

Спутниковые данные высокого разрешения для уточнения положения разломных зон в пределах Ключевской группы вулканов Камчатки

О.А. Гирина

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
Петропавловск-Камчатский, 683006, Россия
E-mail: girina@kscnet.ru*

Ключевская группа вулканов Камчатки уникальна во многих отношениях: она включает 13 вулканов, четыре из которых действующие, здесь находится самый молодой и активный вулкан Камчатки – Ключевской; в пределах относительно небольшой территории группы отмечается распространение контрастного (базальтового и андезитового) вулканизма. На основании анализа комплекса спутниковых данных среднего и высокого разрешения (MODIS, SRTM, ASTER, Landsat, Метеор-М, Канопус-В и др.), различных опубликованных материалов и собственных вулканологических исследований автора, в работе приведена уточненная схема расположения основных разломных зон в районе Ключевской группы вулканов. Все разломы, показанные на схеме, хорошо выражены на всех рассмотренных спутниковых снимках. Показано, что разломы, когда-либо здесь проявившиеся, являются долгоживущими, их активизация связана с определенными этапами развития Ключевской группы вулканов; формирование стратовулканов группы обязано преимущественно разломам северо-западного, северо-восточного и западно-северо-западного простираний. Например, современная активность вулкана Ключевской связана, вероятно, с разломами северо-западного и северо-восточного простираний; правосторонние сбросо-сдвиговые подвижки по разломам северо-северо-восточного простирания, вероятно, привели к обрушению в разное время восточных частей вулканов Острый Толбачик и Камень.

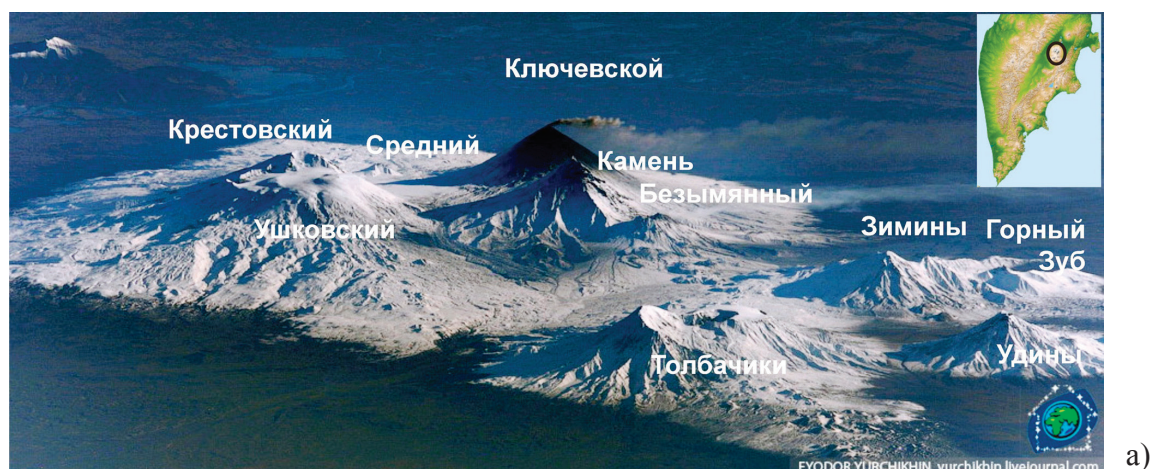
Ключевые слова: спутниковые данные, разломные зоны, Ключевская группа вулканов, Камчатка

*Одобрена к печати: 21.11.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-148-156*

