

УДК 551.242.1

ПОЗДНЕЧЕТВЕРТИЧНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ ЮЖНОЙ КАМЧАТКИ

© 2017 Е.А. Зеленин

Геологический институт РАН, Москва, 119017, e-mail: egorzelenin@mail.ru

Рассматриваются разрывные нарушения, являющиеся проявлением позднечетвертичных деформаций Южной Камчатки. Использование данных дистанционного зондирования Земли позволило выделить как разломные уступы, так и магмопроводящие трещины, проявленные в рельефе цепочками шлаковых конусов, а также охарактеризовать кинематику этих структур. Позднечетвертичные разломы Южной Камчатки, выявленные и описанные в настоящей работе, имеют сбросовую кинематику, а магмопроводящие трещины ориентированы вдоль оси полуострова, что свидетельствует о современном поперечном растяжении территории. Средняя скорость горизонтальных смещений по позднеплейстоценовым разломам за период накопления деформаций не превышает 1.6 мм/год, что на порядок меньше, чем скорость аналогичного растяжения Центральной Камчатки — 17 мм/год. Таким образом, скорости деформаций увеличиваются к северному окончанию зоны субдукции, что соответствует модели растяжения из-за отступления желоба (т.н. «роллбэк») у края субдуцирующей плиты.

Ключевые слова: Камчатка, активные разломы, позднечетвертичный вулканизм, дистанционные методы.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из особенностей полуострова Камчатка, выделяющей его среди прочих сегментов Тихоокеанского огненного кольца, является система асимметричных поднятий и впадин протягивающихся вдоль полуострова (рис. 1). Крупнейшие из них — поднятие Восточных хребтов и Центральная Камчатская депрессия (ЦКД), разделенные протяженной Восточно-Камчатской зоной активных сбросовых разломов (Kozhurin et al., 2006). Названные структуры связывают с поперечным растяжением земной коры, «разрушением орогена» (Шанцер, 1979) при движении блока Восточной Камчатки на восток (Ермаков и др., 1974, Кожурин и др., 2008), возможно, связанного со смещением в сторону океана зоны субдукции (Kozhurin, Zelenin, 2017).

Асимметричные поднятия и впадины проявлены в рельефе в максимальной степени в Центральной Камчатке — от северного окончания глубоководного желоба до Начикинской поперечной зоны (Мелекесцев и др., 1974) северо-западного простирания (рис. 1). Средняя за средне-позднечетвертичное время скорость растяжения этого сегмента Камчатки перпендикулярно оси полуострова может достигать

17 мм/год (Kozhurin, Zelenin, 2017). На Южной Камчатке аналогичные асимметричные структуры (рис. 2) выявлены по геофизическим данным (Апрелков и др., 2001), но в рельефе они проявлены в значительно меньшей степени и не могут быть однозначно сопоставлены со структурами ЦКД и Восточных хребтов. Также, на Южной Камчатке отсутствуют зоны разломов, подобные Восточно-Камчатской зоне разломов (рис. 1).

Предмет настоящей статьи — параметры активной деформации Южной Камчатки. Для их определения были выделены позднечетвертичные дизъюнктивные структуры, определены величины смещений по ним, суммарная (для всех разрывов) величина горизонтальной компоненты и средняя скорость ее накопления, то есть средняя скорость поперечного растяжения Южной Камчатки.

СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ПОЗДНЕЧЕТВЕРТИЧНОЙ ТЕКТониКИ И ВУЛКАНИЗМА ЮЖНОЙ КАМЧАТКИ

Позднечетвертичные структуры Южной Камчатки, параметры которых могли бы быть использованы для оценки направления и скорости деформации этой части полуострова, до

