен в 1943 г., Б.И. Пийп явных следов произошедшего извержения уже не обнаружил. Не смог он детально изучить и вершину вулкана, где хотел найти кратер, который там так и не увидел: “Пересечь всю вершину не было возможности, но с западного края вершинного лавового поля было видно, что вершина занята только сплошным нагромождением лавы, которая многими рукавами переливалась отсюда на склоны” [Пийп, 1946б, с. 31]. Судя по

приведенному описанию, Б.И. Пийп, по нашему мнению, оказался на самом молодом поле андези-базальтовых лавовых потоков, излившихся из бочки современной северной вершины вулкана [Мелекесцев и др., 1992]. Открытый на восток кратер в юго-восточной части вершины вулкана Кизимен, вероятно, он не мог наблюдать, поскольку находился практически на противоположной стороне от него. Этот кратер четко дешифрируется на аэрофотоснимках 1950, 1979 и 1989 гг. Вполне возможно, что именно он и был центром извержения 1928–1929 гг. Данных о типе изверженных пород, их составе и объеме Б.И. Пийп не привел.

Основываясь на своих наблюдениях и сведениях, полученных от местных жителей, видевших извержение 1928–1929 гг., Б.И. Пийп [Пийп, 1946б] предположил, что оно было умеренным, а его эруптивный центр был, все-таки, приурочен к вершине

вулкана, а не к тому месту, где сейчас располагаются активные сольфатары.

После 1929 г., до первой половины 2009 г., активность вулкана Кизимен проявлялась лишь в фумарольной деятельности на его северо-западном склоне, которая то усиливалась, то ослабевала. Неоднократно происходившие серии местных землетрясений [Гарбузова, Соболевская, 2008] к извержению не приводили.

Подготовка текущего извержения вулкана Кизимен началась с проявления сейсмических событий летом 2009 г. [Сенюков и др., 2011б]. В работе Дрознина с соавторами [Дрознин и др., 2011] предлагается считать началом извержения 11.11.2010 г., когда произошел взрыв (или резко усилилась фумарольная активность в кратере вулкана), а парагазовое облако с примесью пепла поднялось на высоту 1.5 км над вершиной вулкана. Следы этой и последующей активизации удалось наблюдать 21.11.2010 г. В.Н. Двига́ло. [Двига́ло и др., 2011], который участвовал в облете вулкана Кизимен и выполнил плановую аэрофотосъемку. Фотограмметрическая обработка аэрофотоснимков показала первые, еще незначительные, изменения в строении вершины вулкана, вызванные его активизацией, и проявившейся в появлении новых термальных площадок и фумарольных полей [Двига́ло и др., 2011]. Температура этих фумарол превышала 130°C [Дрознин и др., 2011].

Сведения о характере деятельности вулкана в интервале времени от 22 ноября по 9 декабря 2010 г. отсутствуют, так как из-за плохой погоды вулкан был недоступен для визуальных и спутниковых наблюдений.

09.12.2010 г. появились сейсмические сигналы, которые могли свидетельствовать о газовых взрывах и обломочных лавинах [Сенюков и др., 2011а]. Понять, что происходит на вулкане, удалось благодаря фотографии, сделанной 10.12.2010 г. канадским геофизиком Д. Пейджем (Don Page) с борта пролетавшего вблизи от вулкана авиалайнера. На снимке (http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/current/kzm/dPage_101210.jpg), по предположению И.В. Мелекесцева, зафиксирован сход с вершины вулкана к его подножию либо раскаленной обломочной лавины, либо ювенильной пирокластической лавины, с высоко поднимающимся над ними парагазовым облаком с пеплом.

К настоящему времени (конец августа 2012 г.) извержение вулкана Кизимен непрерывно продолжается уже свыше 20 месяцев (11.11.2010–15.08.2012 гг.). За это время плановой топографи-

ческой аэрофотосъемкой состояние вулкана фиксировалось трижды: 21.11.2010 г. — при появлении первых внешних признаков его активизации, 11.12.2011 г., более чем через год его интенсивной деятельности, и 14.07.2012 г.

Между 21.11.2010 и 11.12.2011 гг., благодаря содействию Д.В. Мельникова (ИВиС ДВО РАН) и сотрудника Аляскинской вулканологической обсерватории Рика Вессела, была получена стереопара снимков со спутника ASTER от 05.09.2011 г., имеющих низкое пространственное разрешение, но за отсутствием других данных, позволившая выполнить самые первые количественные оценки происходивших событий.

Организованная ИВиС ДВО РАН удачная крупномасштабная аэрофотосъемка вулкана, проведенная 11.12.2011 г. (это был единственный день декабря, когда лавовый поток оказался открытым полностью), дала необходимый материал для достоверной оценки реального геолого-геоморфологического эффекта и последствий, произошедших к этому времени на Кизимене событий.

Съемка выполнена с вертолета Ми-8 (аэрофотоаппарат АФА-ТЭ140, высота полета 3800 м) на двух маршрутах, которыми была охвачена площадь распространения главных типов отложений изверженных продуктов. Обработка всех аэроснимков произведена с применением цифровой фотограмметрической системы РНОТОМОД-4.3.610. В результате получены объемные ориентированные стерео- и цифровые модели рельефа вулкана, топографические карты разного масштаба, планы и профили местности, выполнены количественные определения. Модель подстилающей поверхности, относительно которой определялись объемы и мощности отложений, строилась по архивным аэроснимкам 27.07.1989 г. Планово-высотная подготовка аэроснимков осуществлена в результате блочной фототриангуляции с использованием координат (заданных в условной системе) наиболее надежно опознанных точек (с подписанными отметками) карты масштаба 1 : 25000.

Материалы последней аэрофотосъемки, выполненной И.Ю. Свиридом 14.07.2012 г., находятся в стадии фотограмметрической обработки и в данной статье не используются. Они будут представлены в Части II статьи, посвященной описанию финального этапа извержения, оценке его суммарного геолого-геоморфологического эффекта и экологических последствий.

ИЗМЕНЕНИЕ МОРФОЛОГИИ ПРИВЕРШИННОЙ ЧАСТИ КОНУСА ВУЛКАНА В НАЧАЛЬНОЙ ФАЗЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ

Фотограмметрическая обработка аэроснимков 21.11.2010 г. показала первые, еще незначительные, изменения в строении вершины вулкана, вызванные его активизацией, и проявившиеся в появлении новых термальных площадок и фумарольных полей (рис. 3). Термальные площадки, дешифрированию границ которых способствовал полутораметровый слой снега, растаявший в их пределах, и новые фумаролы возникли в двух циркообразных впадинах ЮВ привершинного участка склона.

Впадина, открытая на ЮЮВ, скорее всего, является кратером вулкана Кизимен, возникшим, по нашему мнению, предположительно в 1928–1929 гг., в результате взрыва на месте восточной половины самого молодого вершинного экструзивного купола. Размеры кратера в плане 110×154 м, наибольшая глубина – 85 м относительно высшей точки купола. Южная термальная площадка образовалась на южном гребне и, возможно, на южной стенке кратера, которая в момент съемки оказалась закрытой фумарольными газами, выделяющимися из группы новых фумарол. Все фумаролы данного участка компактно расположены вдоль подножия южной стенки кратера на абсолютной высоте, близкой к 2300 м. Видимая область термальной площадки на гребне имеет наибольшие размеры 25×50 м и площадь 800 м^2 .

На заснеженной поверхности северной стенки кратера, в интервале высот от 2317 до 2339 м, виден четкий ряд отверстий, выстроившихся строго по прямой линии длиной 25 м. Линия ориентирована в направлении восток-запад. Самое крупное отверстие имеет размеры 2×4 м. Строго на продолжении этой линии, в 100 м от восточного отверстия, на высоте 2264 м, за пределами кратера, еще одно – диаметром 2 м, образовавшееся, как и все остальные, в результате деформаций вершины и поступления тепла по наметившейся здесь трещине.

Второе мощное фумарольное поле и наибольший по площади прогрев поверхности образовались на высотах от 2100 м до 2270 м во впадине, примыкающей к кратеру с СВ. Впадина эта появилась в прошлые времена, вероятнее всего, в результате обрушения данного участка склона. К сожалению, в этой подветренной части вершины, из-за турбулентности атмосферы и завихрения фумарольных газов, зафиксиро-

вать точно выходы фумарол оказалось невозможно. Однако можно утверждать, что расположены они в пределах термальных площадок, отображенных на рис. 3. Общая площадь прогрева поверхности в северо-восточной впадине составила 5440 м^2 . По-видимому, возникновение новых термальных площадок и новых фумарол сопровождалось слабыми эксплозиями с выбросами резургентного пепла, покрывшего вершину вулкана.

Старое фумарольное поле и мощные фумаролы, расположенные (см. рис. 3) на термальной площадке (средняя высота – 1953 м, площадь – 1850 м^2) северо-западного склона вулкана, которые были известны с начала XIX в., остались без заметных изменений. Не изменилась существенно и активность фумарол. Протяженность видимой части парогазового шлейфа от старого фумарольного поля 21.11.2010 г. не превысила 200 м.

ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛЯ ЮВЕНИЛЬНЫХ ПИРОКЛАСТИЧЕСКИХ И ОБВАЛЬНЫХ ЛАВИН

Первый четко обозначенный этап извержения (декабрь 2010–март 2011 гг.) вулкана Кизимен был характерен выносом большого количества пирокластики с образованием крупных ювенильных пирокластических лавин. Многочисленными были и грубообломочные лавины, в том числе и раскаленные, возможно преобладавшие.

