

УДК 551.21

ИЗВЕРЖЕНИЕ 2010-2011 гг. КАМЧАТСКОГО ВУЛКАНА КИЗИМЕН: ДИНАМИКА ЭРУПТИВНОЙ АКТИВНОСТИ И ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ (НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ)

© 2011 Д.В. Мельников, В.Н. Двигало, И.В. Мелекесцев

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006;
e-mail: dvm@kscnet.ru*

На основе анализа аэрофото- и космических данных реконструирована динамика эруптивной активности продолжающегося извержения камчатского вулкана Кизимен за 2010-2011 гг. Определен геолого-геоморфологический эффект последствий этого извержения. В первом приближении даны оценки дегазации вулканогенного диоксида серы (как показателя интенсивности вулканических процессов) и объема новообразованного лавового потока.

Ключевые слова: вулкан Кизимен, дистанционные методы, диоксид серы, извержение, ASTER.

Действующий вулкан Кизимен ($55^{\circ}08'$ с.ш., $160^{\circ}19'$ в.д., абс. высота – 2376 м, рис. 1) – сложно построенная форма, не имеющая по своей морфологии точного аналога среди других вулканических образований в пределах Курило-Камчатской области. Верхняя и средняя часть

постройки вулкана образована комбинацией из нескольких тесно сближенных и слившихся между собой, разных по размеру, степени сохранности и возрасту экструзивных куполов с их мощными агломератовыми мантиями, различных по типу, возрасту и составу лавовых

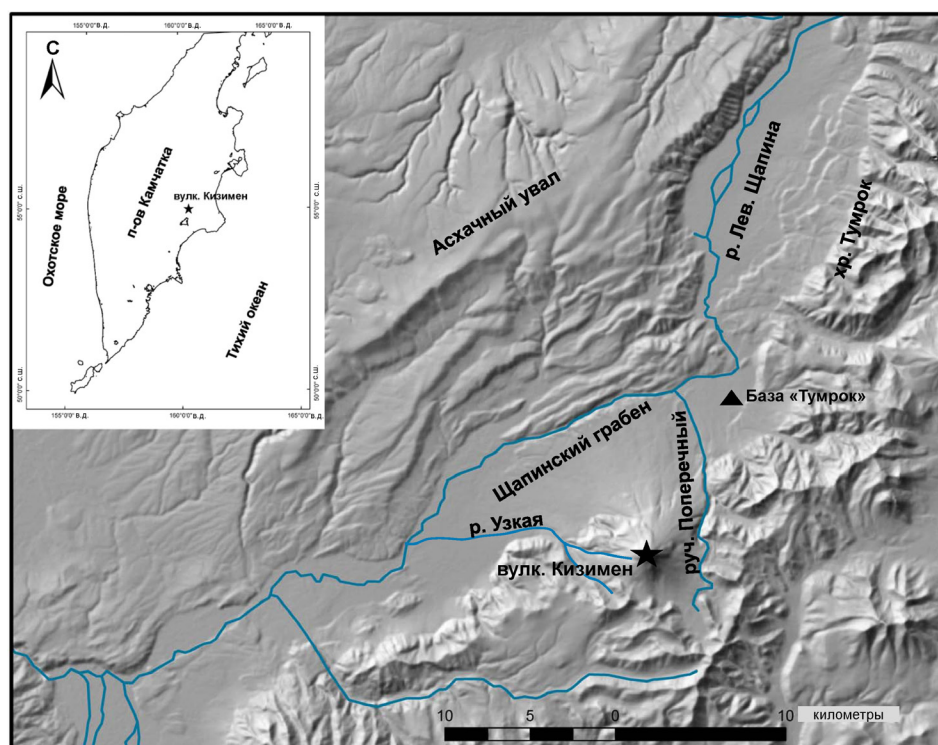


Рис. 1. Схема расположения вулкана Кизимен.

потоков. В строении подножия вулкана ведущая роль принадлежит крутонаклонным (8-10°) равнинам, сложенным обвальными-взрывными толщами, и обширными, пологонаклонным (2-5°) равнинам пирокластических потоков. Вскрытая мощность обвальными-взрывными толщ и пирокластических отложений достигает в разных местах от 40 до 170 м. (Мелекесцев и др., 1992).

Однако по своим размерам Кизимен является типичным для действующих вулканов Камчатки. Площадь его основания вместе с равнинами подножия – около 120 км². Относительная высота постройки над руслом р. Левая Шапина – 1950-2000 м. Крутизна склонов в средней и верхней частях 30-40°. Суммарный объем постройки, включая отложения равнин подножий, около 25 км³.

Вулкан Кизимен располагается на восточном борту Шапинского грабена и приурочен к системе крупноамплитудных сбросов северо-восточного простирания зоны сочленения этого грабена с горстом хр. Тумрок. Фундаментом вулкана служат вулканогенные и вулканогенно-осадочные породы верхнемиоценовой шапинской свиты, а также вулканиды тумрокского комплекса верхнеплиоцен-плейстоценового возраста (Шанцер и др., 1969).

Район Шапинского грабена вместе с примыкающими участками лавовых плато в пределах Центральной Камчатской депрессии и горста хр. Тумрок – один из самых активных в сейсмо-тектоническом отношении. Свидетельство этого – густая сеть разрывных тектонических и сейсмо-тектонических нарушений разных типов и возраста, вплоть до голоценовых. Серии сильных коровых землетрясений неоднократно происходили здесь 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, 1946б). Позднее вулкан изучался и другими учеными (Шанцер и др., 1969; Шанцер и др., 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 из «ревушей» фумаролы – более 100 м/с. В результате проведенных полевых работ в 2009 г. (Тембрел, Овсянников, 2009) измеренные температуры фумарольных газов варьировались от 171 до 340°C.

Гораздо меньше «повезло» вулкану Кизимен в непосредственном полевом исследовании самих последствий извержений. Самое раннее историческое извержение вулкана в 1928-1929 гг. никто из геологов и вулканологов не изучал. Противоречивые сведения о нем 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 описанию, Б.И. Пийп, по нашему мнению, оказался на самом молодом поле андезибазальтовых лавовых потоков, излившихся из бокки современной северной вершины вулкана (Мелекесцев и др., 1992). Открытый на восток кратер на экстремальном куполе – южной вершины Кизимена, как нам представляется, он не мог наблюдать, так как находился практически на противоположной стороне от него. Этот кратер четко дешифрируется на аэрофотоснимках 1950 и 1978 гг. Вполне вероятно, что именно он и был центром извержения 1928-1929 гг.

Основываясь на своих наблюдениях и сведениях, полученных от местных жителей, видевших извержение 1928-1929 гг., Б.И. Пийп (1946б) предположил, что оно было умеренным, а его эруптивный центр был все-таки приурочен к вершине вулкана, а не к тому месту, где 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 к извержению не приводили.

Подготовка текущего извержения вулкана Кизимен началась с появления сейсмических событий летом 2009 г. (Гарбузова, Соболевская,

2008; Сенюков и др., 2011б). В статье (Дрознин и др., 2011) предлагается считать началом извержения 11 ноября 2010 г., когда произошел взрыв (или резко усилилась фумарольная активность в кратере вулкана), а парогазовое облако с примесью пепла поднялось до высоты 1.5 км над вершиной вулкана. Следы этой и последующей активизации удалось наблюдать 21 ноября 2010 г. В.Н. Двигало (Двигало и др., 2011), который участвовал в облете вулкана Кизимен и выполнил плановую аэрофотосъемку. Фотограмметрическая обработка аэроснимков показала первые, еще незначительные, изменения в строении вершины вулкана, вызванные его активизацией, и проявившейся в появлении новых термальных площадок и фумарольных полей (Двигало 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 отсутствуют, так как из-за плохой погоды вулкан был недоступен для визуальных и спутниковых наблюдений.

9 декабря 2010 г. появились сейсмические сигналы, которые могли свидетельствовать о газовых взрывах и обломочных лавинах (Сенюков и др., 2011б). Увидеть эти события удалось на фотографии (http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/current/kzm/dPage_101210.jpg) сделанной 10 декабря канадским геофизиком Д. Пейджем (D. Page) с борта пролетавшего вблизи от вулкана авиалайнера. На них, по предположению И.В. Мелекесцева, зафиксирован сход с вершины вулкана к его подножию либо раскаленной обломочной лавины, либо ювенильной пирокластической лавины.