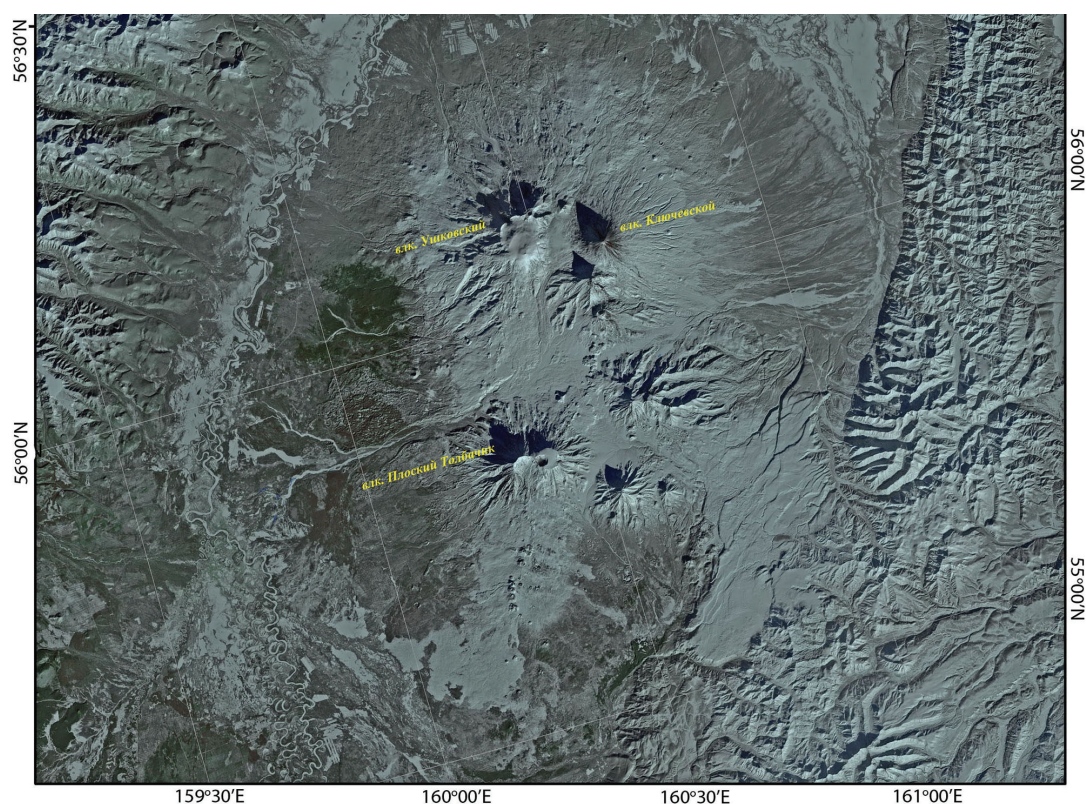
Эксплозивные извержения вулканов являются наиболее опасными в мире в связи с мощной энергетикой эруптивного процесса. Для снижения опасности таких извержений и возможности их предсказания важно знать геологические и тектонические условия формирования вулкана и историю его активности, проводить комплексный мониторинг его деятельности. Рассмотрим тектонические условия развития одной из самых активных в мире Ключевской группы вулканов (КГВ) Камчатки, включающей 13 вулканов (Ключевской, Камень, Безымянный, Ушковский, Крестовский, Средний, Острый Толбачик, Плоский Толбачик, Овальная Зими́на, Острая Зими́на, Горный Зуб, Большая Удина, Малая Удина), четыре из которых действующие: Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик, Ушковский (*рис. 1*).

На Камчатке преобладают разломы северо-северо-восточного (ССВ) простирания и разломы, перпендикулярные к ним – западно-северо-западного (ЗСЗ) (Заварицкий, 1935; Пийп, 1956; Селиверстов, 2009; Супруненко, Декин, 1968; Тихонов, 1963). Субмеридиональное юго-юго-восточное (ЮЮВ) простирание имеет складчатые структуры древних (домеловых и мелового) комплексов: крупнейший Южно-Камчатский и Северо-Камчатский антиклинории и Средне-Камчатский синклинальный прогиб между ними (Тихонов, 1963). Для палеоген-миоцена Камчатки характерна резкая перестройка структурного плана с СЗ на северо-восточное (СВ), разломы такого же направления преобладают и в плиоцен-четвертичное время (Шанцер, 1979; Шанцер, Челебаева, 2005). Общее простирание новейших складчатых структур Камчатки (Срединного и Восточного хребтов, Централь-

ной, Восточной и Западной депрессий) – СВ, места сочленения крупных структур древнего и молодого возраста характеризуются развитием зон разломов, к которым приурочены долгоживущие центры вулканизма, в том числе и молодые вулканы.