Термин “раскаленная обломочная лавина” применен здесь, согласно [Мельников и др., 2011], для перемещающихся преимущественно под действием силы тяжести порций разного объема высоко нагретого обломочного материала, который образуется при разрушении растущих экструзивных куполов и прикратерных частей извергающихся вулканов. Следует добавить, что аналогичные процессы образования раскаленных лавин на вулкане Кизимен происходят и при разрушении лавового потока, движущегося по крутым склонам постройки. Обычные грубообломочные лавины возникали здесь при обваливании блоков уже остывших пород привершинной части вулкана Кизимен и особенно остатков экструзивного купола его более раннего извержения.

Термин “ювенильная пирокластическая лавина” является, по сути дела, аналогом термина Б.И. Пийпа [Пийп, 1946а] – “раскаленный агломератовый поток”. Б.И. Пийп использовал его для относительно слабо насыщенного газом, уже

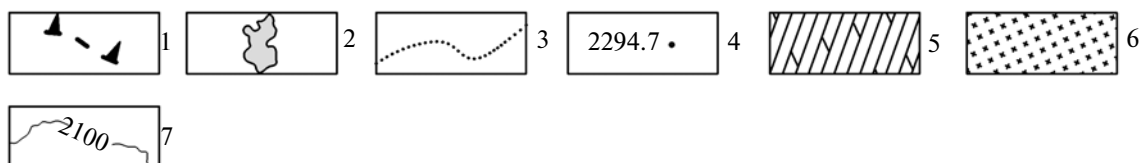
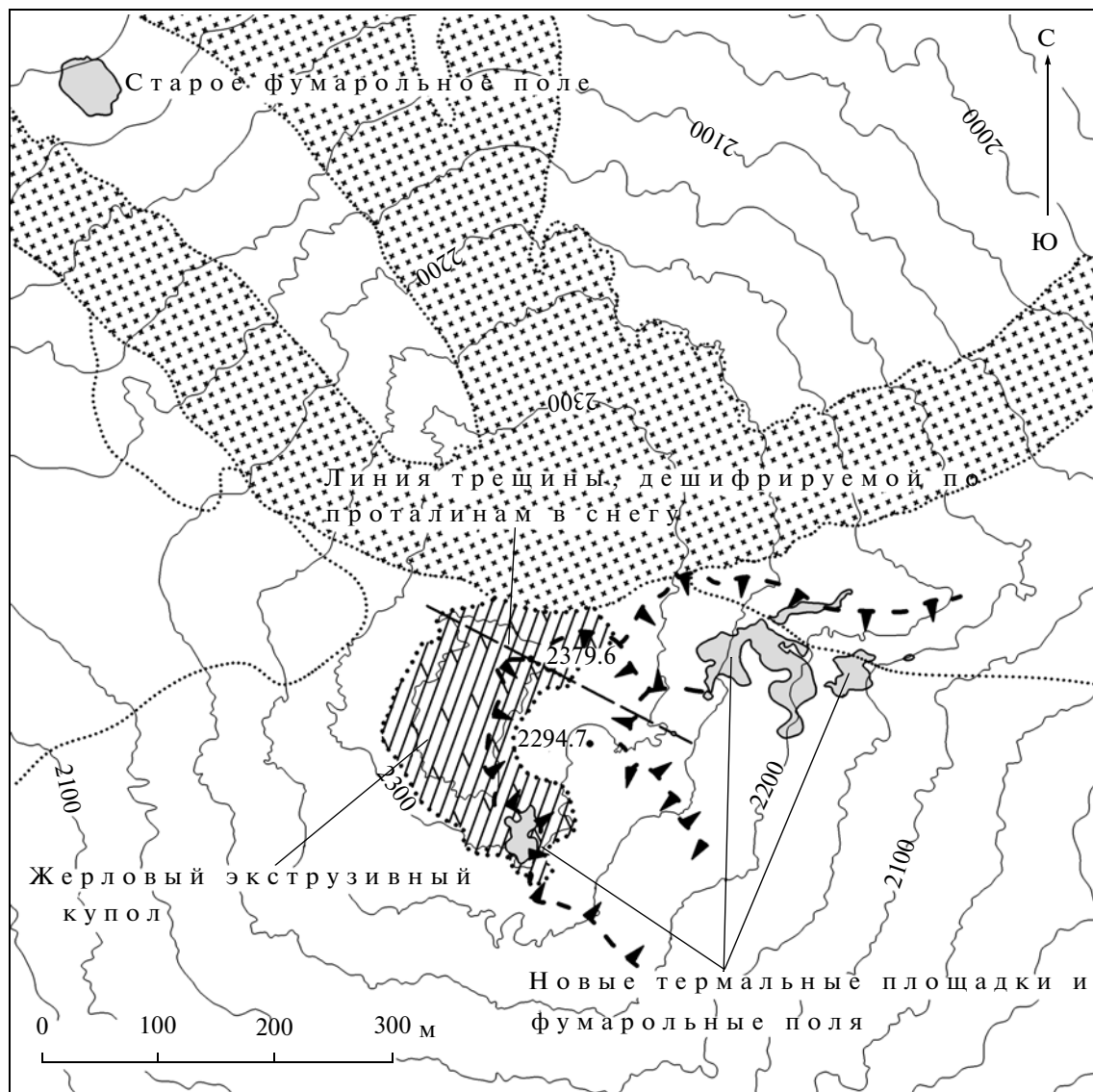


Рис. 3. Строение вершины вулкана Кизимен 21 ноября 2010 г.

1 – бровки циркоподобных понижений рельефа вершины, в пределах которых возникли новые фумаролы и термальные площадки; 2 – термальные площадки и фумарольные поля; 3 – контуры андезитовых лавовых потоков цикла КЗП [Мелекесцев и др., 1992]; 4 – абсолютные отметки; 5 – вершинный экструзивный купол; 6 – андезибазальтовые лавовые потоки цикла КЗIV; 7 – горизонталь и их отметки (м).

дезинтегрированной в подводящем канале вулкана, ювенильной пироклаستي, пульсационно извергаемой при низком газовом давлении и относительно небольшой (десятки-сотни т/с) интенсивности ее выноса, которая как бы “переливается” через край кратера и перемещается вниз по склону конуса вулкана, тоже преимущественно под действием силы тяжести, как обычная лавина. По этим параметрам механизмы формирования ювенильных пирокластических лавин и классических пирокластических потоков [Горшков, Богдавленская, 1965; и др.] резко различаются. У последних материалом служит газозвесь, выбрасываемая с гигантской скоростью (сотни м/с) при очень высоком (сотни бар) газовом давлении, а интенсивность выноса вещества составляет десятки и сотни тысяч тонн в секунду. При этом изверженный материал перемещается по земной поверхности с громадной скоростью (до 100–150 км/час) на газовой подушке, скатываясь со склонов круче 2–3°.

Быстрое движение материала ювенильных пирокластических и обломочных лавин сопровождается возникновением над их поверхностью высоко поднимающихся парагазо-пылевых облаков – у ювенильных пирокластических лавин, и насыщенных пылью паровых облаков – у раскаленных обломочных лавин. Наибольшей высоты (>1 км) такие облака достигают при перемещении материала лавин по сильно обводненным или покрытым снегом поверхностям, как это происходило и происходит на склонах у подножия вулкана Кизимен в ходе его текущего извержения. Газ поступал при продолжающейся дегазации ювенильного материала пирокластических лавин, пар – в результате испарения поверхностной воды. Твердый материал облаков – захваченные и поднятые газом и паром вверх тонкие фракции (алевропелит + песок) отложений пирокластических и обломочных лавин. Возникшие подобным образом парагазо-пылевые и паропылевые облака существуют значительно дольше движущихся обычно несколько минут лавин, так как далеко относятся ветром, а выпадающий из них твердый материал может отлагаться на расстоянии нескольких километров от места прохождения лавин.

Поскольку в ходе длительного извержения вулкана Кизимен таких лавин было очень много, а ветер дул в самых разнообразных направлениях, то практически сплошной чехол отложений подобного генезиса наряду с тефрой покрывает не только всю постройку вулкана, но и сопредельные участки. Точная мощность чехла пока не определена. Очень ориентировочно, по

аналогии с другими вулканами с похожими извержениями, она может варьировать от нескольких сантиметров до 5–10 м [Дегтерев, 2011; и др.].

Главная же масса материала пирокластических и обломочных лавин образовала в нижней части склонов вулкана и у его подножия многопорционный комплекс наклонных равнин (рис. 4, 5). Каждый крупный фрагмент такой равнины состоит из большого количества слившихся между собой и перекрывающих друг друга конусов выноса разного размера, в зависимости от объема слагающих их индивидуальных порций перемещенного вещества. Для всех конусов характерна выпуклая форма поверхности.

Наибольшие объемы выброшенной пирокластики, создавшей этот комплекс форм, относились к кульминации эксплозивной активности вулкана Кизимен, которая пришлась на вторую половину декабря 2010 г. – первую половину января 2011 г. Характерной особенностью извержения в это время были сильные взрывы с весьма протяженными (≥ 500 км) эруптивными облаками, которые распространялись в различных направлениях. Их движение четко отслеживалось на космических снимках, а на земле они маркировались выпадением светло-серого до палевого пепла, разной мощности и гранулометрического состава, в зависимости от удаления от эруптивного центра [Мельников и др., 2011].