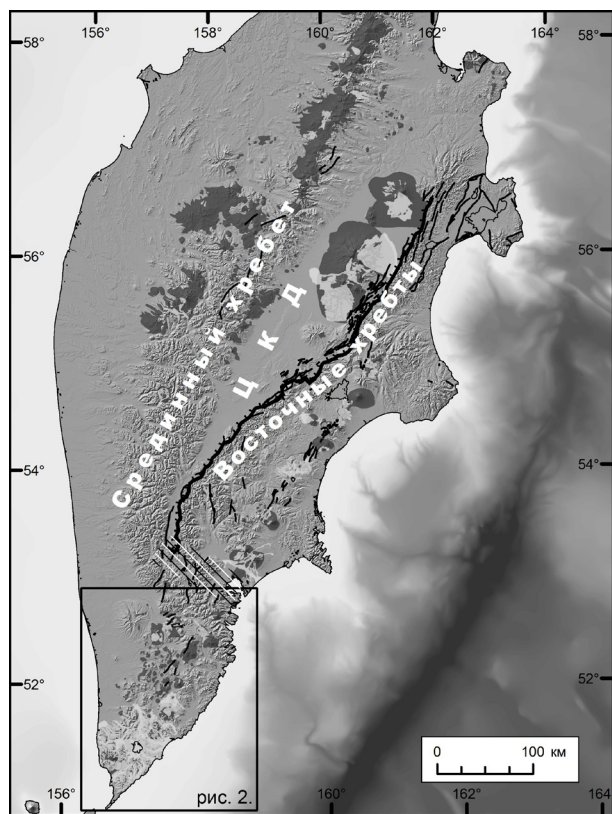


Рис. 1. Основные активные структуры Камчатки. В качестве подложки для суши использована цифровая модель рельефа (ЦМР) SRTM (Геологическая служба США), для моря — ЦМР, созданная по изобатам из (Селиверстов, 2009): 1 — Восточно-Камчатская зона разломов, 2 — Начикинская поперечная зона, 3 — прочие активные разломы (Kozhurin et al., 2006), 4 — голоценовые вулканические отложения (<http://geoportal.kscnet.ru/volcanoes/geoservices/hvolc.php>), 5 — позднелайстоценовые вулканические отложения (Романова et al., 2007). ЦКД — Центральная Камчатская депрессия.

настоящего времени слабо изучены. По геофизическим данным (Апрелков и др., 2001) здесь выделяют асимметричные впадины мелового фундамента: Голыгинский и Южно-Камчатский прогибы, разделенные Ункановичским горстом, и Прибрежный горст, выраженный в рельефе сериями хребтов, протягивающихся вдоль восточного побережья Южной Камчатки (рис 2). В обнажениях хребтов Прибрежного горста описаны палеоцен-миоценовые вулканогенно-осадочные толщи, сменяющиеся без видимого несогласия. Венчает разрез мелоководно-морская асачинская толща миоцена мощностью до 650 м. В пределах горста она залегает на высотах до 800 м и перекрыта полями плиоцен-четвертичных субэриальных вулканитов (Государственная ..., 2000).

Хронология и пространственное положение четвертичного вулканизма Южной Камчатки

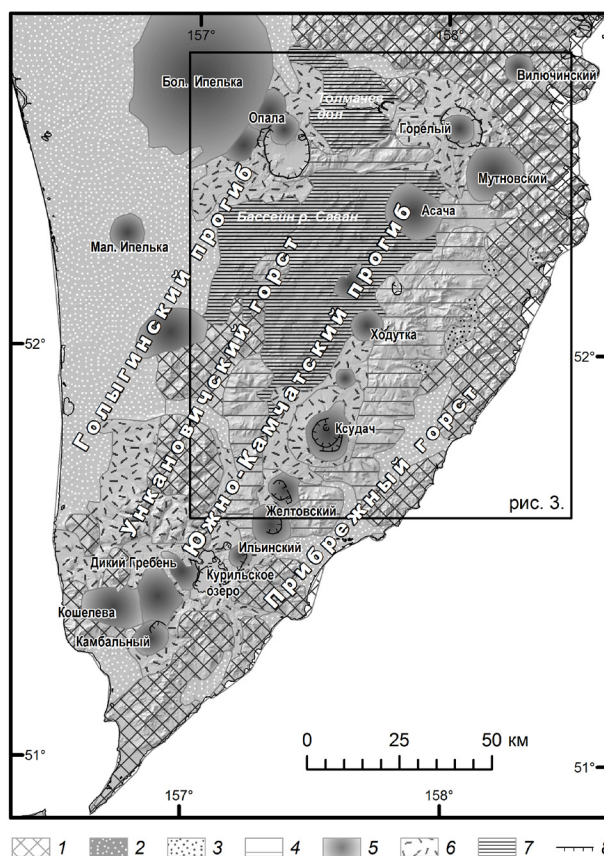


Рис. 2. Крупнейшие структуры (Апрелков и др., 2001), неоген-четвертичные отложения и соответствующие им типы рельефа Южной Камчатки по результатам дешифрирования данных ДЗЗ с привлечением данных (Государственной ..., 2000): 1 — хребты, сложенные палеоген-неогеновыми толщами, 2 — равнины, перекрытые плиоцен-четвертичными отложениями, 3 — хребты, сложенные мелководно-морскими миоценовыми отложениями, 4 — раннечетвертичные плато-базальты Веселовского вулканического комплекса, 5 — крупнейшие четвертичные вулканические постройки, 6 — области распространения четвертичных пирокластических потоков, 7 — поля позднечетвертичного ареального вулканизма (названия показаны курсивом в соответствии с (Дирксен, 2009)), 8 — уступы калдер и секторных обрушений вулканических построек.

были предметом изучения И.В. Мелекесцева (неопубликованные данные) и В.С. Шеймовича и М.Г. Патоки (2000). Их работы содержат схемы распространения вулканитов, но возрастное деление с точностью до яруса делает невозможным использование этих материалов для получения количественных характеристик деформации полуострова. Детальные данные существуют для голоценовой истории отдельных вулканов центрального типа и ареальных вулканов (геосервис «Голоценовый вулканизм Камчатки», <http://geoportal.kscnet.ru/volcanoes/geoservices/hvolc.php>). Тем не менее, даже голоценовая активность некоторых районов вулканического пояса Южной Камчатки до сих пор не охарактеризована.