а)



б)

Рис. 1. Ключевская группа вулканов Камчатки: а) фото Ф. Юрчихина с МКС (на врезке – схема расположения района исследований); б) спутниковый снимок Landsat-8 от 22.02.2016, 00:20 GMT, предоставленный ДЦ ФГБУ «НИЦ Планета»

Геофизические исследования Центральной Камчатской депрессии (ЦКД) показали её блоковое строение, сформированное под влиянием СЗ и субширотных (например, Толбачинско-Андриановской, Щапинско-Чажминской) глубинных разломных зон (Иванов и др., 2001; Ермаков, 1977; Селиверстов, 2009; Шанцер, Челебаева, 2005; и др.). Предполагается, что современная сводово-глыбовая структура КГВ, интенсивное развитие разломов СВ

и субширотного простираения, меньшая активность разломов СЗ и меридионального простираения, оживление в разные эпохи разломов определенных направлений, сопряженность одной разломной зоны с другой, длительность вулканической активности района связаны с неравномерностью субдукционных процессов на пересечении Курило-Камчатской и Алеутской вулканических дуг и Императорского хребта (Глубинное строение..., 1976; Гонтовая и др., 2014; Ермаков, 1977; Ермаков и др., 1974; Иванов и др., 2001; Иванов, Горельчик, 1976; Кулаков и др., 2016; Пийп, 1956; Супруненко, Декин, 1968; Тихонов, 1963; Шанцер, 1979; и др.). Согласно работам (Ермаков, 1977; Иванов и др., 2001; Иванов, Горельчик, 1976; Шанцер, 1979 и др.), главные разломы, рассекающие КГВ на ряд мозаичных глыб, определившие расположение и характер вулканизма Толбачинского и Ключевского эруптивных центров, разделенных в свою очередь на более мелкие блоки разломами широтного простираения в западной части района и разломами СЗ направления – в северной, окончательно сформировались в плиоцен-четвертичное время. В пределах КГВ выделяются крупные разломы как линии, но также разломные зоны шириной до 5–10 км, похожие на узкие грабенообразные долины, с амплитудой сбросово-взбросовых подвижек до 1 км и более (Заварицкий, 1935; Иванов, Горельчик, 1976; Пийп, 1956; Супруненко, Декин, 1968).

Благодаря бурному развитию космических исследований, созданию спутников, позволяющих получать изображения поверхности Земли с высоким разрешением и привязкой к координатной сетке, свободному доступу к спутниковой информации в настоящее время можно более детально изучать морфоструктуру труднодоступных территорий планеты, в том числе КГВ. Целью работы являлось сопоставление опубликованных геологических данных и собственных наблюдений автора о разломах и разломных зонах территории КГВ со спутниковыми данными среднего и высокого разрешения для уточнения схемы расположения основных разломных зон в исследуемом районе, а также определения их роли в развитии современной эруптивной деятельности активных вулканов.

На протяжении более 10 лет анализировались данные оптического и инфракрасного диапазонов, в том числе в виде стереоизображений (анаглифы), полученные в различное время года разными спутниками (TERRA и AQUA, SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), SPOT-5, ALOS, ASTER (Advances Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), Landsat, EO-1, Radarsat-1, Метеор-М, Ресурс-П, Канопус-В и др.). Источниками данных были: Интернет (например, сайт NASA (<https://earthdata.nasa.gov/>), в том числе MODIS (<http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/>) и SRTM (<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>); ASTER (GeoGrid data, <https://big.geogrid.org/>), ДЦ НИЦ Планета (<http://www.dvrcpod.ru>) и др.); информационная система VolSatView (Ефремов и др., 2012) и др.

Главными критериями (кроме описанных в литературе геологических, геоморфологических и геофизических) выделения на спутниковых снимках основных разломных зон на территории КГВ были их прямолинейность и протяженность на десятки километров. Например, на всех снимках ASTER, Landsat, Ресурс-П, Метеор-М и др., а на фоне первого снега наиболее четко, проявляются линейно расположенные цепочки шлаковых конусов и лавовых куполов и широкие долины на склонах вулканов; данные SRTM и др. позволили

выделить разломы, по которым происходили обрушения построек вулканов. По мере увеличения качества доступных данных ДЗЗ информация о разломах КГВ уточнялась.

Обсуждение материалов

На основании совместного анализа и сопоставления многочисленных вулканологических и спутниковых данных среднего и высокого разрешения на схеме (рис. 2) показано расположение основных глубинных разломных зон (1–3), связанных с главными структурными планами КГВ (древним и молодым) и ответственных, по мнению автора, за появление и продолжение развития вулканизма в районе КГВ до настоящего времени. Эти глубинные разломные зоны имеют, вероятно, двоякую природу – тектономагматическую. На фоне продолжающихся субдукционных процессов и связанной с ними тектономагматической эволюции КГВ, проявились молодые разломы второго порядка, а также новейшие трещинные зоны. Предполагается, что все разломы главных направлений являются долгоживущими, их активизация связана с определенными этапами развития КГВ.