Термин раскаленная обломочная лавина применен здесь, согласно (Горшков, Богоявленская, 1965), 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 формирования раскаленных лавин на вулкане Кизимен происходят при разрушении лавового потока, движущегося по крутым склонам постройки. Новый термин «ювенильная пирокластическая лавина» является, по сути дела, аналогом термина Б.И. Пийпа (1946а) – «раскаленный агломератовый поток». Б.И. Пийп использовал его для относительно слабо насыщенной газом ювенильной пирокластической, дискретно извергаемой при низком газовом давлении и относительно небольшой (десятки-сотни т/с) интенсивности выноса вещества, 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 лавин пирокластических и классических пирокластических потоков резко различаются. У последних материалом служит газозвесь, выбрасываемая с гигантской скоростью (сотни м/с) при очень высоком газовом давлении, а интенсивность выноса вещества составляет десятки и сотни тысяч тонн в секунду. При этом изверженный материал перемещается по земной поверхности с большой скоростью (до 100-150 км/час) на газовой подушке, скатываясь со склонов круче 2-3°.

Материал раскаленных обломочных лавин и материал ювенильных пирокластических лавин образует обычные конусы выноса разных размеров, в зависимости от объема порций перемещаемого вещества, с характерной выпуклой поверхностью.

Кульминация эксплозивной активности вулкана Кизимен пришлось на вторую половину декабря 2010 г. – первую половину января 2011 г. Характерной особенностью извержения в это время были достаточно 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 светлого до палевого пепла, разной мощности и гранулометрического состава, в зависимости от удаления от эруптивного центра.

13 декабря пепел (светло-серый алевролит с небольшой примесью тонкозернистого песка) выпал в п. Козыревск (примерно 110 км к ССЗ от вулкана) – 40 г/м² (Дрознин и др., 2011). А уже 1 января 2011 г. наблюдалось (в 10:30 утра местного времени) выпадение пепла (светло-серый, алевропелитовый) в районе Налычевских гидротерм (~ 190 км от вулкана) – 20-30 г/м² (отбор проб проводился сотрудниками ИВиС ДВО РАН Е.А. Кравчуновской и А.А. Гвоздковой). Также в этот день выпадение пепла 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% (Дрознин и др., 2011; Малик, Овсянников, 2011). Одновременно с этим 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 7 января 2011 г. (рис. 2 на 3-ей стр. обложки). Таяние снега, вызванное этими процессами, привело к возникновению мощного, протяженного (более 10 км) лахара по ручью Поперечному. Лавар на короткое время перегородил русло р. Левая Шапина, подпрудив ее. Практически на протяжении всего времени извержения транспорт эруптивного (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 февраля 2011 г. отчетливо дешифрируются относительно остывшая область ранее сошедших вулканогенных отложений на восточном (азимут 95°) склоне вулкана, а также более свежая (с более интенсивным тепловым потоком) лопасть на ЮЮЗ (азимут 190°) склоне. Из вершинного кратера в это время выходили две струи — ярко-белая, чисто парогазовая, у юго-западного края кратера, и коричневатая, нагруженная пеплом — у северо-восточного.

Обломки из фронтальной части одной из первых обломочных лавин (отобранные В.В. Яшуком и Н.А. Малик) и показанные И.В. Мелекесцеву, оказались, по визуальной оценке, смесью дацитовых (андезитовых?) резургентных и, предположительно, ювенильных пород сходного состава. Также, в ходе нерегулярных полевых работ, было отобрано небольшое количество образцов пепла (Малик, Овсянников, 2011). К сожалению, отбор вещественного материала до сих пор носил лишь эпизодический характер, что связано в первую очередь с удаленностью и труднодоступностью вулкана.

Авторы настоящей статьи для реконструкции эруптивной активности вулкана во время этого извержения, определения геолого-геоморфологического эффекта и интенсивности событий остановились на использовании дистанционных данных (спутниковые снимки и аэрофотосъемка). Эти методы позволяют получать качественные и количественные характеристики вулканического процесса практически в реальном времени (зависит от типа используемых спутниковых данных) на обширных труднодоступных территориях. Особое внимание в работе уделено анализу концентраций в тропосфере диоксида серы, связанного с извержением вулкана Кизимен, и дешифрированию свежих вулканогенных отложений.

АНАЛИЗ КОНЦЕНТРАЦИЙ ВУЛКАНОГЕННОГО ДИОКСИДА СЕРЫ

Диоксид серы (SO_2) является одним из основных магматических газов, эманации

которого сопровождают вулканические извержения. Для него характерен короткий период жизни в воздухе, превращаясь в аэрозоли сульфатов в течение суток вблизи земной поверхности и в течение месяца в стратосфере. Мониторинг содержания SO_2 в атмосфере позволяет судить об энергии вулканического извержения в целом и отдельных его этапов. Повышение в тропосфере концентрации диоксида серы происходит практически при всех крупных извержениях вулканов, что было отмечено в ряде работ (Пуленко и др., 1981; Bluth et al., 1992; Delgado-Granados et al., 2001; Stoiber et al., 1987).

Для глобального мониторинга диоксида серы используются данные, получаемые с целого ряда инструментов, установленных на искусственных спутниках Земли, которые используют отраженный солнечный свет в ультрафиолетовом диапазоне для определения концентраций SO_2 (Мельников, 2008; Prata, Bernardo, 2007; Yang et al., 2007). Наиболее предпочтительными, за счет своих технических характеристик, являются данные, получаемые инструментом OMI (Ozone Monitoring Instrument), который способен осуществлять ежедневный глобальный мониторинг состояния атмосферы в диапазоне 270–500 нм длины волны и спектральным разрешением 0.5 нм с пространственным разрешением 13×24 км. Частота повторения орбиты спутника 1 раз в сутки.

Кроме того, получить информацию о диоксиде серы можно на основе данных инфракрасного спектрометра высокого разрешения AIRS (спутник Aqua). В этом диапазоне характерно интенсивное поглощение молекул диоксида серы в спектральном окне, равном примерно 7.34 мкм (Thomas et al., 2011). Одно из главных отличий между данными этих приборов заключается в том, что для спектрометров, работающих в ультрафиолетовом диапазоне необходим интенсивный солнечный свет. При его недостатке измерения проводить невозможно. Для инфракрасного диапазона таких ограничений нет, однако в этом диапазоне чувствительность определения диоксида серы несколько меньше чем в ультрафиолетовом.

С привлечением данных полученных со спектрометров AIRS и OMI был проведен анализ динамики извержений вулкана Кизимен в 2010–2011 гг.

Первое крупное эксплозивное событие было зафиксировано сетью сейсмических станций Камчатского филиала геофизической службы (КФ ГС) РАН 12 декабря в 19:49 UTC продолжительностью около 20 минут. Пеплопад отмечался в поселках Козыревск и Тигиль на расстоянии 110 км и 310 км (к ССЗ от вулкана), соответственно (Дрознин и др., 2011).

ИЗВЕРЖЕНИЕ 2010-2011 гг. КАМЧАТСКОГО ВУЛКАНА КИЗИМЕН

Уже в 01:47 UTC 13 декабря (то есть через 6 часов после извержения) на снимке AIRS было зарегистрировано большое облако с высокими концентрациями диоксида серы. Его площадь составила 28903 км² при общей массе SO₂ равной 15.8 кт. Облако имело вытянутую в широтном направлении форму и находилось над северо-западной частью Камчатки и югом Магаданской области.