Особенно показательными были два самых первых и самых мощных эпизода такой активности. Первый из них продолжительностью около 20 минут был зафиксирован сетью геофизических станций Камчатского филиала Геофизической службы (КФ ГС) РАН 12 декабря в 19:49 UTC. Через 6 часов на снимке AIRS было зарегистрировано эруптивное облако площадью ~ 29000 км² с содержанием SiO₂ ~ 15.8 кт, вытянутое в широтном направлении. Оно находилось над СЗ частью Камчатки и югом Магаданской области [Мельников и др., 2011]. 13 декабря пепел из него (светло-серый алевролит с небольшой примесью тонкозернистого песка) выпал в п. Козыревск (примерно 110 км к ССЗ от вулкана) – 40 г/м², в п. Эссо (135 км к СЗ) и п. Тигиль (310 км к ССЗ) [Дрознин и др., 2011].

Следующий эпизод имел место 31 декабря в 17:56 UTC (по сейсмическим данным КФ ГС РАН). Движение эруптивного облака происходило сначала на юг и юго-запад до мыса Лопатка (550 км к ЮЗ от эруптивного центра), а затем траектория движения облака сместилась в сторону Тихого океана. Через сутки оно достигло

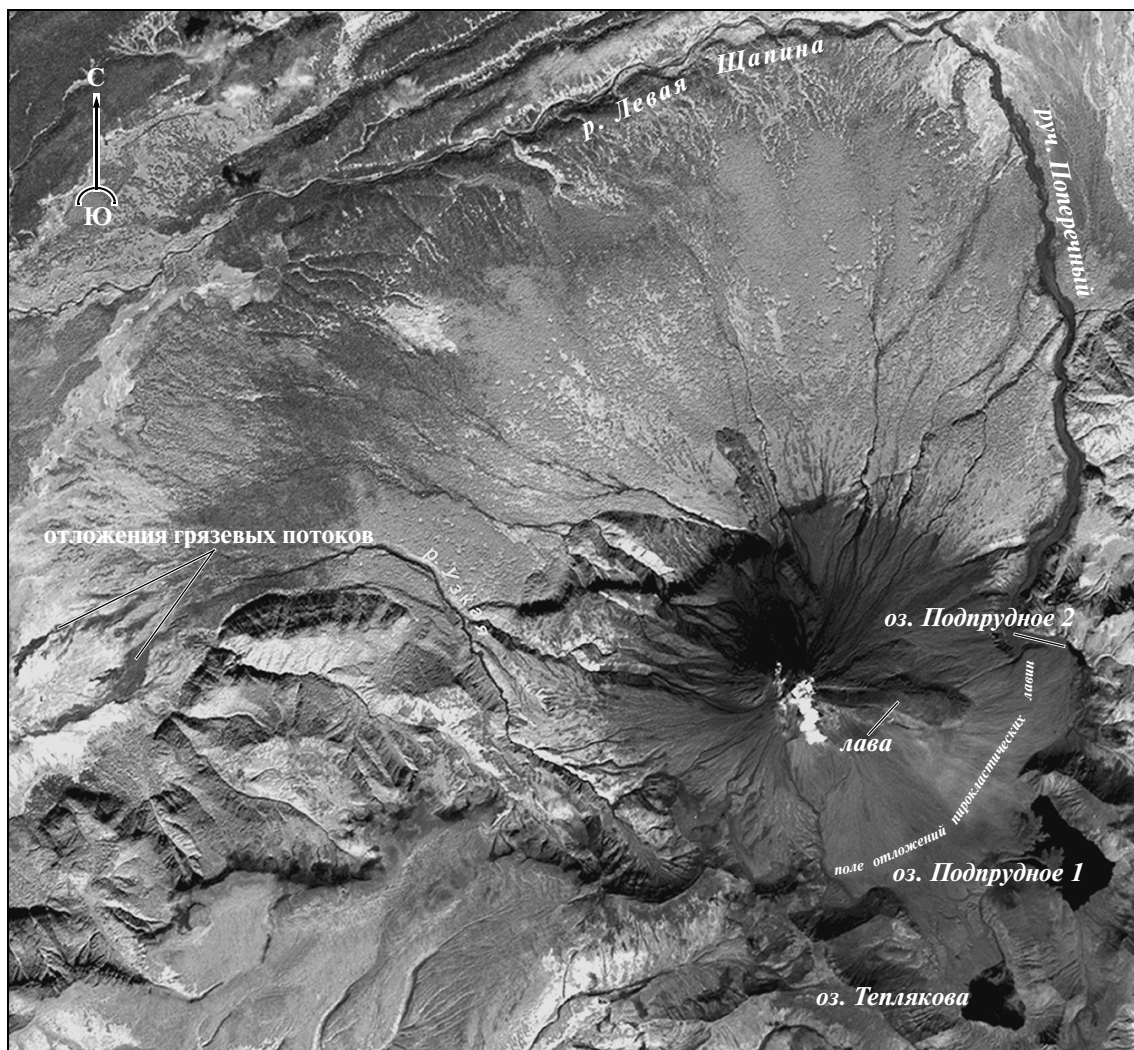
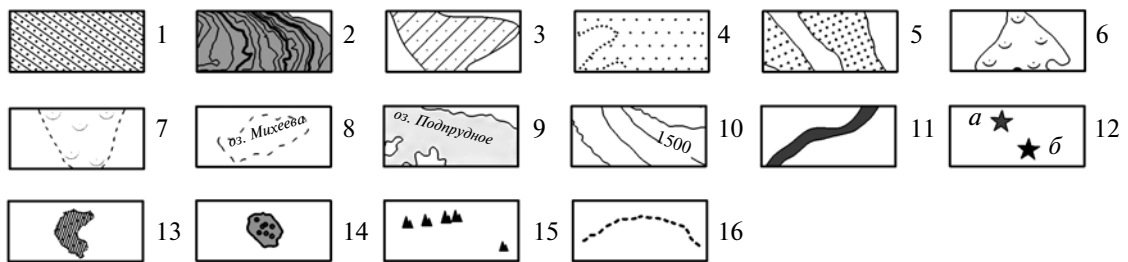
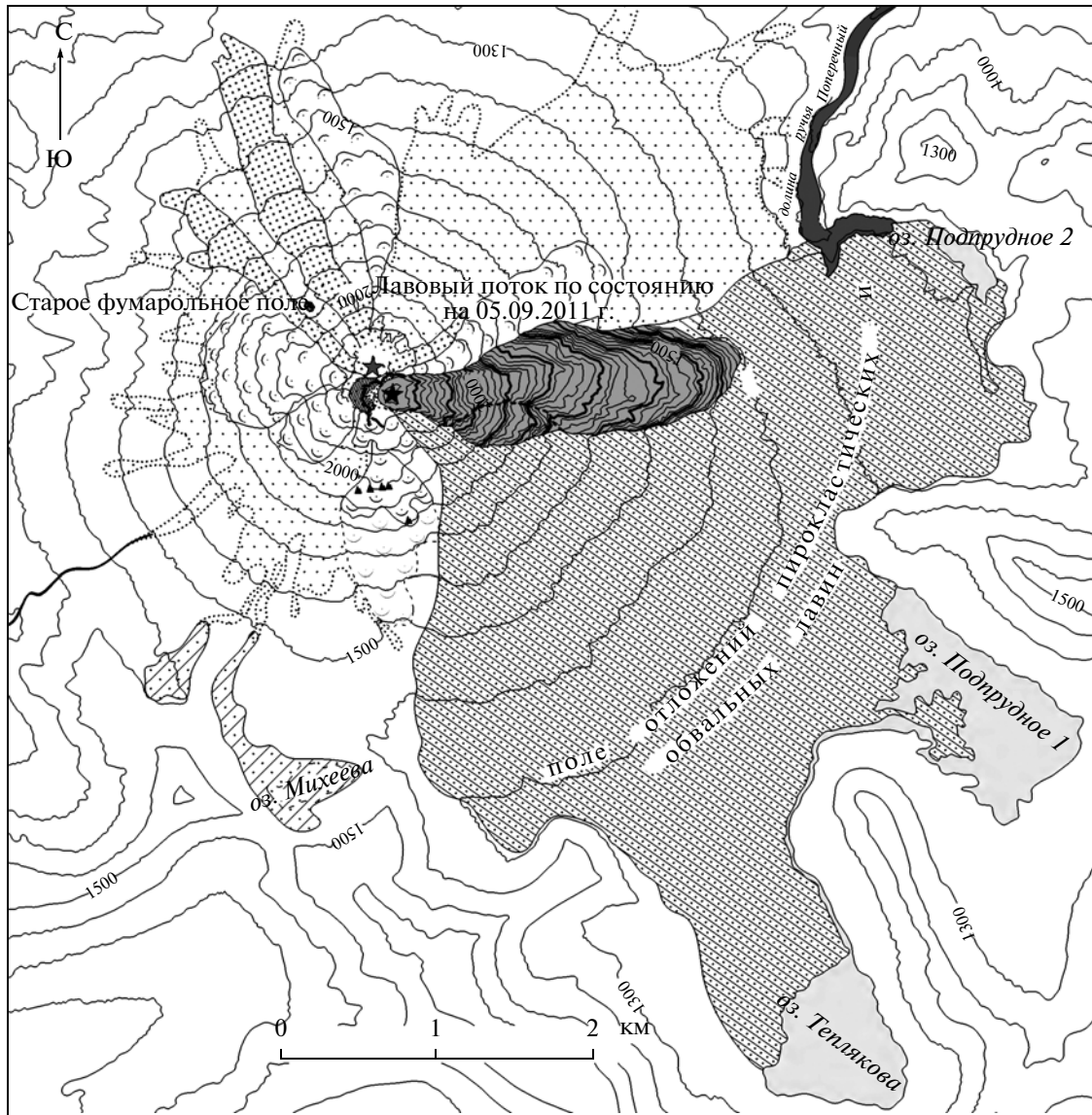


Рис. 4. Последствия извержения вулкана Кизимен к 05.09.2011 г. на снимке, полученном со спутника Terra ASTER.