Ключевым для целей исследования является положение и кинематика позднечетвертичных разломов и одноактных магмопроводящих трещин, выраженных в рельефе цепочками шлаковых конусов. Эти данные позволяют судить о характере общей деформации южной части полуострова. К сожалению, дизъюнктивные структуры Южной Камчатки никогда не были предметом отдельного исследования. Выделены и датированы поздеплейстоцен-голоценовые центры извержений (рис. 2) южного склона вулкана Горелый (Селянгин, Пономарева, 1999), Курильского озера (Ponomareva et al., 2004), Толмачева дола и бассейна р. Саван (Дирксен, 2009), причем в пределах Толмачева дола в этой же работе выделены разломы, деформирующие датированные поверхности. Для значительной части Южной Камчатки И.В. Флоренским составлена карта вулканических отложений и разломов с делением моногенных вулканов по относительным возрастам, но эти данные так и не были опубликованы.

МЕТОДИКА

Для определения параметров деформации были выделены позднечетвертичные разломы и одноактные магмопроводящие трещины; определены величины смещений по ним, суммарная (для всех разрывов) величина горизонтальной компоненты и средняя скорость ее накопления. В качестве основного метода выявления и картографирования разрывов было выбрано дешифрирование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Пространственное положение и основные количественные характеристики форм рельефа, соответствующих современным тектоническим структурам, получены в результате дешифрирования кадровых аналоговых снимков КН-9 Hexagon с пространственным разрешением около 4 м (предоставлены геологической службой США, <https://earthexplorer.usgs.gov>, съемка 1975 г.). Преимуществом этих данных является возможность формирования маршрутных стереопар. К сожалению, кадры архивных съемок содержат геометрические искажения из-за деформации фотопленок при хранении и сканировании. Для исправления этих искажений был применен описанный в работах (Pieczonka et al., 2013; Surazakov, Aizen, 2010) метод определения точек с известными координатами изображения и трансформации изображения сплайновой функцией. Итоговая относительная вертикальная точность измерений составляет от 6 до 20 м для равнинных и горных территорий, соответственно (Surazakov, Aizen, 2010). Скорректированные таким образом снимки были использованы для создания стере-

омодели и последующих фотограмметрических измерений с использованием ПО «PHOTOMOD 6.0 lite» (компания «Ракурс»). В качестве вспомогательных данных при геометрической коррекции и дешифрировании снимков КН-9 Hexagon были использованы ЦМР SRTM 1 Arc-Second Global пространственного разрешения около 30 м и снимки Landsat-8/OLI (пространственное разрешение панхроматического канала 15 м) на весь район исследования (свободно распространяются геологической службой США, <https://earthexplorer.usgs.gov/>).

Для определения азимута и угла падения разломов был использован метод пластовых треугольников, который заключается в определении простирания структуры по ее пересечению горизонталями одной высоты и угла падения по расстоянию, на которое смещается выход структуры на земную поверхность на расчлененном рельефе. К сожалению, точность метода значительно зависит от угла падения и перепада высот: измерение крутопадающих структур требует более расчлененного рельефа.

Еще одним маркером режима деформирования является расположение магмопроводящих трещин. Несмотря на то, что в пределах отдельного вулканического центра ориентировка цепочек может быть подчинена сугубо локальным условиям, для полного регионального набора данных показано (Le Corvec et al., 2013), что в среднем магмоподводящие трещины ориентированы перпендикулярно оси минимального сжатия или максимального растяжения в обстановках растяжения.

В ходе дешифрирования данных ДЗЗ и фотограмметрических измерений был получен массив геопространственных данных о простирациях структур; статистическая обработка данных была проведена в открытом (лицензия GNU/GPL3) программном обеспечении OpenStereo (Instituto de Geociências — Universidade de São Paulo). Статистические характеристики были использованы для сопоставления ориентировки выделенных структур с простиранием южнокамчатского сегмента вулканической дуги и соответствующего ему отрезка глубоководного желоба.

Характеристика деформирования Южной Камчатки в целом была получена вдоль линии, протягивающейся южнее вулкана Горелый (рис. 3). Суммарное растяжение было рассчитано как сумма смещений по отдельным структурам. Скорости деформирования были рассчитаны путем деления горизонтального смещения на возраст соответствующих структур. Принимая во внимание возможную неоднозначность в определении возраста конусов по дистанционным данным, для расчетов был выбран профиль, включающий только датированные вулканиче-