После небольшого затишья, следующее крупное событие произошло 31 декабря в 17:56 UTC (по сейсмическим данным КФ ГС РАН). В Петропавловске-Камчатском 1 января 2011 года отмечалось выпадение тонкого слоя алевритового пепла серого цвета. Движение пе-

плового облака происходило сначала в южном направлении до мыса Лопатка, после чего траектория движения облака сместилась в сторону Тихого океана и менее чем через сутки облако достигло побережья Аляски. Зарегистрированная масса диоксида серы в нем составила примерно 20 кт. Проследить траекторию движения облака можно по серии спутниковых снимков спектрометра AIRS. Первый из снимков зафиксировал облако диоксида серы в 02:11 UTC 1 января 2011 г., то есть примерно через 8 часов после начала извержения (рис. 3). Согласно модели траектории движений воздушных масс и переноса частиц пепла (HYSPLIT), высота облака в этот момент составляла около 6 км над уровнем

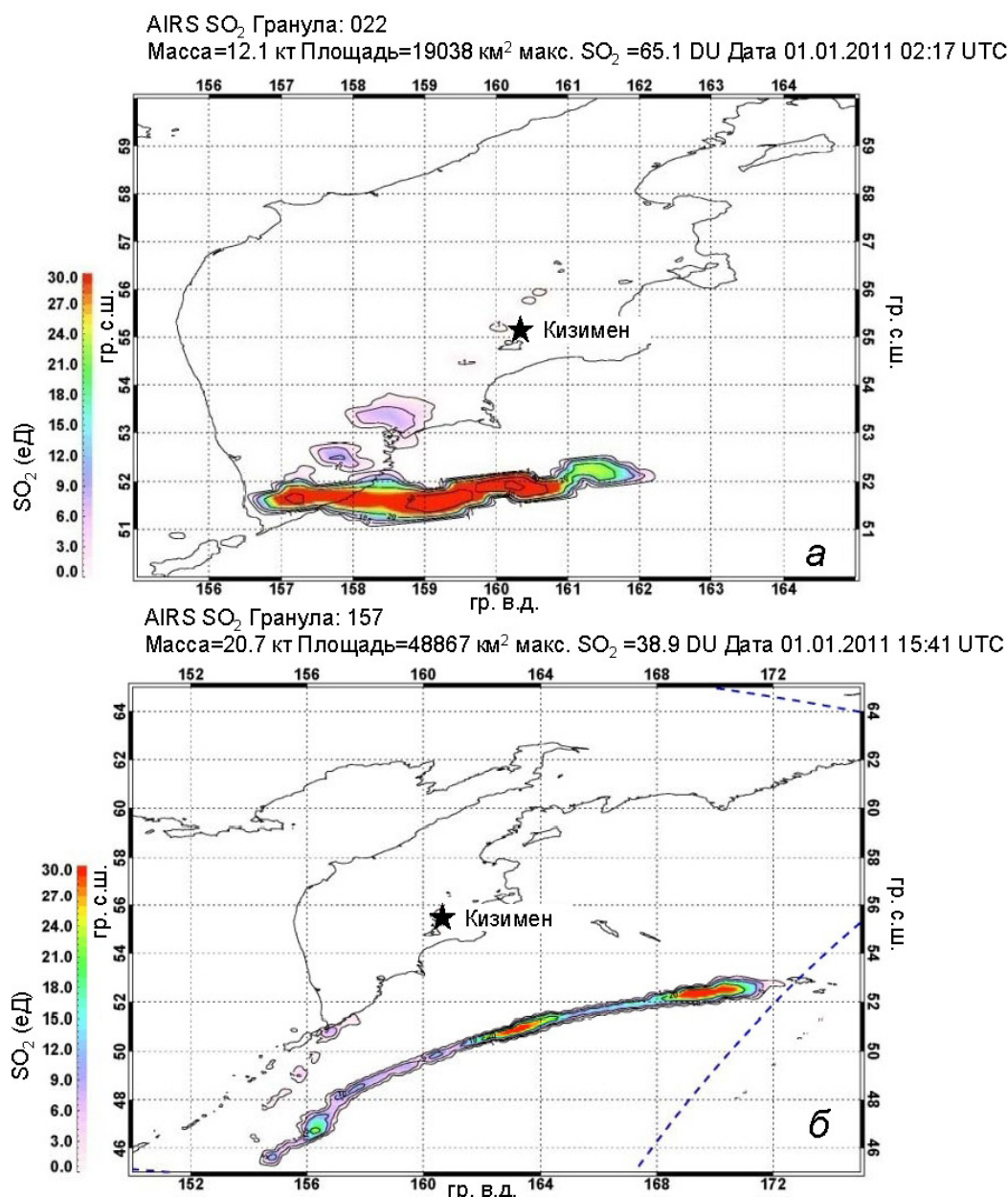


Рис. 3. Траектория распространение пеплового облака содержащего высокие концентрации диоксида серы в результате эксплозивного извержения вулкана Кизимен 31 декабря 2010 г.: *а* – снимок за 02:11 UTC 1 января 2011, масса SO₂ – 12 кт; *б* – снимок за 15:41 UTC 1 января 2011, масса SO₂ – 20 кт. Концентрации диоксида серы приведены в единицах Добсона (еД).

моря, затем, вероятно, в результате восходящих турбулентных потоков воздуха облако, содержащее диоксид серы, поднялось до абсолютной высоты 8-9 км, смещаясь в сторону Алеутских островов (рис. 4). Согласно анализу инфразвукового сигнала, сопровождавшего это эксплозивное

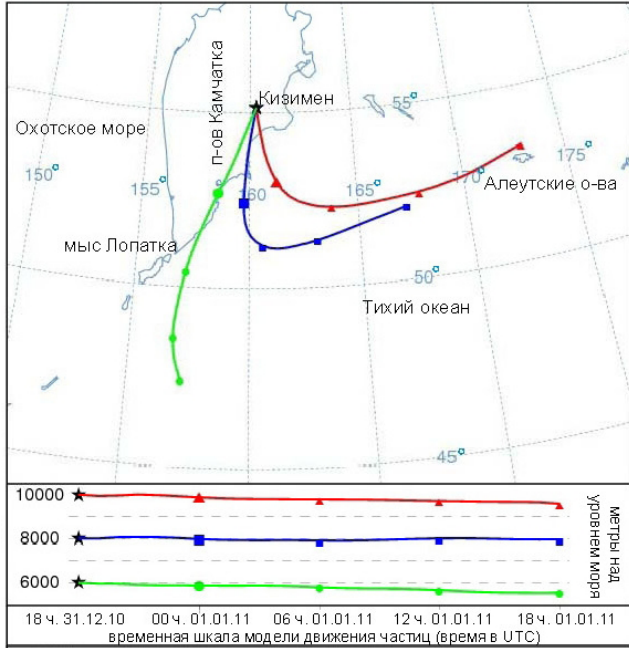


Рис. 4. Метеорологическая модель распространения частиц в атмосфере (HYSPPLIT), показывающая вероятные траектории движения облака содержащего диоксид серы на разных высотных уровнях в результате эксплозивного извержения вулкана Кизимен 31 декабря 2010 г. Модель рассчитана на период продолжительностью 24 часа, начиная с 18:00 UTC 31 декабря 2010 г.

событие, в атмосферу было выброшено около 4×10^6 м³ пепла (Фирстов, Махмудов, 2011).

Эти два эксплозивных события были одними из самых сильных за рассматриваемый период извержения вулкана. По сейсмическим и спутниковым данным, высота пепловых выбросов в этих случаях составляла, вероятно, 10 км над уровнем моря. Возможно, согласно сейсмическим данным, сопоставимыми по мощности были и события 6 и 12 января 2011 г. (Сенюков и др, 2011a), однако на эти даты корректный анализ спутниковых данных был затруднен. Эксплозивные события 31 декабря 2010 г., 6 и 12 января 2011 г. были зафиксированы Всемирной сетью локации гроз (WWLLN) в виде разрядов молний (Чернева и др., 2011).

Примерно с марта 2011 г. появилась возможность (увеличилась интенсивность солнечного света) использовать данные прибора OMI. Над территорией Камчатки орбита спутника AURA, на котором установлен прибор, проходит в интервале 12-14 часов местного времени. Общая масса диоксида серы, зафиксированная на момент пролета спутника AURA над территорией Камчатки за период с марта по октябрь 2011 г., достигает 140 кт. Вероятно, эта цифра составляет лишь $\sim 1/5$ от реального объема дегазации вулкана, так как частота получения спутниковой информации не была круглосуточной. На графике зависимости массы диоксида серы и площади пепло-газовых шлейфов выделяются несколько событий с высокой концентрацией газа (большая масса при малых площадях), которые, вероятно, могут свидетельствовать о повышенной активности вулкана (рис. 5).

