

**На правах рукописи**

**Зеленин Егор Александрович**

**АКТИВНАЯ РАЗЛОМНАЯ ТЕКТОНИКА ОБЛАСТЕЙ СОВРЕМЕННОГО  
ВУЛКАНИЗМА КАМЧАТКИ**

Специальность 25.00.03 – геотектоника и геодинамика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Лаборатории неотектоники и современной геодинамики  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Геологического института Российской академии наук

*Научный руководитель:*

доктор геолого-минералогических наук

**Кожурин Андрей Иванович**

ФГБУН Геологический институт РАН, г. Москва

*Официальные оппоненты:*

доктор геолого-минералогических наук, профессор,  
заведующий лабораторией сейсмогеологии

**Имаев Валерий Сулейманович**

ФГБУН Институт земной коры Сибирского отделения РАН (г. Иркутск)

кандидат геолого-минералогических наук,

заведующий лабораторией сеймотектоники и сейсмического микрорайонирования

**Овсяченко Александр Николаевич**

ФГБУН Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (г. Москва)

*Ведущая организация:*

ФГБУН Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН  
(г. Южно-Сахалинск)

Защита состоится 24 мая 2018 года в 14.30 на заседании диссертационного совета  
Д.002.215.01 в ФГБУН Геологический институт РАН по адресу: 119017, Москва,  
Пыжевский пер., 7. Актовый зал Геологического института РАН

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке геологической литературы Секции  
Наук о Земле РАН по адресу: Москва, Старомонетный пер., д. 35, ИГЕМ РАН и на  
сайте ГИН РАН: <http://www.ginras.ru/struct/21/20/dis.php>

Автореферат разослан «            » апреля 2018 г.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в двух экземплярах просьба направлять  
по адресу: 119017, Москва, Пыжевский пер. д. 7. Геологический институт РАН,  
ученому секретарю диссертационного совета Патиной Ирине Станиславовне  
(e-mail: ira\_ratina@mail.ru). Требования к оформлению отзывов приведены на  
странице 26.

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат геолого-минералогических наук

И.С. Патина

## **Общая характеристика работы**

Вулканическая и тектоническая активность полуострова Камчатка привлекает внимание исследователей уже более 300 лет. К настоящему времени реконструирована эруптивная история большинства голоценовых вулканов и крупнейшие эруптивные события плейстоцена. Охарактеризованы параметры Курило-Камчатской зоны субдукции, в том числе ее сейсмогенерирующий потенциал. Значительные успехи достигнуты в изучении коровых разломов авулканических частей полуострова. На этом фоне очевидным пробелом является состояние изученности активной разломной тектоники вулканических областей.

**Актуальность исследования** по теме диссертации определяется следующим: 1) определение параметров разрывов вулканических областей позволяет судить о режиме современных деформаций земной коры в вулканических поясах полуострова, что необходимо для понимания процесса деформирования всего полуострова, включая его авулканические районы; 2) оценки повторяемости и амплитуды смещений по разломам – сейсмогенерирующим структурам – могут быть использованы для оценки сейсмической опасности; 3) совместное изучение вулканизма и активных дизъюнктивных структур проливает свет на взаимосвязь тектонических и вулканических процессов, развивающихся в едином объеме литосферы. Полученные материалы могут служить основой для детального сейсмического районирования региона и уточнения исходной сейсмичности, если такие работы будут проводиться в будущем.

**Степень разработанности темы исследования.** Долгое время представления о кинематике разломов Восточного вулканического пояса полуострова (рис. 1), основывались в основном на интерпретации данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), прежде всего аэрофотоснимков (АФС) и ограничивались характеристикой образуемого ими структурного рисунка. Активные разломы Южной Камчатки, и, в частности, ее вулканических областей, никогда не были предметом отдельного исследования.