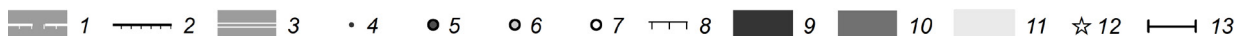
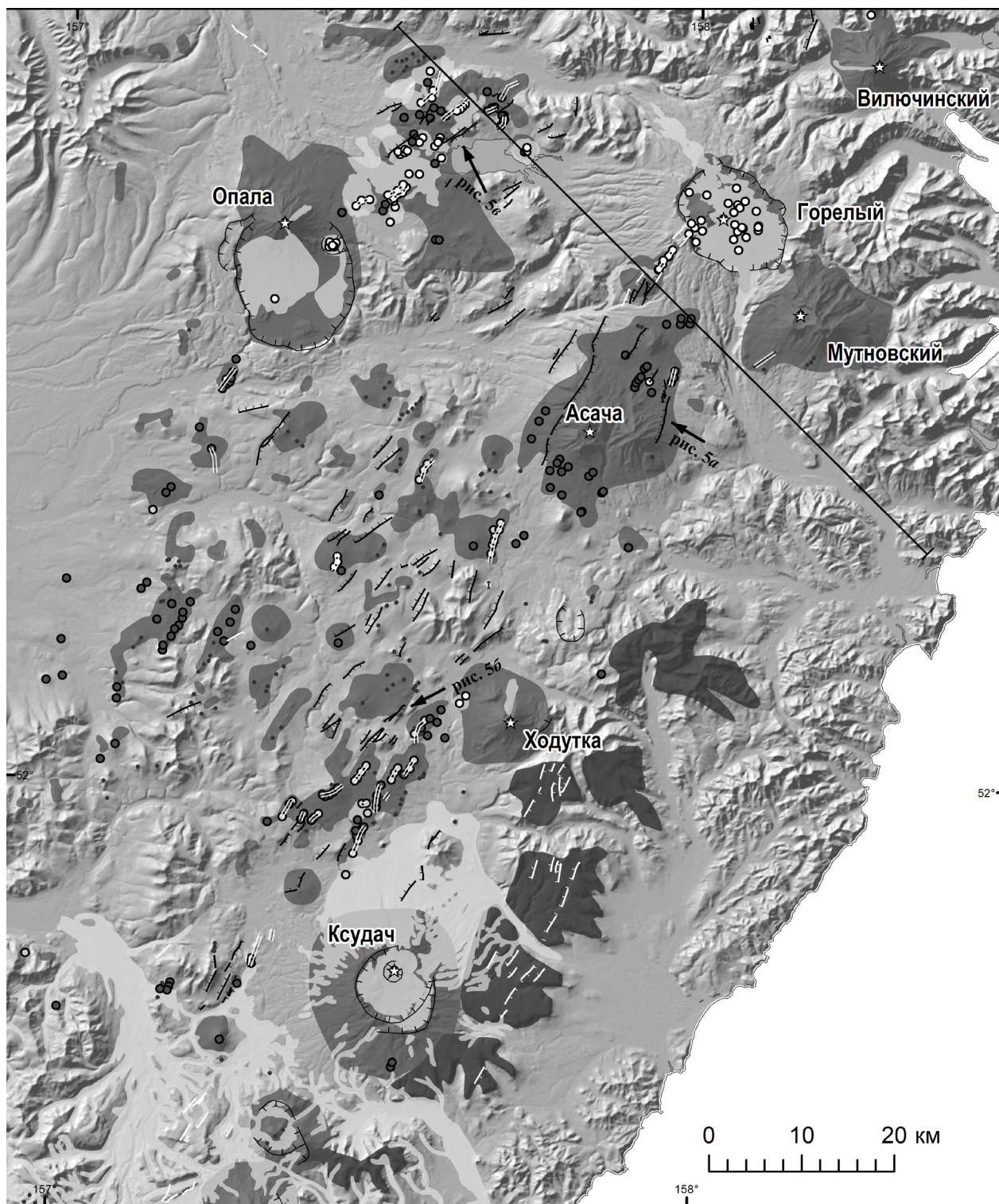


Рис. 3. Активные дизъюнктивные структуры Южной Камчатки и деформируемые ими поверхности. Дизъюнктивные нарушения (штрихи в направлении опущенного крыла): 1 — неактивные разломы, выраженные в рельефе, 2 — активные разломы, 3 — последниковые магмопроводящие трещины; 4–7 — одноактивные центры извержений: 4 — позднеплейстоценовые частично разрушенные, 5 — позднеплейстоценовые без признаков разрушения, 6 — предположительно голоценовые, 7 — голоценовые датированные; 8 — уступы кальдер и секторных обрушений вулканических построек, 9 — базальтовые плато эоплейстоценового-нижнеплейстоценового возраста, 10 — позднеплейстоценовые вулканические отложения, 11 — голоценовые вулканические отложения, 12 — крупнейшие вулканы, активные в голоцене, 13 — положение линии профиля. Стрелками показано положение рисунков 5а–в.

ские постройки с опубликованными (Дирксен, 2009; Селянтин, Пономарева, 1999) возрастами вулканических отложений и форм рельефа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пространственное распределение и параметры разломов. Автором выделено 147 разломных уступов, не связанных напрямую с поступлением магмы на поверхность. Кроме них, при дешифрировании обнаружено 85 магмопроводящих трещин, проявленных цепочками шлаковых конусов. Большинство выявленных активных разломов приурочены к вулканическому поясу Южной Камчатки и не образует непрерывной системы (рис. 3).

Зачастую, разломы не прямолинейны, но в среднем их простирание однородно (стандартное отклонение 2°) и параллельно оси глубоководного желоба (рис. 4а). Отклонения от общей ориентировки характерны только для Начикинской зоны поперечных дислокаций.