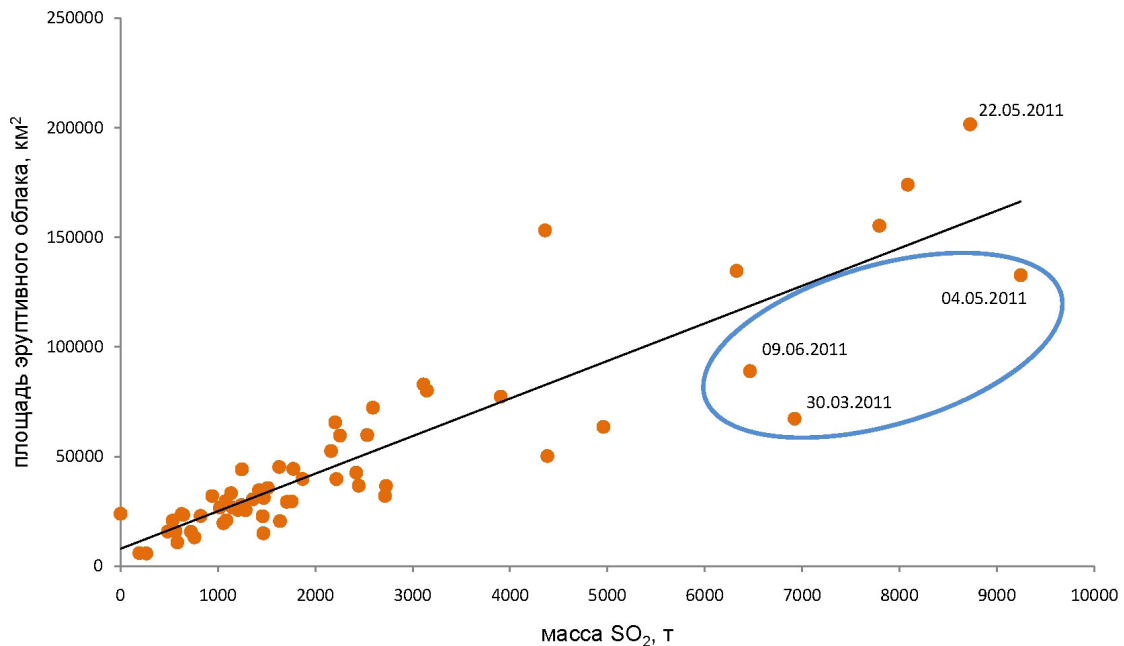


Рис. 5. График отношения площади эруптивного облака к массе диоксида серы (на основе данных OMI).

ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЙ
ЭФФЕКТ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА
КИЗИМЕН ПО ДАННЫМ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
(ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ)

До 2010 г. Институтом вулканологии ДВО (ДВНЦ) РАН аэрофотосъемка вулкана Кизимен и прилегающих территорий производилась дважды – 8 августа 1979 г. (рис. 6) и 27 июля 1989 г. Съемка 1979 г. выполнена на пяти параллельных перекрывающихся на 30% маршрутах с высоты 4000 м аэрофотоаппаратом АФА-ТЭ 100 с фокусным расстоянием 98.82 мм. Съемкой охвачена площадь 20×20 км с постройкой конуса Кизимена в центре. Центральный маршрут отснятой площади представлен на рис.6. Повторная аэросъемка 1989 г. выполнена с теми же параметрами, но более совершенным аппаратом ТАФА-10. Данные материалы использовались авторами работы (Мелекесцев и др., 1992), в которой подробнейшим образом представлено структурное положение, геологическое строение и морфология вулкана.

Изменение строения вершины и конуса вулкана. Фотограмметрическая обработка аэроснимков 21 ноября 2010 г. (рис. 7) показала первые, еще 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 ЮВ привершинного участка склона.

Одна из впадин, открытая на ЮВ, скорее всего, является кратером вулкана Кизимен, возникшим некогда (предположительно в 1928-1929 гг.) в результате взрыва на месте восточной

половины самого молодого вершинного экструзивного купола (рис. 8). Его размеры в плане 110×154 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 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 м².

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 ВЗ. 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, зафиксировать точно выходы фумарол оказалось невозможно. Однако можно утверждать, что расположены они в пределах термальных площадок, отображенных на рис. 8. Общая площадь прогрева поверхности в северо-

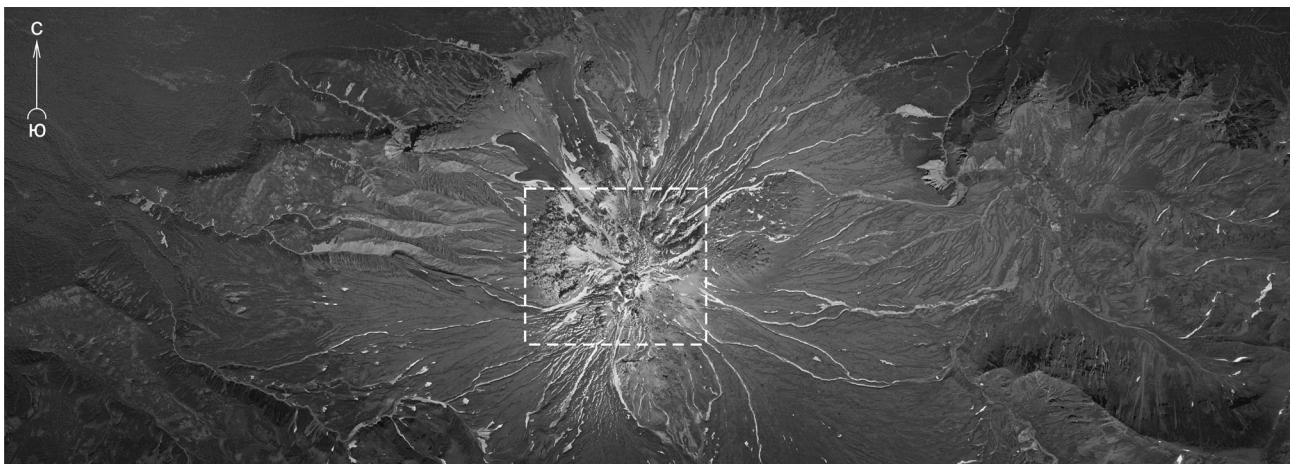


Рис. 6. Центральный маршрут площадной аэрофотосъемки вулкана Кизимен, выполненной ИВ ДВНЦ АН СССР 8 августа 1979 г. Контуром отмечены границы аэрофотоснимка для рис. 7.