Рис. 5. Схема последствий извержения вулкана Кизимен на 05.09.2011 г., составленная на основе фотограмметрической обработки стереопары снимков спутника Terra ASTER и аэрофотоснимков 1989 г.

1 — главное поле отложений ювенильных пирокластических и обвальных лавин мощностью от первых до десятков метров; 2 — новый лавовый поток, сформировавшийся к 05.09.2011 г.; 3 — поля отложений обособленных ювенильных пирокластических и обвальных лавин; 4 — маломощные (десятки сантиметров — первые метры) отложения пепла и перенесенного ветром материала пирокластических лавин; 5 — андезибазальтовые лавы IV цикла извержений; 6 — короткие крупноглыбовые мощные андезитовые лавовые потоки; 7 — обрушенный фрагмент одного из потоков типа 6; 8 — контур береговой линии уничтоженного отложениями ювенильных пирокластических и обвальных лавин оз. Михеева; 9 — озера; 10 — горизонталы и их отметки; 11 — отложения грязевых потоков; 12 — центры самых молодых излияний лавы: а — IV цикла извержений, б — действующий в настоящее время; 13 — жерловый купол; 14 — старое фумарольное поле; 15 — скалы-останцы на границе обрушений потока типа 6; 16 — граница между двумя потоками, сформировавшими лавовое поле.

Горизонталы в пределах лавового поля проведены через 20 м, на остальной части схемы — через 100 м.



Аляски. В 15:41 UTC 1 января (через 8 часов после начала эруптивного эпизода) площадь облака была ~49000 км² [Мельников и др., 2011]. 01.01.2011 г. наблюдалось (в 10:30 утра местного времени) выпадение пепла (светло-серый, аллевропелитовый) в районе Налычевских гидротерм (~190 км к ЮЗ от вулкана) – 20–30 г/м² (отбор проб проводился сотрудниками ИВиС ДВО РАН Е.А. Кравчуновской и А.А. Гвоздковой). В этот день выпадение пепла также отмечалось в городах Петропавловск-Камчатский и Елизово (примерно 260 км к ЮЮЗ от вулкана) – до 10 г/м². По составу отобранные и проанализированные образцы пеплов соответствуют дацитам и андезитам с содержанием SiO₂ от 61.2 до 64.5% [Дроздин и др., 2011; Малик, Овсянников, 2011]. Согласно анализу инфразвукового сигнала, сопровождавшего это эксплозивное событие, в атмосферу было выброшено около 4 × 10⁶ т тонкого пепла [Фирстов, Махмудов, 2011].

Предполагается [Мельников и др., 2011], что согласно сейсмическим данным, сопоставимыми по мощности, были еще и эруптивные события 6.01.2011 и 12.01.2011 г. Из-за непогоды корректный анализ спутниковых данных по ним не был проведен.

Во время каждого из рассмотренных эруптивных эпизодов по склонам вулкана сходили многочисленные раскаленные обломочные лавины и ювенильные пирокластические лавины. Первое изображение в инфракрасном диапазоне отложений таких лавин, сошедших по восточному склону вулкана, было получено со спутника Terra ASTER 07.01.2011 г. [Мельников и др., 2011]. Таяние снега, вызванное этими процессами, привело к возникновению мощного, протяженного (более 10 км) лахара по ручью Поперечному. Лахар на короткое время перегородил русло р. Левая Шапина, подпрудив ее. Практически на протяжении всего времени извержения транспорт эруптивного материала (а впоследствии и лавового потока) происходил по восточному склону вулкана. Лишь однажды было зафиксировано смещение области накопления материала в другой сектор. На инфракрасном спутниковом снимке Terra ASTER за 25.02.2011 г. отчетливо дешифрируются относительно остывшее поле ранее сошедших грубообломочных вулканогенных отложений на восточном (азимут 95°) склоне вулкана, а также более свежая (с интенсивным тепловым потоком) лопасть на ЮЮЗ (азимут 190°) склоне. Из вершинного кратера в это время выходили 2 струи – ярко-белая, чисто па-

рогазовая, у юго-западного края кратера, и коричневатая, нагруженная пеплом, – у северо-восточного [Мельников и др., 2011].

Направление движения лавин было predetermined строением вершины вулкана. Ее западную, самую высокую часть, венчала экстружия (жерловый купол более раннего извержения), защищавшая от выбросов твердых продуктов извержения западные склоны вулкана. Действующий кратер располагался в восточной части вершины и был полностью открыт в сторону ВЮВ склонов конуса. Именно на этих склонах и у соответствующего подножия вулкана в декабре стало формироваться самое первое обширное поле отложений раскаленных обломочных и ювенильных пирокластических лавин. Обломки из фронтальной части одной из самых ранних обломочных лавин, отобранные В.В. Ящуком и Н.А. Малик, оказались смесью пород сходного состава (от дацитов до андезитов): в разной степени измененных, слагавших вершину вулкана, и свежих – ювенильных (преобладавших).

Появление в кратере свежей лавы, первые признаки которой были обнаружены в начале марта 2011 г., дополнило источник поступления обломочного материала и изменило характер формирования поля пирокластических отложений. Существенная роль в этом процессе стала принадлежать обвалам с фронта и с бортов лавового потока, постоянно сопровождавшим его движение вниз по склону вулкана.

Единственной возможностью хоть как-то оценить последствия первых восьми месяцев извержения стало использование изображений спутника Terra ASTER (см. рис. 4). По стереопаре снимков от 05.09.2011 г., при их совместной фотограмметрической обработке с аэроснимками 1989 г., имеющих высокое пространственное разрешение и позволивших уточнить контуры основной массы отложений, установлено, что площадь распространения главных фаций пирокластики к этой дате достигла 11.3 км² (см. рис. 5). Максимальная протяженность поля от кратера составила 4.9 км и была ограничена подножием отрогов хребта Тумрок. Наибольшая ширина в средней части, на высоте около 1300 м, была близка к 4.7 км.

Измерить мощности поля отложений пирокластических и обломочных лавин по стереомодели на основе снимков ASTER – оказалось делом ненадежным, ввиду их низкого разрешения и искажений модели, вызванных геометрией построения сканерного изображения. Но по кос-

венным признакам, например, по степени заполнения врезом, глубина которых точно определялась по аэроснимкам 1989 г., можно почти уверенно называть цифры мощностей отложений на эту дату от первых метров вблизи вершины до 30 метров в районе фронтальных частей поля. По этим данным, ориентировочный объем отложений пироклаستيку в пределах площади 11.3 км² на 05.09.2011 г. был близок к 0.15 км³, а средняя их мощность составляла около 13 м.

Стереомодель ASTER позволила также выделить два небольших обособленных участка отложений пирокластических лавин у ЮЮЗ подножия конуса вулкана. Один площадью около 0.1 км² при длине 600 м и второй, более юго-восточный (0.32 км² при длине 1.5 км), отложения которого полностью перекрыли акваторию озера Михеева. Незначительная мощность лавин этого склона не позволила измерить ее величину, соответственно и объем, по снимкам ASTER. Для этого также пришлось использовать промеры стереомодели 1989 г., показавшие, что оба участка приурочены к пологосклонным котловинам с относительной глубиной до 5–10 м. Такова, вероятно, и максимальная мощность отложений, выполнивших котловины. Поэтому при вполне приемлемой средней мощности отложений 5 м их объем будет близок к 0.002 км³.

Большая часть остальной поверхности конуса вулкана Кизимен, в границах отсифрированных по стереомодели и обозначенных на рис. 5 (площадь около 10 км²), была покрыта слоистой пачкой пироклаستيку из тефры и перенесенных ветром наиболее мелких фракций отложений пирокластических лавин. Ее суммарная мощность, как минимум — десятки сантиметров, а объем около 0.01 км³.

Точные количественные оценки большей части отложений изверженного материала на склонах стали возможными после выполнения 11.12.2011 г. крупномасштабной плановой аэрофотосъемки вулкана. К этой дате размеры и морфология поля отложений пироклаستيку кардинально изменились (рис. 6). Наиболее заметные перемены произошли на участке склона вулкана, примыкающем к лавовому потоку этого извержения с севера. Вынос пирокластического материала из кратера и крупные обрушения северных бортов потока лавы обеспечили прирост площади поля отложений на 1.8 км² за 3 месяца, прошедших от даты получения снимков ASTER. В итоге к 11.12.2011 г. на восточных склонах вулкана Кизимен пирокластическими и обвальными отложениями была покрыта площадь в

13.12 км² (без обособленных участков, выявленных по снимкам ASTER — малая мощность и, следовательно, присутствие снежного покрова на этих участках во время аэрофотосъемки не позволили точно оценить их параметры). Объем отложений поля (без учета материала лавин, оказавшегося под лавовым потоком) составил 0.265 км³ при средней его мощности около 20 м. Распределение мощностей основной доли отложений представлено на рис. 7. Южный сегмент этой карты на данном рисунке не показан. В его пределах маломощные отложения пироклаستيку, не превышающие 1–2 метров, по-видимому, быстро остыли и были перекрыты снегом, который мог исказить результаты измерений.