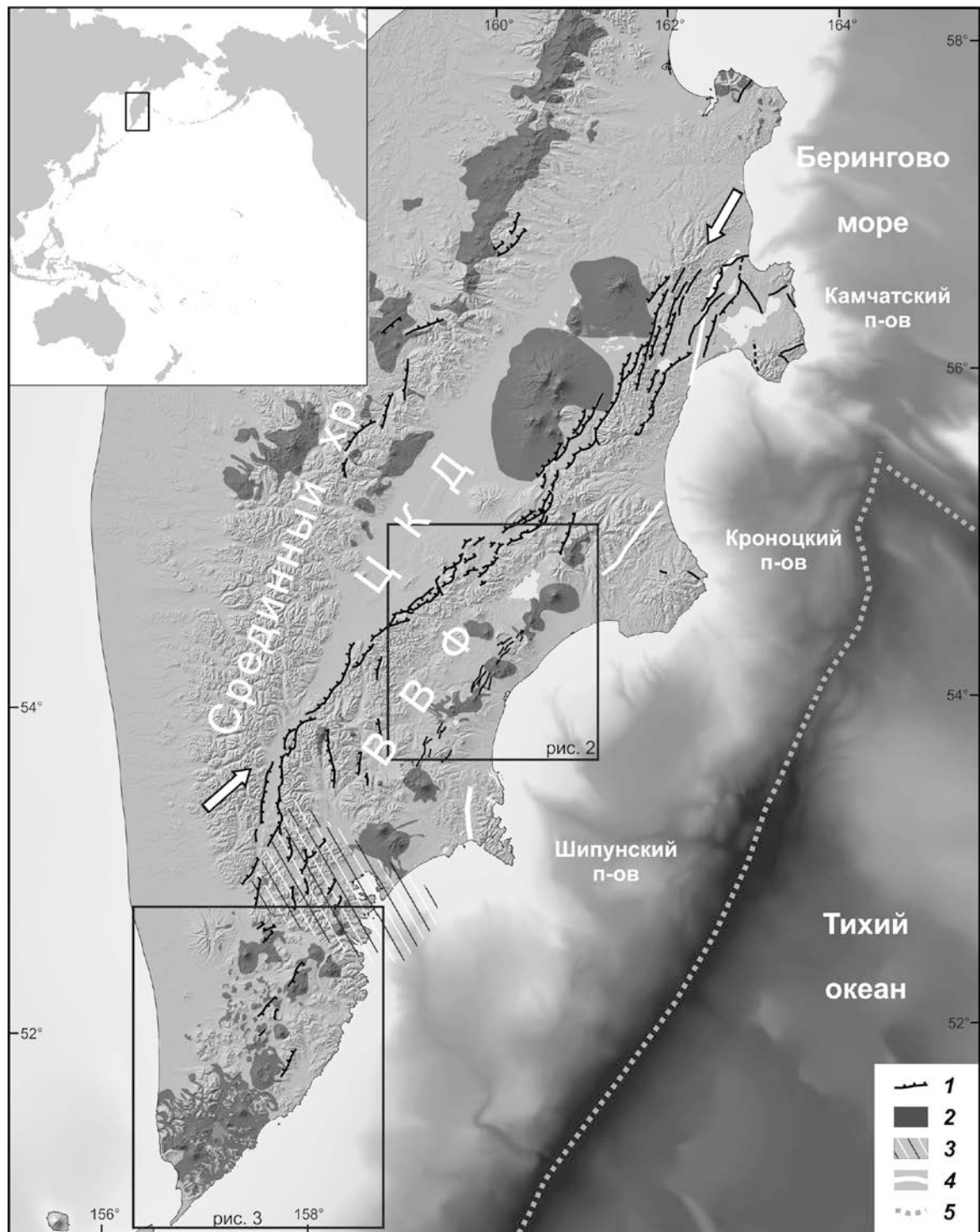


Рис. 1. Основные формы рельефа и позднечетвертичные структуры Камчатки. 1 – активные разломы [Kozhurin, Zelenin, 2017], стрелки указывают положение разломов, входящих в Восточно-Камчатскую зону разломов [Kozhurin et al, 2006]; 2 – области распространения верхнеплейстоценовых вулканитов в соответствии с [Ponomareva et al., 2007], маркирующие положение вулканических поясов; 3 – Начикинская [Мелекесцев и др., 1974] или Малки-Петропавловская [Геология СССР, 1964] зона поперечных дислокаций, 4 – надвиг Гречишкина [Lander, Shapiro, 2007]; 5 – оси глубоководных желобов. ЦКД – Центральная Камчатская депрессия (отвечает Центрально-Камчатскому рифту по [Государственная..., 2006]) ВВФ – Восточный вулканический фронт (Восточно-Камчатский вулканический пояс по [Государственная..., 2006]). В качестве географической основы для суши использована теневая отмывка по ЦМР SRTM 1 arc-second [USGS EarthExplorer], для океана – донный рельеф, в соответствии с [Селиверстов, 2009].

Аналогично, в литературе отсутствуют данные об активных разломах вулканического пояса Срединного хребта. Свой вклад в изученность проблемы внесли работы по изучению голоценовой истории отдельных вулканических центров. Тем не менее, конкретные характеристики разрывов вулканических областей Камчатки, такие как распределение, направление и скорости движений по ним, до настоящего времени оставались за пределами внимания исследователей.

**Цель диссертационного исследования** состоит в выявлении параметров активной разломной тектоники вулканических поясов Камчатки и, на этой основе, определении характера деформаций земной коры в их пределах, а также связи активных тектонических и вулканических процессов.

**Задачами исследования являются:**

- 1) выявление активных разломов вулканических областей Камчатки, закономерностей их распределения, характера образуемого ими структурного рисунка;
- 2) определение основных параметров кинематики активных разломов – направления и средней скорости движений по ним;
- 3) определение, на этой основе, возможных механизмов деформирования земной коры вулканических поясов Камчатки;
- 4) выявление возможных связей активных тектонических и вулканических процессов.