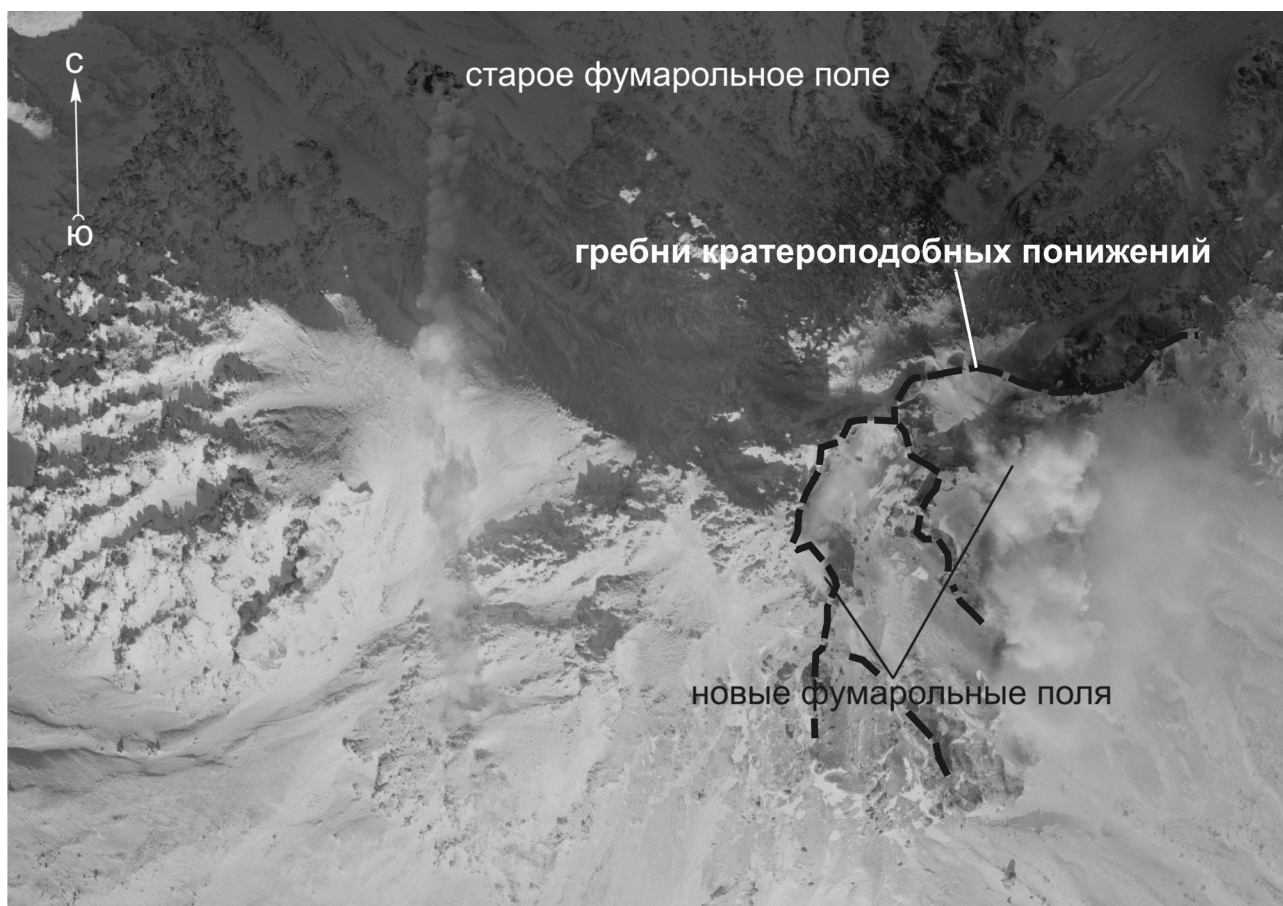


Рис. 7. Плановый аэрофотоснимок вершины вулкана Кизимен 21 ноября 2010 г., выполненный ИВиС ДВО РАН.

восточной впадине составила 5440 м². По-видимому, возникновение новых термальных площадок и новых фумарол сопровождалось слабыми эксплозиями. Следствием этих событий является пепел, покрывший вершину вулкана (рис. 7).

Старое фумарольное поле, расположенное на термальной площадке (средняя высота — 1953 м и площадь — 1850 м²) северо-западного склона вулкана, осталось без заметных изменений. Не изменилась существенно и активность его фумарол. Протяженность видимой части парогазового шлейфа старого фумарольного поля 21 ноября 2010 г. не превысила 200 м.

Отложения ювенильных пирокластических лавин. Первый этап извержения (декабрь 2010 — март 2011 гг.) характерен выносом большого количества пирокластического материала с образованием крупных ювенильных пирокластических лавин. Направление движения материала лавин было предопределено строением вершины вулкана. Ее западную, самую высокую часть венчал экструзивный купол, защищавший от выбросов материала извержений западные склоны. Действующий кратер вулкана располагался в восточной части вершины и был полностью открыт в сторону ВЮВ склонов

конуса. Именно на этих склонах конуса вулкана и у подножия образовалось обширное поле отложений раскаленных обломочных лавин и ювенильных пирокластических лавин.

Единственной возможностью хоть как-то оценить последствия первых восьми месяцев извержения явилось использование изображений спутника Terra ASTER (рис. 9). По стереопаре снимков от 5 сентября 2011 г., имеющих пространственное разрешение 15 м, установлено, что поле основных отложений пирокластике сформировалось на площади 11.3 км². Максимальная протяженность этого поля от кратера составила 4.9 км и была ограничена подножием отрогов хребта Тумрок. Наибольшая ширина в средней части, на высоте около 1300 м, близка к 4.7 км.

По отражательной способности в пределах поля отложений лавин можно выделить три участка. Первый — восточный, наиболее светлый по тону и первый по времени формирования, имеет площадь 6 км². Его границы, как и границы других участков, показаны на схеме (рис. 10).

Второй — южный, с меньшей отражательной способностью отложений, имеет площадь 2.0 км².

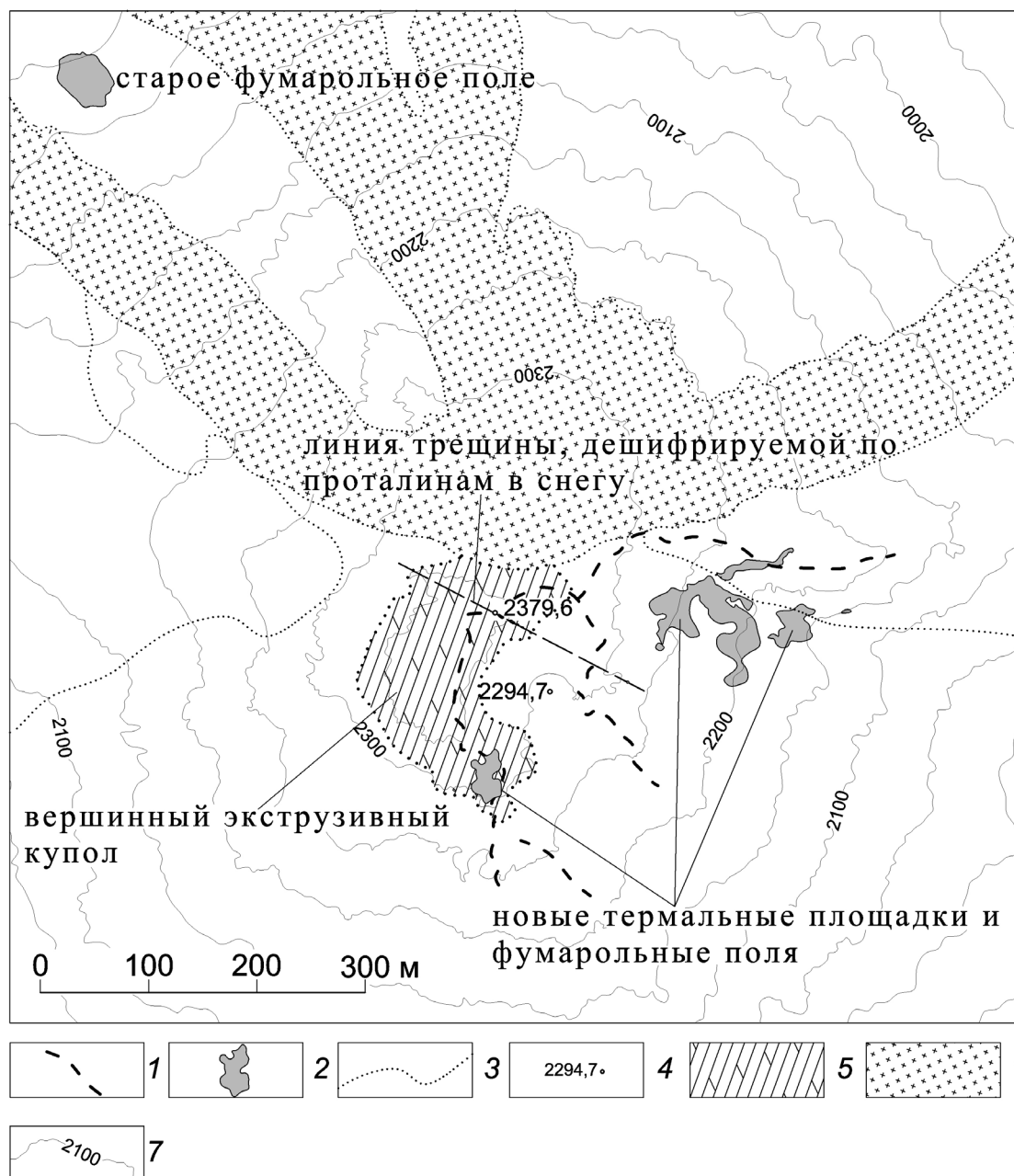


Рис. 8. Строение вершины вулкана Кизимен 21 ноября 2010 г.: 1 – Границы понижений рельефа вершины, в пределах которых возникли новые fumarолы и термальные площадки; 2 – термальные площадки и fumarольные поля; 3 – контуры лавовых потоков; 4 – абсолютные отметки; 5 – вершинный экструзивный купол; 6 – андезибазальтовые лавовые потоки IV цикла извержений.