ПОСЛЕДСТВИЯ ЭФФУЗИВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Процесс извержения вулкана Кизимен почти непрерывно сопровождался выделением из кратерной зоны крупного парагазового шлейфа, практически постоянно прикрывавшего вершину вулкана не только для аэрокосмических, но и для наземных наблюдений. По этой причине точное время появления лавы в кратере не известно. Первые порции свежего лавового материала в районе вершины были не очень уверенно выявлены по снимкам С.Б. Самойленко, сделанным им во время облета вулкана 03.02.2011 г., и А.А. Овсянникова — 08.03.2011 г. [Малик, Овсянников, 2011]. С тех пор до момента получения снимков ASTER, т.е. почти ровно за полгода на восточный склон вулкана излилось несколько порций лавы, сформировавших крупный по размерам поток (см. рис. 4, 5). В морфологии потока на эту дату можно выделить, как минимум, два фрагмента. Один, расположенный в южной привершинной части общего лавового поля, имеет длину от центра кратера 1030 м и наибольшую ширину видимой части 340 м. Его максимальная мощность около 70 м. Он имеет выпуклую каплевидную форму с поверхностью, сложенной крупноглыбовым материалом и, по-видимому, относится к одной из первых наиболее вязких порций лавы.

Второй — менее вязкий поток, представляющий главную часть лавового поля, обогнул первый с севера, частично его перекрыв. К 05.09.2011 г. его длина в проекции на плане достигла 2250 м, длина по осевой линии на склоне конуса — около 2500 м. На протяжении верхней половины потока от кратера до высоты 1850 м отчетливо просматриваются бортовые валы, возвышающиеся над поверхностью текущей между ними лавы не менее чем на

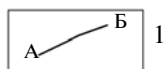
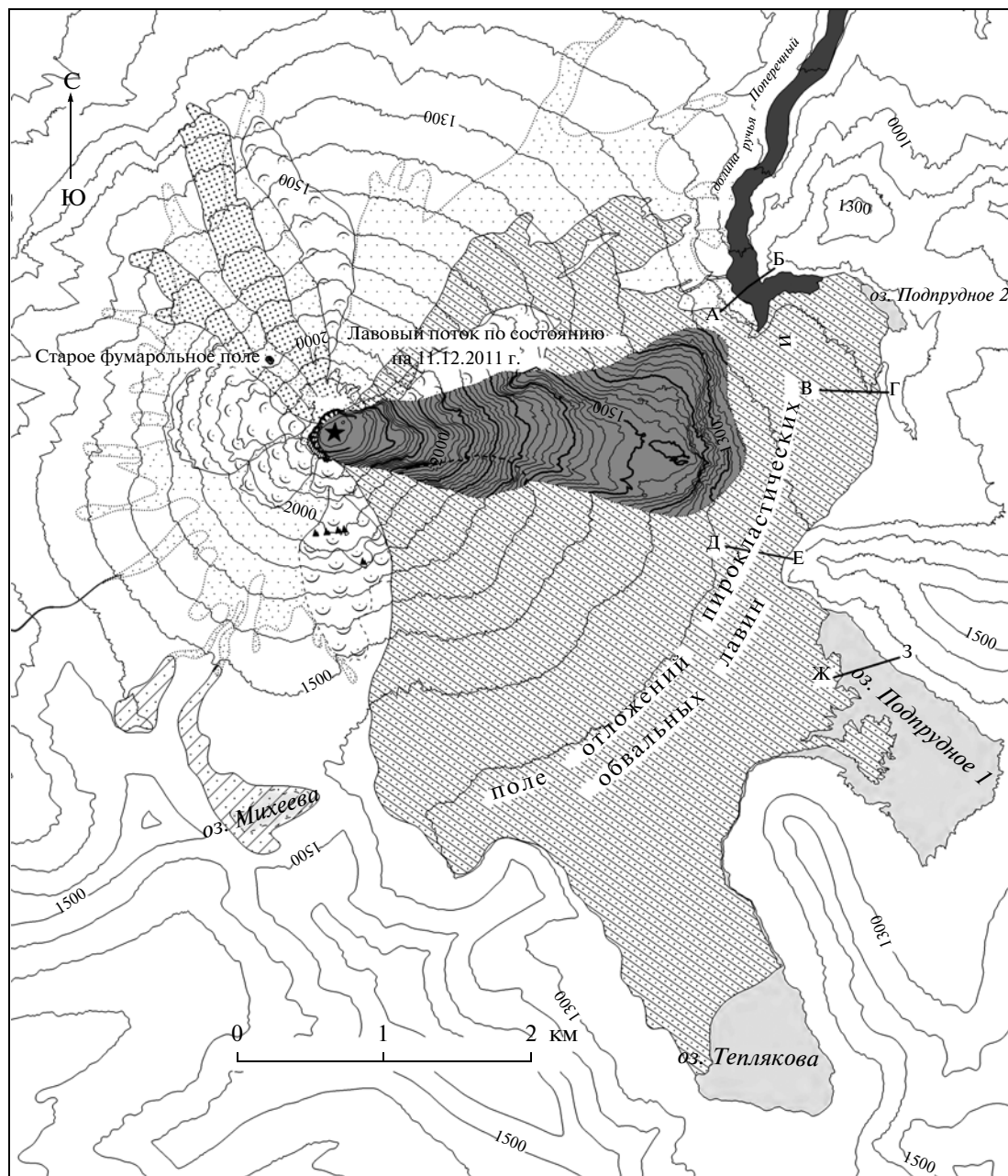


Рис. 6. Карта последствий извержения вулкана Кизимен, составленная по результатам фотограмметрической обработки аэроснимков от 11.12.2011 г.

1 – линии поперечных профилей, представленные на рис. 10, в районе уничтоженной долины руч. Поперечного. Остальные условные обозначения те же, что и на рис. 5. Горизонтали в пределах лавового поля проведены через 20 м, на остальной части карты – через 100 м.

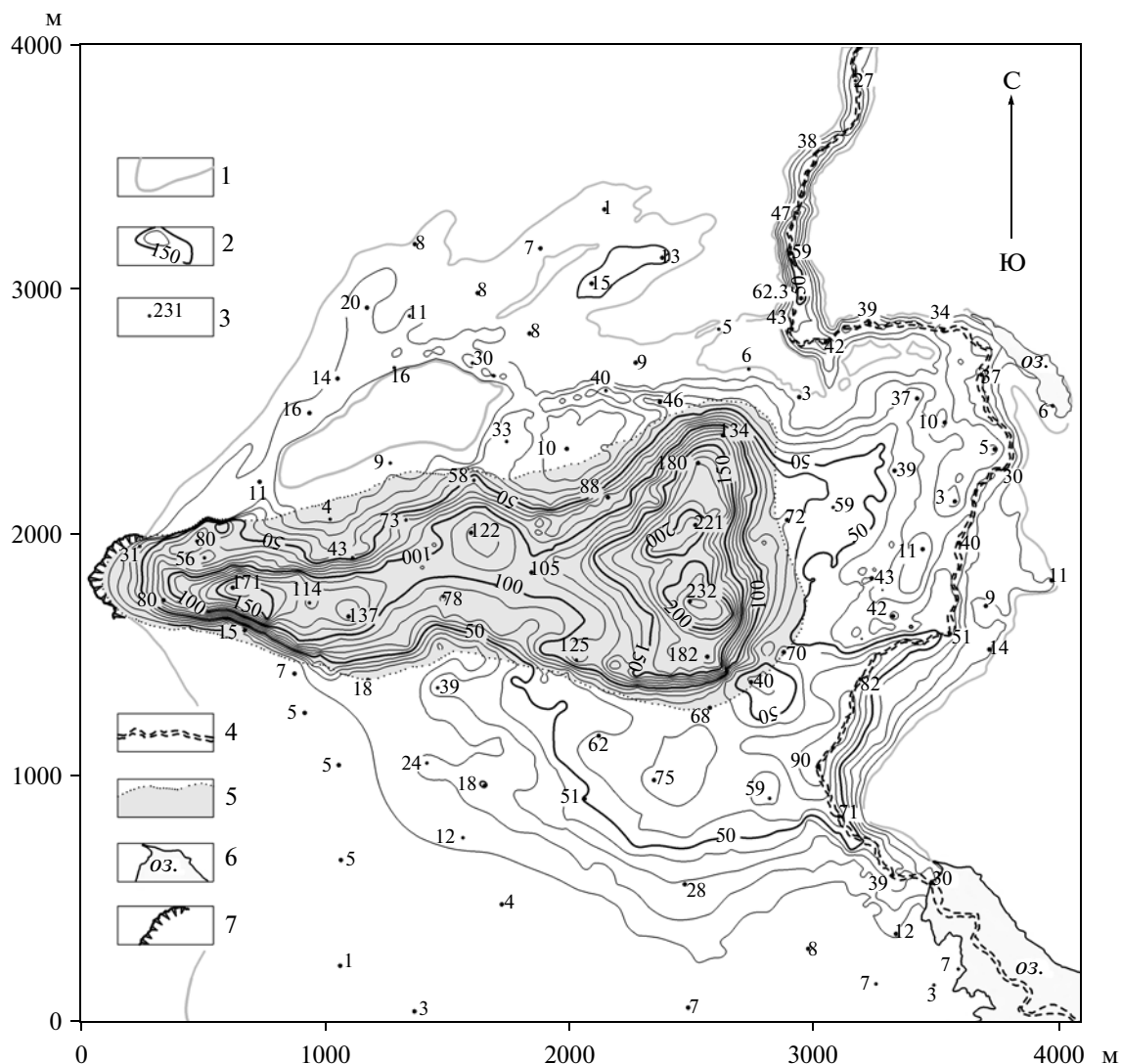


Рис. 7. Фрагмент карты мощностей основных отложений пирокластики и лавы на восточном склоне вулкана Кизимен к концу первого года извержения.