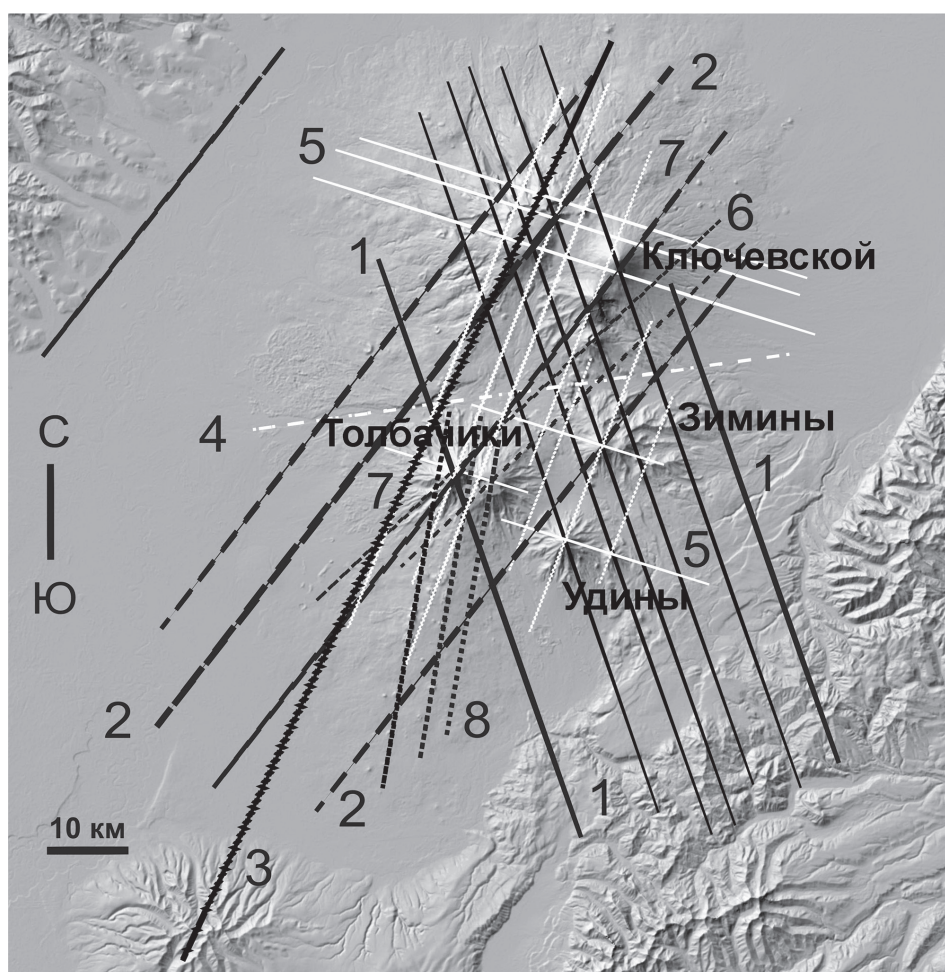


Рис. 2. Схема расположения основных разломных зон в районе Ключевской группы вулканов, Камчатка, на спутниковом снимке SRTM, NASA. Описание в тексте

Разломная зона 1 (глубинная). Крупная разломная зона СЗ субмеридионального простирания (1 на *рис. 2*) является наиболее древней для современной структуры КГВ (Тихонов, 1963), следовательно, на таких разломах формировались наиболее древние вулканы группы. В работе (Влодавец, 1940) выделен такой разлом по долине р. Толуд в районе КГВ (прямолинейный на протяжении почти 20 км), но не объявлен одним из главных. По спутниковым данным, на разломах такого же простирания находятся пьедесталы самых древних вулканов КГВ: Горный Зуб, Малая Удина, Пра-Камень, Пра-Крестовский. Широкие протяженные долины такого же простирания имеются на СЗ склонах влк. Крестовский, Ушковский (ледник Бильченок) и Острый Толбачик, что может указывать на обновление разломов в течение жизни вулканов. Древние влк. Средний и Поворотная и лавовые куполы Малой Удины лежат на линиях такого же простирания. Хорошо выраженная в рельефе трещинная зона на ЮВ склоне влк. Ключевской указывает на долговременность жизни таких разломов.