Третий, наиболее темный, юго-восточный, расположен между первыми двумя. Его площадь составляет 3.3 км². Данный участок хвостами лавин перекрывает смежные границы первых. Накопление материала на этом участке проходило практически на протяжении всего периода извержения. Наиболее крупная одноактная порция пирокластического материала отложилась, вероятно, в результате эксплозивных событий 31 декабря 2010 г. и 6-7 января 2011 г.

В результате дешифрирования инфракрасных каналов прибора ASTER (снимок 7 января

2011 г.) были определены поля температур пирокластических отложений (рис. 2). Наибольшие значения зафиксированы у восточного подножия вулкана в истоках руч. Поперечного. Эти значения могут быть объяснены большими значениями мощности и теплоемкости пирокластики.

На бугристой поверхности всех трех участков отчетливо просматриваются конусы выноса отдельных лавин с характерной для них выпуклой поверхностью.

Оценить точно мощность поля отложений пирокластических лавин по стереомодели на

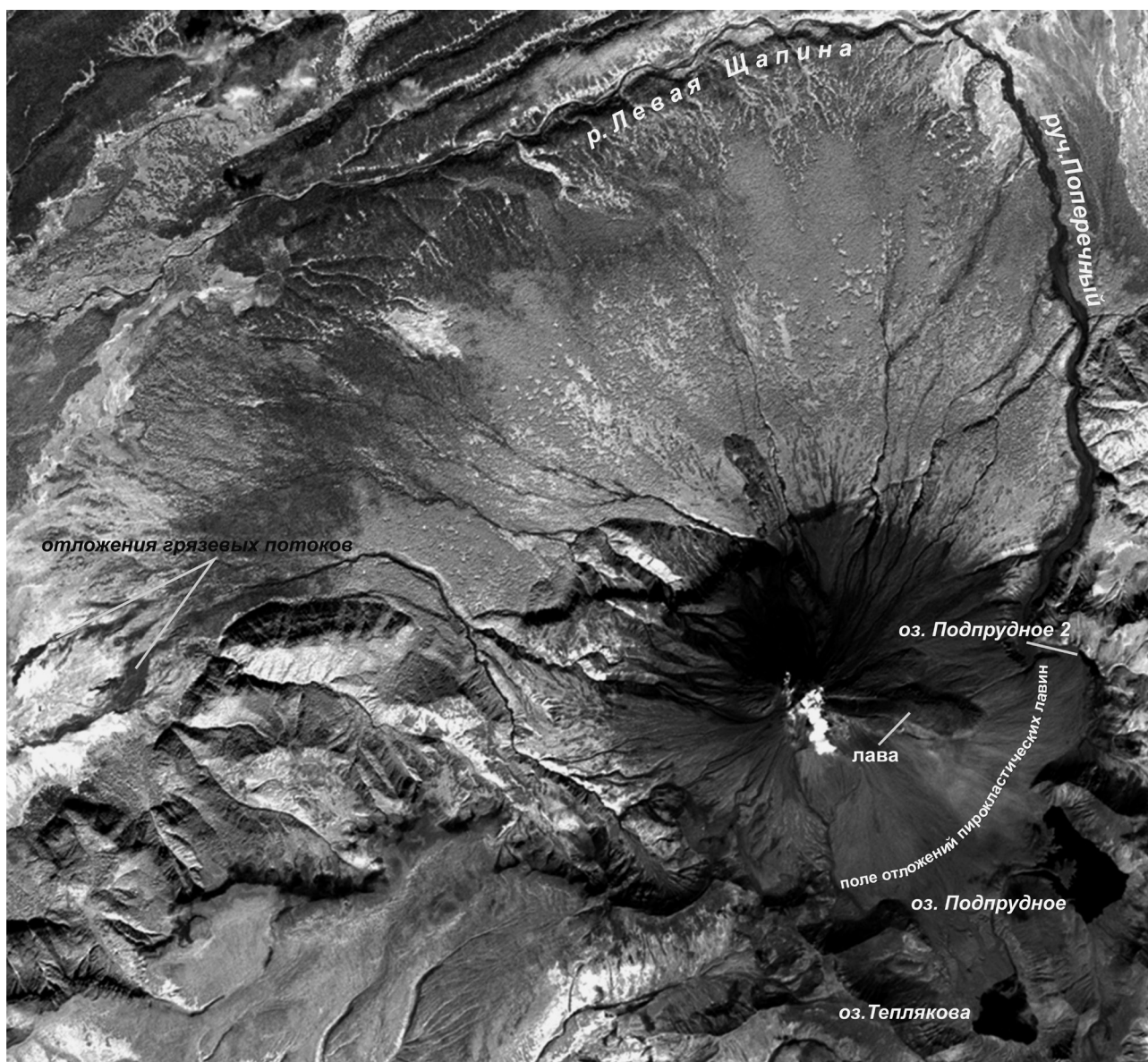


Рис. 9. Последствия извержения вулкана Кизимен к 5 сентября 2011 г. на спутниковом снимке Terra ASTER.

основе снимков ASTER – невозможно, ввиду их низкого разрешения и особенностей геометрии построения сканерного изображения. Но по косвенным признакам, например, по степени заполнения врезов, глубину которых мы точно установили по аэроснимкам 1989 г., можно почти уверенно называть цифры от первых метров вблизи вершины до 30 м в районе повышенной аккумуляции отложений фронтальных частей описанных участков.

По стереомодели, на основе спутникового снимка Terra ASTER, выделяются еще два небольших обособленных участка отложений пирокластических лавин у юг-юго-западного подножия конуса вулкана. Один, площадью около 1 км² при длине 600 м, и второй, более юго-восточный (3,2 км² при длине 1,5 км), отложения которого полностью перекрыли акваторию озера Михеева (рис. 10).

Большая часть остальной поверхности конуса вулкана Кизимен в пределах границ, обозначенных на схеме (площадь около 10 км²), покрыта сложно построенным чехлом из тефры разной мощности и крупности, пирокластике из парогазовых туч, поднимавшихся над движущимися пирокластическими потоками, и пирокластике, снесенной ветром с незадернованной поверхности вновь возникших равнин, раскаленных обломочных лавин и ювенильных пирокластических лавин.

Грязевые потоки. Кроме пирокластических лавин по большинству крупных понижений в рельефе конуса Кизимена (барранкосы, русла постоянных и временных водотоков), по видимому, преимущественно в зимне-весеннее время прошли грязевые потоки.