1 – контур закартированных отложений; 2 – изопахиты и их отметки, проведены с интервалом 10 м; 3 – мощности отложений, в м; 4 – погребенное русло руч. Поперечного; 5 – лавовое поле; 6 – подпрудные озера; 7 – гребень активного кратера.

20 м. Ширина лавового русла верхней части потока 150–200 м. На высоте 1800 м бортовые валы постепенно исчезают. Поток на этом уровне достигает наибольшей ширины – 700 м. Ниже 1800 м поток лавы приобретает преимущественно выпуклую форму и, постепенно сужаясь, заканчивается на высоте 1300 м. Невысокая разрешающая способность снимков ASTER, тем не менее, позволила при стереоскопическом рассмотрении различить на поверхности потока крупные волнообразные, выпуклые в направлении движения, складки. Общая площадь поля лавы (на плане)

равна 1.16 км² (на склоне конуса ~1.3 км²), объем близок к 0.06 км³. Средняя мощность лавы по этим данным составляет 52 м, при максимальной 150 м, измеренной по отвесной линии вблизи фронта потока.

После 05.09.2011 г. строение вершины вулкана, размеры и морфология лавового поля, сформированного к 11.12.2011 г. во многом изменились (рис. 8, 9). Вершинная экструзия, охватывавшая до извержения кратер с запада (от ЮЗ до СЗ) и имевшая размеры в плане 290 × 110 м, на 2/3 разру-

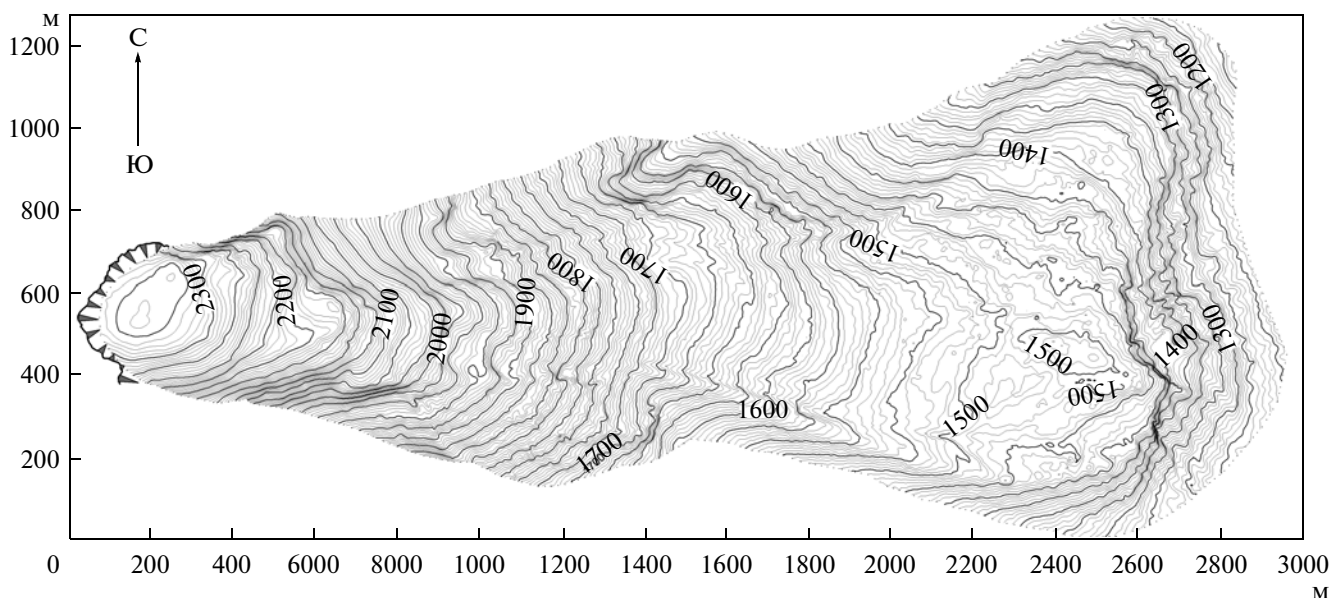


Рис. 8. Топографический план лавового потока вулкана Кизимен. Рельеф и размеры на 11.12.2011 г. Горизонтالي проведены через 5 м.

шена поступающей из жерла на поверхность свежей лавой. Сохранилась только самая западная часть экструзии с размерами по основанию 97×32 м. Сильно расширившийся до 320 м на выходе из жерла движущийся поток лавы разрушил также ЮВ и СВ оконечности гребней открытого на восток кратера.

Отчетливо видимые на снимках ASTER бортовые валы верхней половины потока к 11.12.2011 г. полностью исчезли под мощными напластованиями свежих порций лавы и в результате крупных обрушений участков северных бортов потока. Четко выраженный бортовой вал, высотой до 20 м, существует лишь вдоль южного борта потока, где он простирается с высоты 1820 м до его фронтальной части на протяжении 1360 м. Примерно такой же вал, по-видимому, был и вдоль северного борта потока до тех пор, пока у фронта потока не возникло грандиозное нагромождение лавы мощностью до 232 м (см. рис. 7) над подстилающей поверхностью, соответствующей состоянию 1989 г. Возникшая плотина стала препятствовать продвижению новых порций лавы по поверхности русла потока и развернула поступающий лавовый материал к северо-востоку. Северный борт потока был прорван на протяжении ближайших к фронту 500 м, после чего в СВ направлении стало развиваться еще одно ответвление лавового поля. Фронтальная часть этого ответвления зафиксирована

11.12.2011 г. на высоте 1170 м, в 200 м от края обрыва к бывшей долине руч. Поперечного. От бортового вала северного борта потока остался изогнутый в нижней части к северу фрагмент, наиболее четко выраженный в интервале высот 1690–1460 м.

В итоге, к 11.12.2011 г. крупнейший из всех известных лавовых потоков (см. рис. 6, 7, 8, 9) вулкана Кизимен достиг следующих размеров: его длина по осевой линии на склоне составила 3052 м, длина проекции на плане – 2863 м; ширина потока в районе жерла – 320 м, в наиболее широком месте средней части – 862 м и вблизи фронта (по основанию осыпи) – 1270 м.; площадь потока на плане равна 2.163 км²; объем потока вместе с подстилающей грубообломочной пирокластикой (т.е. от поверхности 1989 г.), большая часть которой также является материалом обрушений фронтальных частей двигавшегося потока, составил 0.195 км³; средняя мощность потока – 90 м, максимальная от подстилающей поверхности – 232 м. Как и в сентябре, большая часть наиболее подвижной, “русловой”, части лавового потока деформирована крупными, шириной до 70 м и относительной высотой до 15 м, волнообразными, выпуклыми в направлении движения, складками, которые разделены узкими и тоже дугообразными понижениями. Максимальная абсолютная отметка поверхности потока в истоке ~ 2330 м. Край ла-

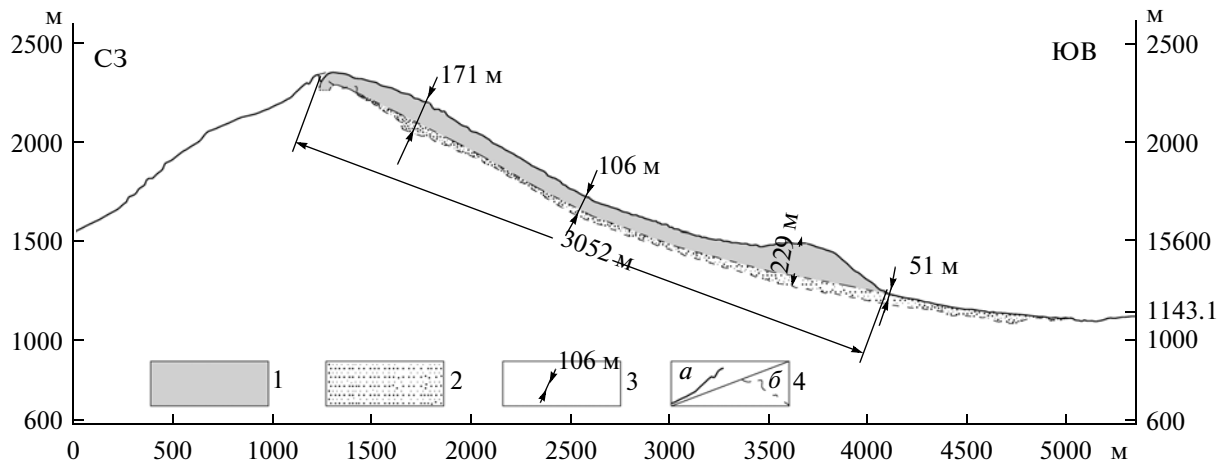


Рис. 9. Профиль вершины и склона вулкана с перекрывающим их лавовым потоком текущего извержения по состоянию на 11.12.2011 г. Построен по осевой линии лавового потока и ее продолжениях – на запад и восток.

1 – тело потока лавы; 2 – предполагаемый слой пирокластических и обвальных отложений между подошвой лавового потока и подстилающей поверхностью (мощности этого слоя соответствуют средним значениям мощностей отложений, измеренных вдоль северных и южных границ подошвы потока); 3 – параметры лавового потока и пирокластики; 4 – линия контура поверхности по профилю: *a* – на 11.12.2011 г., *б* – подстилающей поверхности на 27.07.1989 г.