Разломная зона 2 (глубинная). Линия этого разлома параллельна западной краевой границе ЦКД (2 на *рис. 2*). Подтверждением глубинности этого разлома может служить выявленная в нижней коре вдоль всей ЦКД зона низких значений V_p/V_s (Гонтовая и др., 2014). Вероятно, с ним связаны излияния платобазальтов и продолжение развития оснований влк. Пра-Крестовский и Пра-Ушковский. Зона глубинного разлома 2 до настоящего времени играет важную роль в развитии вулканизма КГВ – в ней сформированы ареальные зоны, протянувшиеся через влк. Толбачик-Ключевской и Ушковский-Крестовский (Иванов, Горельчик, 1976; Пийп, 1956), молодые шлаковые конусы (Херца и Горшкова) на вершине влк. Ушковский.

Разломная зона 3 (глубинная) субпараллельна восточной границе ЦКД – хребту Кумроч (3 на *рис. 2*). На западную краевую часть разломной зоны насажены влк. Николка и Ушковский, на восточную – влк. Большая Удина и Острая Зимины, (разломы отмечаются широкими долинами на склонах этих вулканов).

Разломы второго порядка – коровые (4–5). Разломы 4 – субширотно ориентированные зоны разрывных нарушений: Толбачинско–Андреановская, Студеная-Ключ Тундровый, Ключевская или Крестовская (Супруненко, Декин, 1968). Хорошо выражены на спутниковых снимках сбросы (до 700 м), по которым опущено южное крыло в районе Бараньих скал на правом борту р. Студеная (*рис. 2*).

Разломы 5 ЗСЗ простирания были выявлены по данным ГСЗ и гравиметрии (Глубинное строение..., 1976). На спутниковых снимках выделяется одинаковое простирание разломов, проходящих через вершины двойных влк.: Зимины – Острая и Овальная; Удины – Малая и Большая; Толбачики – Острый и Плоский (5 на *рис. 2*). В зоне разломов 5 отмечаются широкие долины на склонах влк. Ушковский, Острый и Плоский Толбачики, что указывает на оживление разломов с течением времени.

Важно отметить, что разломы 4 субперпендикулярны разломной зоне 1, разломы 5 – разломной зоне 3, возможно, в этом проявляется парагенетическая связь этих пар разломов, и разломы 4 древнее разломов 5.

Разломы третьего порядка (трещинные зоны) (6–8). Разломы 6 – региональные зоны шлаковых конусов КГВ, выделенные Б.И. Пийпом (1956), в районе влк. Ушковский – Крестовский, Толбачик и Ключевской связаны с разломными зонами 1, 2 и 3. Из грабежнообразной шириной около 5 км трещинной зоны, хорошо выраженной на любых спутниковых снимках, происходило излияние мегаплагиофировых лав на ЮВ часть КГВ и в долину р. Студеная (рис. 1, 2). Зона 6 протягивается на ЮВ и В склоны влк. Ключевской, по мнению Б.И. Пийпа (1956), она явилась причиной начала формирования влк. Плоский Толбачик и существования лавового озера в его кратере.

Разломы 7 ССВ простирания в центральной части КГВ хорошо выражены на Толбачинском долу и на ЮЗ склоне влк. Ушковский (рис. 1, 2). Например, на таком разломе в 2012–2013 гг. образовался прорыв им. 50-летия ИВиС ДВО РАН на Толбачинском долу. На разломах такого простирания располагаются вершины влк. Большая Удина и Овальная Зиминая, с одной стороны, и Малая Удина и Горный Зуб, с другой стороны, то есть наиболее молодые и наиболее древние вулканы в своих группах, что указывает на реальность существования таких разломов. Кроме этого, правосторонние сбросо-сдвиговые подвижки по разломам 7, вероятно, привели к обрушению в разное время вершинных частей влк. Острый Толбачик и Камень; к оседанию восточных подножий влк. Ушковский и Острый Толбачик – линии разломов и ступени сбросов явно выражены в рельефе и на спутниковых снимках (рис. 1). Вероятно, при правосторонних сбросовых подвижках по разлому 7 произошло образование цепочки экстррузивных куполов Плотины (западная часть этой цепи поднята, восточная опущена), и на продолжении этого разлома, началось формирование влк. Безымянный.