Крупнейший грязевой поток, основной материал которому дали пирокластические от-

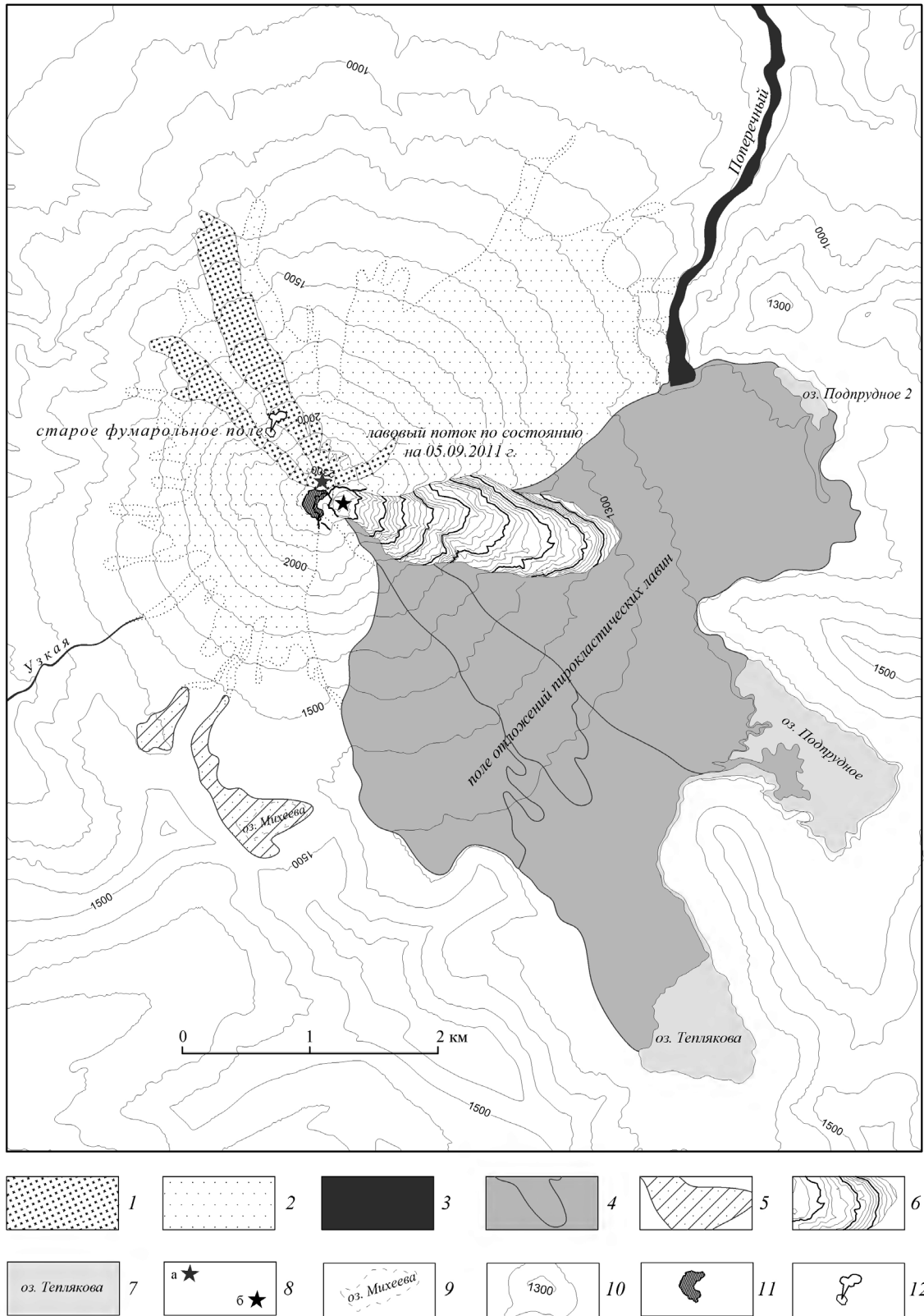


Рис. 10. Схема последствий извержения вулкана Кизимен к 5 сентября 2011 г.: 1 – андезибазальтовые лавы четвертого цикла извержений; 2 – маломощные отложения пепла и перенесенного ветром материала пирокластических лавин; 3 – отложения пирокластических и грязевых потоков; 4 – основное поле отложений пирокластических лавин мощностью от первых до десятков метров; 5 – области отложений обособленных пирокластических лавин; 6 – лавовый поток, сформировавшийся к 05.09.2011 г.; 7 – озера; 8 – центры последних излияний лавы: а – IV цикла извержений; б – действующий в настоящее время; 9 – погребенное под отложениями пирокластических лавин озеро Мухеева; 10 – горизонталы и их отметки; 11 – вершинный экстривный купол; 12 – старое фумарольное поле.

ложения, основательно изменил нижнюю часть долины руч. Поперечного, заполнив ее на всем протяжении (9.7 км) вплоть до реки Левая Шапина (рис. 9). Отложения грязевого потока перекрыли устья водотоков, впадавших прежде в руч. Поперечный. В итоге по границе грязевых отложений возникла масса небольших озер.

Довольно крупное (площадь 1.5 км²) поле отложений грязевых потоков сформировалось в среднем течении р. Узкая, у западного подножия конуса вулкана на расстоянии 10.1 км от вершины (рис. 9).

Озера. В зоне, оказавшейся наиболее подверженной воздействию процессов, сопровождающих извержение, до его начала, существовали два озера – Теплякова и Михеева. Пирокластические лавины практически не изменили конфигурацию береговой линии и размеры озера Теплякова, но их отложения полностью перекрыли русло руч. Поперечного на участке, начинающемся ниже 2.3 км от его истока, т.е. от озера.

Возникшая ситуация привела и к образованию новых подпрудных озер. Одно из них, самое крупное – близкое по площади к озеру Теплякова (0.8 км²), возникло выше пирокластической плотины (рис. 9, 10). Второе, существенно меньшее по размерам озеро (0.07 км²), образовалось вблизи северо-восточной оконечности основного поля отложений пирокластических лавин. Как отмечено ранее, небольшие по размерам озера появились в устьях ручьев, упиравшихся в отложения грязевого потока в русле руч. Поперечного. Озеро Михеева, имевшее до извержения размеры 570×250 м и площадь 0.09 км², исчезло полностью, будучи, погребено под отложениями пирокластике.

Лава. Процесс извержения вулкана Кизимен почти непрерывно сопровождался выделением из кратерной зоны широкого парогазового шлейфа, практически постоянно закрывавшего вершину вулкана не только для аэрокосмических, но и для наземных наблюдений. По этой причине точное время появления в кратере начальных порций лавы неизвестно. Первые фрагменты свежего лавового материала в районе вершины были не очень уверенно выявлены по снимкам, сделанным С.Б. Самойленко во время облета вулкана 3 марта 2011 г. Также, можно предполагать (по сообщению О.А. Гириной), что лавовый поток начал выжиматься еще раньше – с конца января 2011 г. С тех пор, до момента получения снимков ASTER, то есть почти ровно за полгода, на восточном склоне конуса вулкана сформировался и спустился до высоты 1300 м крупный лавовый поток (рис. 9, 10). К 5 сентября 2011 г. его длина (в плане) достигла 2250 м при наиболь-

шей ширине в средней части 700 м. Площадь потока (также в плане) равна 1.16 км², а объем составил 0.062 км³. Средняя мощность потока по этим данным составит 53 м при наибольшей, измеренной по отвесной линии, близкой к 150 м. На протяжении верхней половины потока отчетливо просматриваются (по стереомодели) бортовые валы, высота которых не менее 20 м.

Лавовый поток, находится сейчас еще в стадии формирования. По форме он глыбовый, каплевидный, мощный (до 100–150 м), что было подтверждено сотрудниками ИВиС ДВО РАН в ходе планового облета вулкана с проведением аэрофотосъемки 11 декабря 2011.

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ДИНАМИКИ ЭРУПТИВНОЙ АКТИВНОСТИ

Одной из главных характерных особенностей извержения 2010–2011 гг. вулкана Кизимен была длительная (с июля 2009 г. до начала декабря 2010 г.) и интенсивная сейсмическая подготовка (Сенюков и др., 2011б). До этого одиночные землетрясения тоже происходили здесь, но достаточно редко. Частые землетрясения сопровождали и само извержение, которое можно разделить на два главных этапа. Первый – взрывная стадия с большим количеством изверженного материала, пирокластическими лавинами, протяженными пепловыми шлейфами: декабрь 2010 – май 2011 гг. В этот же период начинается излияние лавового потока. Второй этап включает в себя интенсивное излияние лавового потока при ослаблении взрывной активности. Так, например, согласно данным дешифрирования спутниковых снимков Terra ASTER, протяженность потока увеличилась на 550 м за период с 3 июля по 5 сентября 2011 г., а средняя скорость составила около 9 м/сутки.

С середины июня на спутниковых снимках перестают регистрироваться пепловые шлейфы. Однако до конца октября продолжают мощные эмиссии диоксида серы (по спутниковым данным).