вовый осипи СВ лопасти потока находился на абсолютной высоте ~1170 м, восточной лопасти – на 1240 м.

Общий объем лавы и пирокластики, изверженных к этой дате в пределы поля, площадью 13.12 км², на восточных склонах вулкана, составил 0.46 км³. В этот объем не входят отложения грязевых потоков и пирокластических лавин сходящих по руслам ручьев за пределы постройки вулкана, оказавшиеся под снегом отложения отдельных маломощных пирокластических лавин, пепла и пирокластики на остальной части конуса.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ НА ОБЪЕКТЫ ГИДРОГРАФИИ РАЙОНА ВУЛКАНА КИЗИМЕН

В зоне, наиболее подверженной воздействию процессов, сопровождающих извержение, основными гидрографическими объектами до активизации вулкана были два озера – Теплякова, площадью 593600 м², расположенное в 5 км на ЮВ от вершины вулкана, и Михеева (площадь была равна 91400 м²) – в 2.5 км к ЮЮЗ от вершины. Из озера Теплякова вытекал руч. Поперечный, имевший вблизи вулкана хорошо проработанную,

преимущественно V-образную долину, глубиной до 200 м. Ручей впадал в р. Левая Шапина в 17.4 км к северу от озера Теплякова.

Пирокластические лавины почти не изменили конфигурацию береговой линии и размеры озера Теплякова, поскольку мощности их отложений вблизи озера оказались минимальными – менее 1 м. Однако озеро Михеева, имевшее до извержения размеры 570 × 250 м и глубину более 2 м, к 05.09.2011 г. было уничтожено пирокластическими лавинами.

Во многом сходной оказалась также судьба руч. Поперечного. От 17.4 км его прежнего русла сохранились только первые 1.8 км в верхнем течении. Положение русла ручья на данном участке, по отношению к 1989 г., в плане практически не изменилось. Этому способствовали незначительные мощности отложений лавин, едва превышавшие здесь 1 м. В 3.8 км по руслу ручья от озера Теплякова, долина ручья, огибавшая прежде конус вулкана с востока к 11.12.2011 г. полностью исчезла под отложениями лавин. Кроме пирокластических лавин по большинству крупных понижений в рельефе конуса Кизимена (барранкосы, русла ручьев и временных водотоков), по-видимому, в зимне-весеннее время прошли грязевые потоки. Прежде изрезанный оврагами и промои-

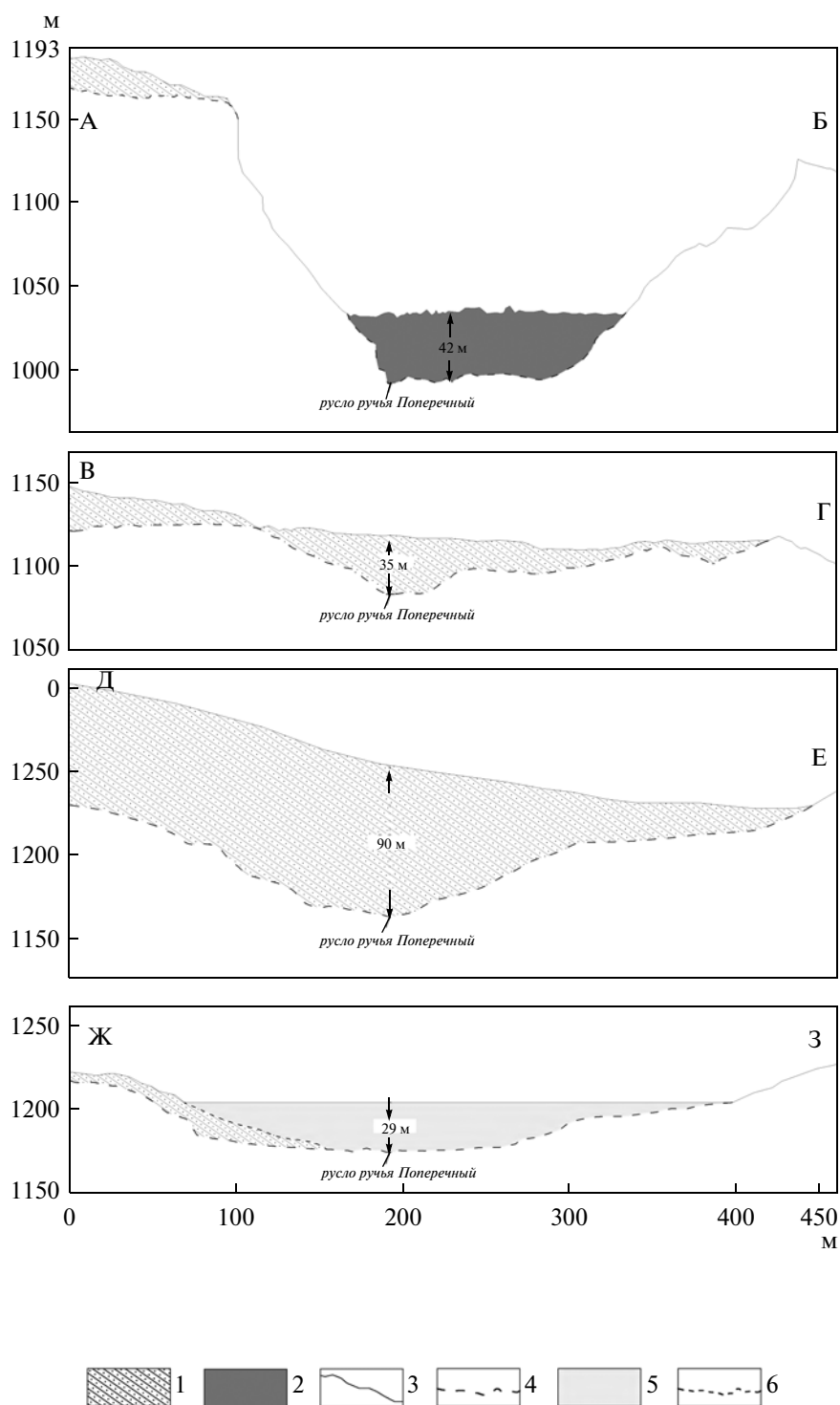


Рис. 10. Поперечные профили, характеризующие мощности отложений над бывшим руслом погребенного ручья. Поперечного.

1 – отложения ювенильных пирокластических и обвальных лавин; 2 – отложения лавин и грязевых потоков; 3 – поверхность на 11.12.2011 г.; 4 – профиль погребенной поверхности – построен по стереомодели от 27.07.1989 г.; 5 – водная толща оз. Подпрудного № 1 по линии профиля Ж-3; 6 – предполагаемый профиль кровли отложений под водой озера. Положение линий профилей см. на рис. 6.

нами рельеф прилегающих территорий был основательно перекрыт и выровнен. Его поверхность над ручьем поднялась на 30–90 м (рис. 10), имея наибольшие значения мощностей отложений (до 90 м) в районе ЮВ оконечности лавового потока (см. рис. 7).

Возникшая ситуация привела к образованию в начале лета 2011 г. новых подпрудных озер. Озеро Подпрудное № 1 (см. рис. 5, 6) заполнило обозначенный выше промежуток – 1.8–3.8 км от истока ручья. Его площадь, ограниченная с севера, востока и юга отрогами хребта Тумрок, а с северо-запада – новыми обвальными-пирокластическими отложениями, составила на 11.12.2011 г. 964 800 м², отметка поверхности льда и снега, покрывавших озеро на момент аэросъемки – 1202 м. Наибольшая глубина, относительно русла ручья, по состоянию на 1989 г. – 29.7 м. Озеро Подпрудное № 2 образовалось на поверхности основного поля пирокластических отложений вблизи его СВ оконечности. Его размеры 564 × 119 м, площадь на дату аэросъемки 39 600 м². Отметка уровня льда и снега на озере 1063 м.

Ниже по склону СВ сектора подножия вулкана Кизимен от северной границы поля обвалных и пирокластических отложений, грязевые (лахары) и пирокластические потоки прошли по долине руч. Поперечного вплоть до р. Левая Щапина (см. рис. 4), заполнив ее на всем (9.7 км) протяжении. Ширина полосы лахаровых отложений вдоль бывшего руч. Поперечного колеблется от 100 до 250 м. Отложения лахара перекрыли также устья ручьев, впадавших прежде справа в руч. Поперечный. В итоге, по границе лахаровых отложений там возникла масса небольших озер.

Довольно крупные (площадь – 1.5 км² и 0.3 км²) поля отложений грязевых потоков сформировались в среднем течении р. Узкая, у западного подножия конуса вулкана на расстоянии 10.1 км от его вершины (см. рис. 4). Протяженный лахар в долине р. Узкая сформировался из слившихся между собой более мелких лахаров, сошедших по долинам временных и постоянных водотоков – правых притоков р. Узкая, сошедших со склонов всего западного сектора постройки вулкана Кизимен. Длина лахара от истока р. Узкая до указанных полей превышает 15 км.