Разломы 8 в виде протяженных трещин, на которые насажены молодые шлаковые конусы, хорошо проявляются на Толбачинском долу (рис. 1, 2). Например, на разломе такого простирания образовался Северный прорыв 1975 г. Вероятно, активизация разломов 7 и 8 на Толбачинском долу оказывала воздействие на разломную зону 6, что не раз приводило к исчезновению лавового озера после формирования кальдер обрушения на вершине влк. Плоский Толбачик (Пийп, 1956).

Примеры взаимосвязи тектоники и современных извержений вулканов КГВ

В связи с нахождением КГВ в активной зоне сочленения Курило-Камчатской и Алеутской дуг все разломы, когда-либо здесь проявившиеся, являются долгоживущими. Вероятно, что активизация разломов одних направлений может опосредованно приводить к повышению или снижению активности разломов других направлений, это отражается на деятельности вулканов КГВ. Например, рассмотрим последовательность событий, связанных

с разломной зоной **6** и сопряженными с ней разломами: в 1941 г. юго-западнее вершины влк. Плоский Толбачик, вероятно, в разломной зоне **2** на пересечении разломов **6** и **8**, произошло образование шлакового конуса и излияние лавового потока; в 1945 г. на пересечении разломов **1** и **2** – сильное вершинное извержение влк. Ключевской; в 1945, 1946, 1951 и 1953 гг., вероятно, под влиянием разлома **1** в разломной зоне **6** образовались прорывы на восточном склоне влк. Ключевской. Активизация протяженной разломной зоны **6** и разлома **1** спровоцировала, вероятно, пробуждение после многолетнего сна влк. Безымянный в октябре 1955 г. Последовавшая за этим активизация разлома **7** привела к правостороннему смещению блоков коры в районе Безымянного и катастрофическому взрыву 30 марта 1956 г., разрушившему вулкан. Дальнейшая деятельность влк. Безымянный (рост экстрезивного купола в кратере) также была связана с активностью разломной зоны **6** и разлома **1**. Другой пример: возможно, в связи с продолжительными извержениями базальтов в районах влк. Ключевской (1.09.2012–15.01.2013, 15.08.2013–20.12.2013, 01.01.2015–24.03.2015 и 03.04.2016–06.11.2016) и Толбачинского дола (27.11.2012–15.09.2013) андезитовый влк. Безымянный не извергается с 01.09.2012.

Выводы

1. Применение спутниковых данных среднего и высокого разрешения позволило существенно дополнить имеющиеся схемы расположения основных разломных зон Ключевской группы вулканов.

2. Совместный анализ вулканологических и спутниковых данных дал возможность оценить роль некоторых разломных зон в развитии современной эруптивной деятельности активных вулканов КГВ. Исследования в этом направлении продолжаются.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 16-17-00042).

Литература

1. *Влодавец В.И.* Ключевская группа вулканов // Тр. Камч. вулканол. ст. Вып. 1. 1940. 124 с.
2. Глубинное строение, сейсмичность и современная деятельность Ключевской группы вулканов. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. 148 с.
3. *Гонтовая Л.И., Сеньюков С.Л., Назарова З.А.* Глубинная структура Ключевской группы вулканов в результатах сейсмической томографии // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы региональной конференции, посвященной Дню вулканолога, 27–28 марта 2014 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 157–162.
4. *Ермаков В.А.* Формационное расчленение четвертичных вулканических пород. М.: Недра, 1977. 224 с.
5. *Ермаков В.А., Милановский Е.Е., Таракановский А.А.* Значение рифтогенеза в формировании вулканических зон Камчатки // Вестник МГУ. Сер. геологич. 1974. № 3. С. 3–20.
6. *Ефремов В.Ю., Гирина О.А., Крамарева Л.С., Лупян Е.А., Маневич А.Г., Матвеев А.М., Мельников Д.В., Прошин А.А., Сорокин А.А., Флитман Е.В.* Создание информационного сервиса «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 155–170.
7. *Заварицкий А.Н.* Северная группа вулканов Камчатки. М.-Л.: АН СССР, 1935. 55 с.
8. *Иванов Б.В., Горельчик В.И.* Тектоника, сейсмичность и вулканизм Ключевской группы вулканов // Глубинное строение, сейсмичность и современная деятельность Ключевской группы вулканов. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 42–51.