Надежные данные о кинематике смещений получены для разлома на восточном склоне вулкана Асача. Разломный уступ на водоразделах имеет высоту 15–25 м (западное крыло опущено); его линия отклоняется от общего направления при пересечении глубоких барранкос (рис. 5а), что позволяет применить метод пластовых треугольников для определения азимута и угла падения плоскости разлома. Вычисленный угол падения составляет $60\text{--}70^\circ$ при азимуте $290\text{--}295^\circ$, что соответствует горизонтальному растяжению с амплитудой 5–15 м перпендикулярно линии разлома.

Других разломов, пересекающих достаточно расчлененный рельеф, выявлено не было; на более пологих склонах шлаковых конусов становится невозможным учесть изгиб плоскости разрыва. Так измеренные методом пластовых треугольников параметры разлома, деформирующего один из шлаковых конусов западнее вулкана Ходутка (рис. 5б), соответствуют взбросу

с углом падения около 47° при вертикальной амплитуде 15–20 м. Однако, на Толмачевом долу линия одного из разломов сравнимым образом изгибается на горизонтальной поверхности (рис. 5в), где изгиб однозначно связан с изменением простирания плоскости разлома. То есть, кажущаяся взбросовая кинематика отдельных разломов может быть ошибкой интерпретации. Тем не менее, пологие сбросы, аналогичные описанным в Центральной Камчатке (Kozhurin, Zelenin, 2017), для Южной Камчатки нехарактерны.

Для уточнения кинематики разломов необходимо обратиться к расположению магмопроводящих трещин и, соответственно, цепочек шлаковых конусов. На Южной Камчатке сохранившиеся в рельефе шлаковые конуса рассредоточены по всей ширине вулканического пояса. Повсеместно встречаются как отдельно стоящие конусы и компактные группы, так и линейные цепочки, причем цепочки ориентированы вдоль островодужной системы схожим с разломами образом (рис. 4б). Это свидетельствует об ориентировке минимального сжатия (максимального растяжения) поперек полуострова, что позволяет трактовать разломы неясной кинематики как сбросы.

Поскольку полученных данных недостаточно для определения характерных углов падения разломов, далее, при оценке скорости деформирования принят угол падения 60° , наиболее характерный для сбросов по всему миру (Jackson, 1987).

Возраст структур. Необходимым условием для расчета скоростей деформации является установление интервала времени, в течение которого накопились выраженные в рельефе смещения по выделенным разрывам.

Известно, что разломы подвижных поясов, в том числе Камчатки, имеют характерную повторяемость подвижек от сотен лет до первых десятков тысяч лет (Кожурин и др., 2008; Трифонов, 1985; Трифонов, Кожурин, 2010). Соответственно, деформации позднеплейстоценовых и голоценовых поверхностей свидетельствуют об активности разлома.

Для определения возрастов поверхностей без опубликованных датировок был использован подход, разработанный О.В. Дирксеном (2009) для оценки возрастов моногенных вулканов Камчатки. Поскольку практически вся Южная Камчатка была покрыта ледниками второй фазы позднеплейстоценового оледенения (Брайцева и др., 1968), отсутствие на некоторой поверхности признаков ледниковой экзарации (например каров и троговых долин в горах, «бараньих лбов» в долинах) и аккумуляции (моренные гряды, холмисто-западинные равнины, водно-ледниковые террасы), а также вулканических

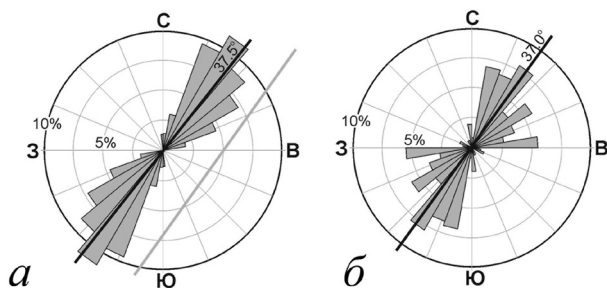


Рис. 4. Розы-диаграммы ориентировки активных разломов (а) и послеледниковых магмопроводящих трещин (б) Южной Камчатки. Черной линией показано среднее значение азимута простирания структур. Серая утолщенная линия на а — азимут простирания глубоководного желоба.