Ориентировочный объем лахаровых отложений в долине руч. Поперечного около 15 × 10⁶ м³ (0.015 км³), в долинах р. Узкая и ее притоков – порядка 10–15 × 10⁶ м³ (0.01–0.015 км³).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Непрерывно продолжающееся более 21 месяца извержение вулкана Кизимен, уже по длительности достаточно необычное, по многим своим параметрам является уникальным событием не только для Камчатки в начале XXI в., но и для всей Курило-Камчатской вулканической области в историческое время, с XVIII века. Так, ни одно камчатское или курильское наблюдавшееся историческое извержение не предварялось и не сопровождалось такой сильной и продолжительной сейсмичностью. Впервые происходит излияние столь объемного и мощного (до 232 м) андезитового лавового потока, достигшего к 11.12.2011 г. объема почти 0.2 км³, а за следующие 8 месяцев, ставшего еще больше. Это извержение входит в четверку сильнейших (Молодой Шивелуч, 1854, 1964 гг.; Безымянный, 1955–1956 гг.) по количеству поставленного на поверхность ювенильного магматического вещества андезитового состава – около 1 млрд тонн. Оно, даже по состоянию на 11.12.2011 г., самое продуктивное (~0.56 км³, ~1.08 × 10⁹ т изверженного ювенильного и резургентного материала) на Камчатке с 1975–1976 гг. (после БТТИ) и на Курилах с 1854 г. (после извержения вулкана Чикурачки).

Все приведенные цифры – результат анализа данных, полученных авторами с помощью дистанционных методов исследований рассматриваемого извержения.

Дистанционные методы исследований позволили реально оценить геолого-геоморфологический эффект извержения как с качественной, так и с количественной сторон, выявить особенности динамики формирования возникших форм рельефа, их параметры, мощности разных типов отложений. Отдельно, по состоянию на 05.09.2011 г. и 11.12.2011 г., и вместе – за оба срока.

К сожалению, настоящая статья и предыдущая [Мельников и др., 2011] на сходную тему, с участием тех же авторов, подготовлена, в основном, по материалам только дистанционных методов, почти без привлечения результатов детального изучения вещественного состава изверженных пород. Это обусловлено тем, что наземными полевыми работами рассматриваемое извержение до сих пор, по разным причинам (удаленность вулкана, отсутствие необходимых финансовых средств, современной аналитической базы и др.) изучено очень слабо. Даже собранный каменный материал находится еще в состоянии обработки.

Поэтому вполне естественно, что некоторая часть изложенных в статье представлений носит предварительный характер. В особенности тех, которые обязательно требуют подтверждения наземными исследованиями, высококачественной аэрофотосъемкой, выполненной в бесснежное время, и надежной геофизикой: определения точного происхождения и строения толщ, слагающих откартированные поля пирокластики, соотношения в них ювенильного и резургентного материала, оценки мощности и крупности выпавшей в районе вулкана и за его пределами пирокластики, положения магматического очага, структуры питающей системы вулкана).

В принципе, по мнению авторов, дистанционные методы исследований важнейших параметров извержений, по мере их усовершенствования, будут приобретать все большее и большее значение. Увеличится и число изучаемых параметров, а сами дистанционные методы станут ведущими и оперативными при решении подобных задач.

Благодарности. Авторы благодарят своих коллег за информацию и плодотворное обсуждение данных в ходе извержения (В.А. Дрознина, И.К. Дубровскую, А.Ю. Озерова, А.А. Овсянникова, О.А. Гирину, А.В. Сокоренко, Н.А. Малик, В.В. Ящука) за доступ к осмотру коллекции отобранных образцов продуктов извержения (А.А. Овсянникова, С.Б. Самойленко, Н.А. Малик, А.П. Максимова). Особую благодарность за предоставленные спутниковые данные Тегга ASTER выражаем сотруднику Аляскинской вулканологической обсерватории Рикку Весселсу (Rick Wessels).

Работа выполнена при поддержке научных грантов РФФИ № 12-05-00630 и ДВО РАН 12-III-08-172.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гарбузова В.Т., Соболевская О.В.* Сейсмичность в районе вулкана Кизимен 1996–2007 гг. // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. Т. 1. С. 64–67.
- Горшков Г.С., Богоявленская Г.Е.* Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения 1955–1963 гг. М.: Наука, 1965. 171 с.
- Двига́ло В.Н., Свири́д И.Ю., Шевченко А.В. и др.* Состояние активных вулканов Северной Камчатки по данным аэрофотосъемочных облетов и фотограмметрической обработки снимков 2010 г. // Материалы региональной конференции “Вулканизм и связанные с ним процессы”. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2011. С. 26–36.
- Дегтерев А.В.* Пирокластические отложения извержения вулкана Пик Сарычева (о. Матуа) в июне 2009 г. // Вулканология и сейсмология. 2011. № 11. С. 60–68.
- Дитмар К.* Поездки и пребывание в Камчатке в 1851–1855 гг. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2009. 566 с.
- Дрознин В.А., Малик Н.А., Муравьев Я.Д. и др.* Началось извержение вулкана Кизимен (Центральная Камчатка) // Вопросы географии Камчатки. 2011. № 13. С. 7–12.
- Кирсанова Т.П., Вергасова Л.П., Юрова Л.М., Таран Ю.А.* Фумарольная активность вулканов Шивелуч и Кизимен в 1979–1980 гг. // Вулканология и сейсмология. 1983. № 3. С. 33–42.
- Малик Н.А., Овсянников А.А.* Извержение вулкана Кизимен в октябре 2010 г. – марте 2011 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. Вып. 17. № 1. С. 7–10.
- Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Волинец О.Н.* Вулкан Кизимен (Камчатка) – будущий Сент-Хеленс? // Вулканология и сейсмология. 1992. № 4. С. 3–32.
- Мельников Д.В., Двига́ло В.Н., Мелекесцев И.В.* Извержение 2010–2011 гг. камчатского вулкана Кизимен: динамика эруптивной активности и геолого-геоморфологический эффект (на основе данных дистанционного зондирования) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. Вып. 18. № 2. С. 85–99.
- Пийп Б.И.* О раскаленных агломератовых потоках Авачи и о типе извержений этого вулкана // Бюл. вулканол. станций. 1946а. № 12. С. 18–28.
- Пийп Б.И.* Вулкан Кизимен // Бюл. вулканол. станций на Камчатке. 1946б. № 13. С. 22–32.
- Сенюков С.Л., Дрознина С.Я., Кожевникова Т.Ю.* Опыт выделения пепловых выбросов и оценка их высоты по сейсмическим данным для вулканов Шивелуч, Карымский, Кизимен и Безымянный с 01.01.2003 по 01.05.2011 гг. // Труды третьей научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”. Обнинск: ГС РАН, 2011а. С. 139–143.
- Сенюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрознина С.Я. и др.* Сейсмичность вулкана Кизимен // Труды третьей научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”. Обнинск: ГС РАН, 2011б. С. 144–148.
- Тембрел И.И., Овсянников А.А.* Состояние вулкана Кизимен на Камчатке летом 2009 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. Вып. 14. № 2. С. 7–9.
- Фирстов П.П., Махмудов Е.Р.* Оценка количества пепла, выбрасываемого в атмосферу при сильных эксплозивных извержениях андезитовых вулканов на основании волновых возмущений в атмосфере // Труды третьей научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга

Дальнего Востока России”. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 159–163.

Шанцер А.Е., Гептнер А.Р., Егорова И.А. и др. Вулкано-генные толщи Тумрок, их палеомагнитная характеристика и возраст // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1969. № 9. С. 73–82.

Шанцер А.Е., Кутыев Ф.Ш., Петров В.С. Вулкан Кизимен // Бюл. вулканол. станций на Камчатке. 1973. № 49. С. 29–35.

Шанцер А.Е., Кутыев Ф.Ш., Петров В.С., Зубин М.И. Вулкан Кизимен // Действующие вулканы Камчатки. В 2-х т. М.: Наука, 1991. Т. 2. С. 16–29.

Churikova T., Worner G., Eichelberger J., Ivanov B.V. Minor- and Trace Element Zoning in Plagioclase from Kizimen Volcano, Kamchatka // Volcanism and Subduction the Kamchatka Region / Ed. Eichelberger et al. Washington, 2007. P. 303–324.

**The 2010–2012 Eruption of Kizimen Volcano: The Greatest Output
(as Inferred from Remote-Sensing Observations) for Eruptions
in Kamchatka in the Early 21st Century
Part I. The November 11, 2010 to December 11, 2011 Phase**

V. N. Dvigalo, I. V. Melekestsev, A. V. Shevchenko, and I. Yu. Svirid

Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences,

Petropavlovsk-Kamchatskii, bul'var Piipa 9, 683006 Russia

e-mail: dvig@kscnet.ru

Abstract—This paper presents the results from a detailed analysis of aerial photographs and space images for the Kizimen area, which characterize the geological and geomorphologic effects of the ongoing eruption for 2010–2011. It is shown that the total volume ($>0.5 \text{ km}^3$) and total mass ($> 10^9 \text{ t}$) of discharged (resurgent plus juvenile) material makes this eruption the most productive in Kamchatka for the first 12 years of the 21st century. The dominant component ($>90\%$) is juvenile material whose composition is consistent with that of andesite. The pyroclastics (tephra, deposits of juvenile pyroclastic avalanches and incandescent debris avalanches) makes $> 0.3 \text{ km}^3$ and $> 0.45 \times 10^9 \text{ t}$, the lava (a very thick block lava flow 3.052 km long and 2.163 km² in area) occupies about 0.195 km³ and $0.45 \times 10^9 \text{ t}$. With the exception of the tephra, which fell over an area of about 100000 km², the rest of the material was accumulated on the Kizimen cone and at its base. The mean discharge rate of juvenile ejecta was about 15 m³/s (29 t/s) for 13 months (November 11, 2010 to December 11, 2011). Appreciable changes also occurred at the near-summit part of the volcano's cone.