9. Иванов Б.В., Попруженко С.В., Апрельков С.Е. Глубинное строение Центрально-Камчатской депрессии и структурная позиция вулканов // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 45–57.
10. Кулаков И.Ю., Кукарина Е.В., Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Верниковский В.А. Магматические источники в мантийном клине под вулканами Ключевской группы и влк. Кизимен (Камчатка) по данным сейсмической томографии // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 1. С. 109–124.
11. Пийп Б.И. Ключевская сопка и ее извержения в 1944–1945 гг. и в прошлом // Тр. Лабор. вулканол. АН СССР. Вып. 11. 1956. 312 с.
12. Селиверстов Н.И. Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. В. Беринга, 2009. 191 с.
13. Супруненко О.И., Декин Г.П. Об особенностях гравитационного поля Южной Камчатки // Докл. АН СССР. 1968. Т. 181. № 4. С. 956–959.
14. Тихонов В.И. Унаследованные и наложенные структуры Камчатки и их роль в распределении вулканов // Кайнозойские складчатые зоны севера Тихоокеанского кольца. Труды ГИ АН СССР. М.: АН СССР, 1963. Вып. 89. С. 7–27.
15. Шанцер А.Е. Структурное обрамление юга Ключевской группы вулканов и особенности тектоники и магматизма Кроноцко-Тигильской поперечной зоны // Бюл. вулканол. станций. 1979. № 56. С. 67–73.
16. Шанцер А.Е., Челебаева А.И. Поздний мел Центральной Камчатки. М.: ГЕОС, 2005. 116 с.

Satellite high-resolution data used to clarify the position of fault zones within the Klyuchevskaya volcanic group of Kamchatka

O.A. Girina

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS
Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russia
E-mail: girina@kscnet.ru*

The Klyuchevskaya volcanic group of Kamchatka is unique in many respects: it includes 13 volcanoes, four of which are active; Klyuchevskoy volcano is the youngest and the most active of Kamchatka; the contrast (basaltic and andesitic) volcanism is observed within the relatively small area of this group. This work provides a general scheme of principal fault zones in the area of the Klyuchevskaya volcanic group superimposed on satellite data of middle and high resolution (MODIS, SRTM, ASTER, Landsat, Meteor-M, Kanopus-B and the others). The scheme of the fault zones was created on the basis of the analysis of a set of various published materials and numerous satellite data of different resolution, as well as on the author's studies of the Klyuchevskaya group volcanoes. All faults at the scheme were well expressed in all examined satellite images. It is shown that the faults ever formed here are long-lived and their activity is associated with certain stages of the evolution of the Klyuchevskaya volcanic group. The formation of all volcanoes of this group mainly happens owing to faults of the northwest, northeast and west-northwest directions. For example, the current activity of Klyuchevskoy volcano is associated probably with the northwest and northeast striking faults; right-hand downthrow-upheaval movements along the faults of the north-northeast directions are likely to have led at different times to the collapse of the eastern parts of the volcanoes Ostry Tolbachik and Kamen.

Keywords: satellite data, fault zones, Klyuchevskaya volcanic group, Kamchatka

*Accepted: 21.11.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-148-156*

References

1. Vlodavets V.I., *Klyuchevskaya gruppa vulkanov* (Klyuchevskaya volcanic group), Moscow-Leningrad: AN SSSR, 1940, 124 p.
2. *Glubinnoe stroenie, seismichnost' i sovremennaya deyatel'nost' Klyuchevskoi gruppy vulkanov* (Deep structure, seismicity and recent activities of the Klyuchevskaya volcanic group), Vladivostok: DVNTS AN SSSR, 1976, 148 p.
3. Gontovaya L.I., Senyukov S.L., Nazarova Z.A., *Glubinnaya struktura Klyuchevskoi gruppy vulkanov v rezul'tatakh seismicheskoi tomografii* (Deep structure of the Klyuchevskaya volcanic group in the results of seismic tomography), *Vulkanizm i svyazannye s nim processy* (Volcanism and related processes), *Proc. Regional*

Conference in the Volcanologist day, 27–28 March 2014, Petropavlovsk-Kamchatskii: IViS DVO RAN, 2014, pp. 157–162.