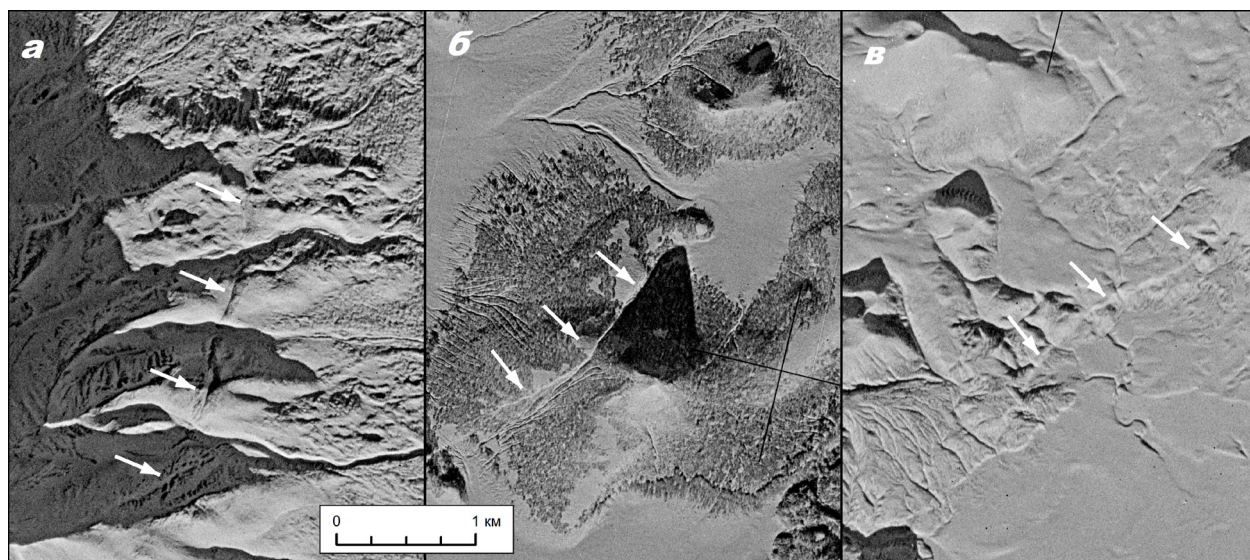


Рис. 5. Изгибы разломных уступов (показаны стрелками) на восточном склоне вулкана Асача (а), на склоне шлакового конуса западнее вулкана Ходутка (б), на горизонтальной поверхности лавового потока Толмачевого дола (в). Фрагменты снимков КН-9, север сверху.

построек типа «тюдя», свидетельствующих о подледных извержениях, означает, что она моложе последнего ледникового максимума, 21-26 т.л.н. (Peltier, Fairbanks, 2006), причем реальное время отступления ледника может быть сколь угодно позже, вплоть до голоцена. Практически все выявленные разломы приурочены к территориям, покрытым послеледниковыми вулканическими отложениями, то есть являются структурами активными на современном этапе развития территории. Аналогично, в результате дешифрирования выделены неразрушенные послеледниковые вулканические постройки и более древние постройки со следами обработки ледником (рис. 3). К голоценовому времени отнесены датированные (Дирксен, 2009; Селянгин, Пономарева, 1999; Ponomareva et al., 2004) постройки и, условно, шлаковые конусы с хорошо выраженным кратером и прямыми склонами без крупных барранкос (на участках, где детальные работы по хронологии голоценового вулканизма не проводились).

Единственный существенно деформированный участок, сложенный более древними отложениями, расположен восточнее вулканов Ксудач и Ходутка. Здесь разломные уступы пересекают базальтовые плато (рис. 3), которые по стратиграфической позиции толщ и единичным абсолютным датировкам относят к Веселовскому вулканическому комплексу эоплейстоцена — нижнего неоплейстоцена (Государственная ..., 2006; Шеймович, Патока, 2000). К нижнему плейстоцену здесь относится и время начала накопления видимых смещений.

Суммарное смещение и скорости деформаций. Поскольку геоморфологические признаки поперечного растяжения проявлены в Южной

Камчатке значительно слабее, чем в Центральной Камчатке, наибольший интерес представляет максимальная оценка скоростей растяжения. Суммарное растяжение было определено для поперечного профиля Горелый — Толмачев дол, пересекающего максимальное количество активных структур. Заметим, что для подсчета растяжения можно выбрать пересечение Южной Камчатки вообще без дизъюнктивных нарушений, выраженных в рельефе, что принципиально невозможно в Центральной Камчатке.

На юго-западном подножии вулкана Горелый расположена система разломов с накопленным вертикальным смещением среднеплейстоценовых (Селянгин, Пономарева, 1999) лав ~30 м. Если принять окончание среднего плейстоцена (120 тыс. лет) как минимальный интервал накопления деформаций и 60° как угол падения плоскости разлома, то максимальная средняя скорость горизонтального растяжения составит 0.14 мм/год. Расположенная здесь же магмопроводящая трещина соответствует горизонтальному растяжению на 3 м за голоценовое время (Zelenin et al., 2014), то есть скорости растяжения около 0.3 мм/год. На Толмачевом долу разломные уступы деформируют лавовые потоки с возрастом 25–10 тыс. лет (Дирксен, 2009), но погребены голоценовыми потоками. Суммарная вертикальная амплитуда смещений по ним составила 47 м за 25 тыс. л., что (при угле падения в 60°) соответствует скорости растяжения до 1.08 мм/год. Растяжение сопровождалось единственным за послеледниковое время внедрением дайки среднеголоценового возраста. Судя по масштабам шлаковых конусов, сравнимых с трещинным извержением на Горелом, 3 м является приемлемой оценкой мощности питающей

дайки и в данном случае, что добавляет к суммарному растяжению еще 0.12 мм/год. Скорость поперечного растяжения по всему профилю, рассчитанная как сумма скоростей деформации по отдельным структурам, не превышает 1.6 мм/год.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выявленные на Южной Камчатке позднечетвертичные разломы представлены сбросами, ориентированными вдоль островодужной системы. В целом, наличие таких разрывных нарушений свидетельствует о поперечном растяжении земной коры Южной Камчатки. Помимо сбросов, это растяжение проявлено и одноактными магмоподводящими трещинами растяжения такого же простирания, как и у разломов. Важно заметить, что вулканизма как такового недостаточно для регионального растяжения — вулканизм характерен и для сокращающихся островных дуг, а расклинивающее действие дайки может быть компенсировано локальными деформациями (Gudmundsson, 2008).