Интересное событие произошло спустя практически год после начала взрывной стадии извержения. Сетью сейсмических станций КФ ГС РАН 13 декабря 2011 г. на протяжении нескольких часов регистрировались поверхностные сейсмические события (http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/archiv/2011/Dec/13_Dec.htm), которые, вероятно, сопровождалась пирокластическими потоками и пепловыми выбросами до 7 км над уровнем моря. На спутниковых снимках (спутниковые данные Terra MODIS, NOAA AVHRR) регистри-

ровался широкий (до 30 км) пепловый шлейф протяженностью примерно 100-150 км, протягивавшийся в юго-восточном направлении от вулкана (по информации группы KVERT, http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/updates/2011/12/KamAct_67-11.html). Обычно, для подобных по размерам и морфологии пепловых шлейфов характерно наличие значительных концентраций диоксида серы (до нескольких кило тонн), но на спутниковом снимке AIRS (14 декабря 2011 г. 01:53 UTC), который тождественен по времени спутниковым снимкам, на которых идентифицирован пепловый шлейф, было зафиксировано только около 100 т SO₂, что крайне мало для подобных взрывных событий. Мы предполагаем, что источником этого пеплового шлейфа преимущественно явились раскаленные обломочные лавины, образованные в результате обрушения крупного блока лавового потока. Процессы обрушения лавового потока и образование пирокластических лавин также зафиксированы видеоданными КФ ГС РАН, которые передаются в режиме реального времени с небольшого удаления от вулкана Кизимен (база «Тумрок»). Истинная причина этого события на данный момент времени окончательно не установлена. Вероятно, триггером этого обрушения могло явиться сейсмическое событие, или излившаяся новая порция лавового потока, которое спровоцировало обрушение более старых его частей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная статья, в которой сделана попытка описать последствия продолжающегося извержения 2010-2011 гг. вулкана Кизимен по результатам анализа данных, полученных с помощью только дистанционных методов, — одна из первых работ такого рода в отечественной вулканологии. Причем попытка вынужденная, так как наземными полевыми методами это извержение до сих пор, по разным причинам (удаленность вулкана, отсутствие необходимых финансовых средств и др.) изучено слабо, несмотря на то, что оно идет уже больше года. Поэтому вполне естественно, что некоторая часть изложенных в статье представлений носит предварительный характер. В особенности те, которые обязательно требуют подтверждения наземными исследованиями или высококачественной аэрофотосъемкой: определения точного происхождения и строения толщ, слагающих откартированные поля пирокластики, соотношения в них ювенильного и резургентного материала, оценки мощностей и крупности выпавшей в районе вулкана и за его пределами пирокластики и др.

Однако это не относится к тем данным, которые можно было получить только с помощью дистанционных методов: движение пепловых шлейфов, содержание в них диоксида серы, картирование площадей поверхностных температур пирокластических отложений и лавового потока. 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 при решении подобных задач.

Авторы благодарят своих коллег за информацию и плодотворное обсуждение данных о ходе извержения (В.А. Дроздина, И.К. Дубровскую, А.Ю. Озерова, А.А. Овсянникова, О.А. Гирину, А.В. Сокоренко, Н.А. Малик, В.В. Яшука), за доступ к коллекции отобранных образцов продуктов извержения (А.А. Овсянникова, С.Б. Самойленко, Н.А. Малик, А.П. Максимова). Особую благодарность за предоставленные спутниковые данные Terra ASTER выражаем сотруднику Аляскинской вулканологической обсерватории Рикку Весселсу (Rick Wessels), а за предоставленные программные алгоритмы обработки данных спектрометров OMI и AIRS Саймону Карну (Simon Carn) и Фреду Прата (Fred Prata), соответственно.

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. Москва: Наука, 1965. 171 с.
- Двигало В.Н., Свирид 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
- Дитмар К.* Поездки и прибывание в Камчатке в 1851-1855 гг. Петропавловск-Камчатский: Холдинговая компания «Новая книга», 2009. 566 с.
- Дроздин В.А., Малик Н.А., Муравьев Я.Д. и др.* Началось извержение вулкана Кизимен

- (Центральная Камчатка) // Вопросы географии Камчатки. 2011. № 13. 7-12 с.
- 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 – марте 2011 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 1. Вып. 17. С. 7-10.
- Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Волынец О.Н.* Вулкан Кизимен (Камчатка) - будущий Сент-Хеленс? // Вулканология и сейсмология. 1992. № 4. С. 3-32.
- Мельников Д.В.* Применение данных OMI/Aura для задач мониторинга извержений вулканов Камчатки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 1. С. 371-375.
- Пийп Б.И.* О раскаленных агломератовых потоках вулкана Авачи и о типе извержения этого вулкана // Бюл. вулканол. станций на Камчатке. 1946а. № 12. С. 18-28.
- Пийп Б.И.* Вулкан Кизимен // Бюл. вулканол. станций на Камчатке. 1946б. № 13. С. 22-32.
- Руленко О.П., Липовка А.В., Коднянская Л.И.* Изменение содержания сернистого газа в воздухе Петропавловск-Камчатского и г. Елизово, связанного с активностью вулкана Карымского в 1979 г. // Вулканология и сейсмология. 1981. № 4. С. 105-108.
- 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 // 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. № 2. Вып. 14. 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.
- Чернева Н.В., Holzworth R.H., Иванов А.В. и др.* Перспективы использования всемирной сети локации гроз (WWLLN) для определения пепловых извержений вулканов на Камчатке // Труды третьей научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 415-419.
- Шанцер А.Е., Гентнер А.Р., Егорова И.А. и др.* Вулканогенные 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., Зубин М.И.* Вулкан Кизимен // Действующие вулканы Камчатки: в 2-х т. Москва: Наука, 1991. Т. 2. С. 16-29.
- Bluth G.J.S., Doiron S.D., Schnetzler C.C. et al.* Global tracking of the SO₂ clouds from the June, 1991 Mount Pinatubo eruptions // Geophysical Research Letters. 1992. V. 19. № 2. P. 151-154.
- 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.
- Delgado-Granados H., Cárdenas G., Piedad S.* Sulfur dioxide emissions from Popocatepetl volcano (Mexico): case study of a high-emission rate, passively degassing erupting volcano // JVGR. 2001. V. 108. Is. 1-4. P. 107-120.
- Prata A.J., Bernardo C.* Retrieval of volcanic SO₂ column abundance from Atmospheric Infrared Sounder data // JGR. 2007. V. 112. D20204, doi:10.1029/2006JD007955.
- Stoiber R., Williams S., Huebert B.* Annual contribution of sulfur dioxide to the atmosphere by volcanoes // JVGR. 1987. V. 33. Is. 1-3. P. 1-8.
- Thomas H.E., Watson I.M., Carn S.A. et al.* A comparison of AIRS, MODIS and OMI sulphur dioxide retrievals in volcanic clouds // Geomatics, Natural Hazards and Risk, Special Issue: Passive satellite techniques and ground-based investigations for volcanic activity monitoring. 2011. V. 2. № 3. P. 217-232.
- Yang K., Krotkov N.A., Krueger A.J. et al.* Retrieval of large volcanic SO₂ columns from the Aura Ozone Monitoring Instrument (OMI): comparison and limitations // JGR. 2007. V. 112. D24S43

ИЗВЕРЖЕНИЕ 2010-2011 гг. КАМЧАТСКОГО ВУЛКАНА КИЗИМЕН

**THE 2010-2011 ERUPTION OF KIZIMEN VOLCANO, KAMCHATKA:
DYNAMICS OF ERUPTIVE ACTIVITY AND GEOLOGIC-GEOMORPHOLOGICAL
IMPACT (BASED ON REMOTE SENSING DATA)**

D.V. Melnikov, V.N. Dvigalo, I.V. Melekestsev

Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006; e-mail: dvm@kscnet.ru

Dynamics of the ongoing eruptive activity over the period 2010-2011 on Kizimen Volcano was reconstructed using aero-photo and satellite data. The geological and geomorphological impact of this activity was estimated. As a first approximation, the article provides estimates of degassing of volcano sulfur dioxide (as an index of the intensity of the volcanic processes) and the volume of a fresh lava flow.

Keywords: Kizimen Volcano, remote sensing, sulfur dioxide, eruption, ASTER.