4. Ermakov V.A., *Formatsionnoe raschlenenie chetvertichnykh vulkanicheskikh porod* (Formational division of Quaternary volcanic rocks), Moscow: Nedra, 1977, 224 p.
5. Ermakov V.A., Milanovskii E.E., Tarakanovskii A.A., *Znachenie riftogeneza v formirovanii vulkanicheskikh zon Kamchatki* (The value of rifting in the formation of the volcanic zone of Kamchatka), *Vestnik MGU, Ser. geologich.*, 1974, No. 3, pp. 3–20.
6. Efremov V.Yu., Girina O.A., Kramareva L.S., Loupian E.A., Manevich A.G., Matveev A.M., Mel'nikov D.V., Proshin A.A., Sorokin A.A., Flitman E.V., *Sozdanie informatsionnogo servisa "Dstantsionnyi monitoring aktivnosti vulkanov Kamchatki i Kuril"* (Creating an information service "Remote monitoring of active volcanoes of Kamchatka and the Kuril Islands"), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 5, pp. 155–170.
7. Zavaritskii A.N., *Severnaya gruppa vulkanov Kamchatki* (Northern volcanic group of Kamchatka), Moscow–Leningrad: AN SSSR, 1935, 55 p.
8. Ivanov B.V., Gorel'chik V.I., *Tektonika, seismichnost' i vulkanizm Klyuchevskoi gruppy vulkanov* (Tectonics, seismicity and volcanism of Klyuchevskaya volcanic group), In: *Glubinnoe stroenie, seismichnost' i sovremennaja dejatel'nost' Klyuchevskoi gruppy vulkanov* (Deep structure, seismicity and recent activity of the Klyuchevskaya volcanic group), Vladivostok: DVNC AN SSSR, 1976, pp. 42–51.
9. Ivanov B.V., Popruzhenko S.V., Aprelkov S.E., *Glubinnoe stroenie Tsentral'no-Kamchatskoi depressii i struktural'naya pozitsiya vulkanov* (Deep structure of the Central Kamchatka Depression and structural position of volcanoes), In: *Geodinamika i vulkanizm Kurilo-Kamchatskoi ostrovoznoy sistemy* (Geodynamics and volcanism of the Kurile-Kamchatka Island-arc system), Petropavlovsk-Kamchatskii: IVGiG DVO RAN, 2001, pp. 45–57.
10. Kulakov I.Yu., Kukarina E.V., Gordeev E.I., Chebrov V.N., Vernikovskii V.A., *Magmaticheskie istochniki v mantiinom kline pod vulkanami Klyuchevskoi gruppy i vлк. Kizimen (Kamchatka) po dannym seismicheskoi tomografii* (Magma sources in the mantle wedge beneath the volcanoes of the Klyuchevskaya group and Kizimen based on seismic tomography modeling), *Geologiya i geofizika*, 2016, Vol. 57, No. 1, pp. 109–124.
11. Piip B.I., *Klyuchevskaya sopka i ee izverzheniya v 1944–1945 gg. i v proshlom* (Klyuchevskaya sopka and its eruptions in 1944–1945, and last), Moscow: AN SSSR, 1956, 312 p.
12. Seliverstov N.I., *Geodinamika zony sochleneniya Kurilo-Kamchatskoi i Aleutskoi ostrovnykh dug* (Geodynamics of junction zone of Kurile-Kamchatkan and Aleutian Island arcs), Petropavlovsk-Kamchatskii: KamGU im. V. Beringa, 2009, 191 p.
13. Suprunenko O.I., Dekin G.P., *Ob osobennostyakh gravitatsionnogo polya Yuzhnoi Kamchatki* (On the singularities of the gravitational field of Southern Kamchatka), *Dokl. AN SSSR*, 1968, Vol. 181, No. 4, pp. 956–959.
14. Tikhonov V.I., *Unasledovannye i nalozhennye struktury Kamchatki i ikh rol' v raspredelenii vulkanov* (Inherited and superimposed structures of Kamchatka and their role in the distribution of volcanoes), In: *Kajnozojskie skladchatye zony severa Tihookeanskogo kol'ca* (Cenozoic folded zones of the North Pacific Rim), Moscow: AN SSSR, 1963, pp. 7–27.
15. Shantser A.E., *Strukturnoe obramlenie yuga Klyuchevskoi gruppy vulkanov i osobennosti tektoniki i magmatizma Kronotsko-Tigil'skoi poperechnoi zony* (Structural framing south Klyuchevskaya volcano group and features tectonics and magmatism Kronotsky-Tigil'sky transverse zone), *Bull. vulkanol. stancij.*, 1979, No. 56, pp. 67–73.
16. Shantser A.E., Chelebaeva A.I., *Pozdnii mel Tsentral'noi Kamchatki* (Late Cretaceous of central Kamchatka), Moscow: GEOS, 2005, 116 p.