Сумма горизонтальных поперечных смещений отдельных структур дает среднее значение скорости поперечного растяжения полуострова примерно в 1.6 мм/год в позднечетвертичное время, что на порядок меньше, чем растяжение в пределах Центральной Камчатки — 17 мм/год (Kozhurin, Zelenin, 2017). Южнее, в Курильской островной дуге активные структуры растяжения неизвестны. Таким образом, скорости деформаций увеличиваются к северному окончанию зоны субдукции, что соответствует модели растяжения (Schellart, 2007) из-за отступления желоба у края субдуцирующей плиты.

Граница между деформирующимися с разной скоростью Южной и Центральной Камчаткой, с учетом приведенных значений скоростей растяжений, должна быть правосторонней. Именно правосторонний характер движений был ранее предложен для расположенной между этими сегментами Начикинской зоны поперечных дислокаций (рис. 1) на основе структурных признаков (Кожурин и др., 2008).

Схожая кинематика смещений на позднеплейстоценовых поверхностях и эоплейстоценовых-раннеплейстоценовых базальтовых плато может свидетельствовать о поперечном растяжении южной Камчатки с начала неоплейстоцена. До эоплейстоценового времени в прибрежной части Южной Камчатки преобладало поперечное сокращение с ростом Прибрежного горста, о чем свидетельствуют вовлеченные в поднятие миоценовые мелководно-морские отложения.

Характерная длина выявленных разломных уступов не превышает 8 км. Реальная длина сегментов разломов может быть несколько больше

из-за высоких темпов вулканической аккумуляции. Как отмечено в работах (Hanks, Bakun, 2002, Leonard, 2010), ширина разрыва приблизительно равна его длине для малых землетрясений (с длиной разрыва меньше 5 км), и увеличивается медленнее длины разрыва при превышении этого порогового значения, то есть мощность хрупкого слоя земной коры сопоставима с максимальной характерной длиной разрывов и составляет в пределах вулканического пояса около 10 км. Малая мощность хрупкого слоя земной коры может быть связана с прогревом земной коры в вулканическом поясе (England, Katz, 2010).

ВЫВОДЫ

Выявленные на Южной Камчатке позднечетвертичные разрывы представлены сбросами и одноактными магмоподводящими трещинами. Эти структуры протягиваются параллельно оси островной дуги и глубоководного желоба, что свидетельствует о поперечном растяжении земной коры Южной Камчатки.

Скорость растяжения Южной Камчатки за позднечетвертичное время составляет до 1.6 мм/год; севернее, в Центральной Камчатке скорости деформаций увеличиваются до 17 мм/год (Kozhurin, Zelenin, 2017), что соответствует модели отступления желоба и субдуцирующей плиты (Schellart, 2007). Изменение скорости деформирования по механизму правого сдвига, по всей видимости, приурочено к Начикинской зоне поперечных дислокаций, где ранее (Кожурин и др., 2008) были описаны активные структуры общей правосторонней кинематики.

Космические снимки приобретены на средства гранта РФФИ № 17-17-01073, полевые работы проведены на средства гранта РФФИ № 16-05-00090.

Список литературы

- Апрелков С.Е., Попруженко С.В., Богдан П.С. и др. Структуры фундамента и локализация вулканизма Южной Камчатки // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВиГ ДВО РАН, 2001. С. 34–43.
- Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Евтеева И.С. и др. Стратиграфия четвертичных отложений и оледенения Камчатки. М.: Наука, 228 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 200 000. Серия Южно-Камчатская. Листы N-57-XXI (северные Коряки), N-57-XXVII (Петропавловск-Камчатский), N-57-XXXIII (сопка Мутновская). Объяснительная записка. М., 2000. 302 С.

- Дирксен О.В. Позднечетвертичный ареальный вулканизм Камчатки: структурная приуроченность, геолого-геоморфологический эффект, пространственно-временные закономерности проявления. Дисс. канд. геогр. наук. Санкт-Петербург, 2009. 172 с.
- Ермаков В.А., Милановский Е.Е., Таракановский А.А. Значение рифтогенеза в формировании четвертичных вулканических зон Камчатки // Вестник МГУ. Серия 4. Геология. 1974. № 3. С. 3–20.
- Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Эрлих Э.Н. и др. Камчатка. Курильские и Командорские острова (История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока). 1974. М.: Наука, 437 с.
- Кожурин А.И., Пономарева В.В., Пинегина Т.К. Активная разломная тектоника юга Центральной Камчатки // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. № 2. Вып. 12. С. 10–27.
- Селиверстов Н.И. Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им.Витуса Беринга. 2009. 191 с.
- Селянгин О.Б., Пономарева В.В. Строение и развитие Гореловского вулканического центра, Южная Камчатка // Вулканология и сейсмология. 1999. № 2. С. 3–23.
- Трифонов В.Г. Особенности развития активных разломов // Геотектоника. 1985. № 2. С. 16–26.
- Трифонов В.Г., Кожурин А.И. Проблемы изучения активных разломов // Геотектоника. 2010. № 6. С. 79–98.
- Шанцер А.Е. Некоторые особенности эволюции тектоно-магматических структур Камчатки в зависимости от ее блокового строения и движения блоков в позднем кайнозое // Бюллетень вулканологических станций. 1979. № 57. С. 53–65.
- Шеймович В.С., Патока М.Г. Геологическое строение зон активного кайнозойского вулканизма. М.: ГЕОС, 2000. 208 с.
- England P.C., Katz R.F. Melting above the anhydrous solidus controls the location of volcanic arcs // Nature. 2010. V. 467. № 7316. P. 700–703.
- Hanks T.C., Bakun W.H. A bilinear source-scaling model for $M - \log A$ observations of continental earthquakes // Bulletin of the Seismological Society of America. 2002. V. 92. № 5. P. 1841–1846.
- Gudmundsson A., Friese N., Gallindo I. et al. Dike-induced reverse faulting in a graben // Geology. 2008. V. 36. № 2. P. 123–126.
- Jackson J.A. Active normal faulting and crustal extension. Geological Society of London, Special Publications 1987. V. 28. № 1. P. 3–17.
- Kozhurin A., Acocella V., Kyle P.R. et al. Trenching studies of active faults in Kamchatka, eastern Russia: Palaeoseismic, tectonic and hazard implications // Tectonophysics. 2006. V. 417. № 3. P. 285–304.
- Kozhurin A., Zelenin E. An extending island arc: the case of Kamchatka // Tectonophysics. 2017. V. 706–707. P. 91–102.
- Le Corvec N., Spörli K.B., Rowland J. et al. Spatial distribution and alignments of volcanic centers: clues to the formation of monogenetic volcanic fields // Earth-Science Reviews. 2013. V. 124. P. 96–114.
- Leonard M. Earthquake fault scaling: Self-consistent relating of rupture length, width, average displacement, and moment release // Bulletin of the Seismological Society of America. 2010. V. 100. № 5A. P. 1971–1988.
- Peltier W. R., Fairbanks R. G. Global glacial ice volume and Last Glacial Maximum duration from an extended Barbados sea level record // Quaternary Science Reviews. 2006. V. 25. № 23. P. 3322–3337.
- Pieczonka T., Bolch, T., Junfeng, W. et al. Heterogeneous mass loss of glaciers in the Aksu-Tarim Catchment (Central Tien Shan) revealed by 1976 KH-9 Hexagon and 2009 SPOT-5 stereo imagery // Remote Sensing of Environment. 2013. V. 130. P. 233–244.
- Ponomareva V.V. Kyle P.R., Melekestsev I.V. et al. The 7600 (14 C) year BP Kurile Lake caldera-forming eruption, Kamchatka, Russia: stratigraphy and field relationships // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2004. V. 136. № 3. P. 199–222.
- Ponomareva V., Melekestsev I., Braitseva O. et al. Late Pleistocene-Holocene Volcanism on the Kamchatka Peninsula, Northwest Pacific Region // Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region / Eds. Eichelberger J., Gordeev E., Izbekov P., Kasahara M., Lees J.. 2007. P. 165–198.
- Schellart W.P., Freeman J., Stegman D.R. et al. Evolution and diversity of subduction zones controlled by slab width // Nature. 2007. V. 446. № 7133. P. 308–311.
- Surazakov A., Aizen V. Positional accuracy evaluation of declassified Hexagon KH-9 mapping camera imagery // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2010. V. 76. № 5. P. 603–608.
- Zelenin E.A., Kozhurin A.I., Pinegina T.K., Mikhaylyukova P.G. An opening magmatic fissure: structural pattern of its termination // Geophysical Research Abstracts V. 16, EGU2014–9776, 2014, EGU General Assembly 2014.

ПОЗДНЕЧЕТВЕРТИЧНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ
LATE QUATERNARY DEFORMATIONS OF SOUTHERN KAMCHATKA

E.A. Zelenin

Geological Institute of RAS, Moscow, 119017

The article describes fractures that reflect Late Quaternary deformations of Southern Kamchatka. The integrated application of remote sensing techniques revealed 147 non-volcanic faults and 85 magma-conducting fractures represented as chains of cinder cones and allowed describing kinematics of these structures. Late Quaternary faults of Southern Kamchatka discovered and described in this paper show that fault kinematics and magma-conducting fractures stretch along the peninsula axis, which gives evidence of the modern transverse tension of the peninsula. The crustal extension is expressed by normal faults and opening fissures with average rate up to 1,6 mm/yr, which is one order of magnitude less than extension of Central Kamchatka — 17 mm/yr. Thus the deformation rates increase in the northern end of the subduction zone, which corresponds to the strain model caused by rollback on the margin of the subducting plate.

Keywords: Kamchatka, active faults, Quaternary volcanism, remote sensing.