**Фактической основой работы** послужили результаты полевых исследований, проведенных автором на полуострове Камчатка в 2010-2016 гг. в составе полевых отрядов ГИН РАН и палеосейсмологического отряда Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН и данные дистанционного зондирования Земли высокого разрешения. Помимо собственно структурно-геоморфологического дешифрирования, для получения параметров разломов по данным ДЗЗ автором были созданы стереоскопические модели местности и цифровые модели рельефа. В ходе полевых работ плоскости отдельных разломов были вскрыты канавами, для каждой из них установлены кинематика, количество и возраст голоценовых подвижек.

**Методы исследования.** Поскольку активные разломы деформируют не только отложения, но и формы рельефа, базовым методом исследования является геолого-геоморфологическое дешифрирование аэрофото- и космоснимков, в том числе в стереорежиме. Фотограмметрические измерения по стереомоделям, цифровым моделям рельефа и методом радиолокационной интерферометрии позволили получить геометрические параметры разломных уступов для всего обширного района исследований. Полевые исследования включали в себя геодезическую съемку деформированных форм рельефа, а также детальное описание и последующая интерпретация деформированных отложений, вскрытых канавами («трэнчинг»). Детальное датирование голоценовых подвижек производилось тефрохронологическим методом.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Впервые выявлены основные закономерности пространственного распределения и параметры активных разломов вулканических областей Камчатки; полученные данные представлены в виде электронной карты, по детальности аналогичной карте масштаба 1 : 15 000.

2. Выявлены особенности движений по активным разломам вулканических поясов: частые подвижки и малые (дециметрового и сантиметрового масштаба) величины разовых смещений.

3. На основе полученных данных об активных разломах показано, что земная кора в вулканических поясах испытывает поперечное им удлинение; определена средняя за позднеплейстоцен-голоценовое время скорость удлинения, структурными данными обоснована небольшая, по сравнению с авулканическими районами, мощность верхнего слоя земной коры, испытывающего хрупкие разломные деформации.

4. Показаны различия между разломной тектоникой (ее основными характеристиками) вулканических поясов Южной и Центральной Камчатки, предложена интерпретация этих различий в связи с продольными вариациями в характере и интенсивности деформации островной дуги в целом.

### **Защищаемые положения:**

1. В активных вулканических областях Камчатки развиты как собственно тектонические активные разломы, представленные исключительно сбросами, так и трещины гидроразрыва, создаваемые продвигающейся к поверхности магмой. И те, и другие ориентированы преимущественно вдоль островной дуги, согласно с простираемостью зоны субдукции Тихоокеанской плиты под Камчатку.

2. Активные сбросовые разломы в пределах вулканических поясов обнаруживают два типа распределения: в виде узкой непрерывной сегментированной системы телескопированных грабенов в осевой части пояса (Восточный вулканический пояс в пределах Центральной Камчатки), или широкой полосы обособленных разломов (вулканические пояса юга Камчатки и Срединного хребта).

3. Простираемостью дизъюнктивных нарушений обоих типов – сбросов и трещин гидроразрыва – свидетельствует о растяжении земной коры под вулканическими поясами Камчатки, поперечном их простираемости. Скорость раздвигания убывает вдоль Камчатки с севера на юг, с удалением от северного края погружающейся плиты. В Восточном вулканическом поясе она составляет примерно 4 мм в год – примерно 22% от скорости общего раздвигания Центральной Камчатки, составляющего около 18 мм в год. На Южной Камчатке скорость раздвигания на порядок меньше – 1,6 мм/год, все оно реализуется в вулканическом поясе.

4. Пространственное и временное совмещение активных вулканических процессов и разломной сбросовой тектоники в ВВФ обеспечивается региональным растяжением Камчатки и утонением под осевой частью вулканического пояса хрупкого слоя земной коры. Относительно небольшая мощность хрупкого слоя под вулканическим поясом определяет также особый тип движений по сбросам – с частыми, но малоамплитудными, подвижками, генерирующими землетрясения малых магнитуд.

**Практическое значение исследования** заключается в получении параметров движений по разломам, необходимых для оценки сейсмической опасности.

**Апробация.** Результаты проведенных исследований были представлены на международных конференциях European Geosciences Union General Assembly (Вена, 2014) и «Современные информационные технологии для фундаментальных научных исследований в области наук о Земле (ITES-2014)» (Петропавловск-Камчатский, 2014); Тектоническом совещании МТК XLIX «Тектоника современных и древних океанов и их окраин» (Москва, 2017). По теме диссертации опубликовано пять статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ [Зеленин, 2017; Романова и др., 2015, Kozhurin, Zelenin, 2017; Churikova et al., 2015; Ponomareva et al. 2017], получено свидетельство о государственной регистрации базы данных «ГИС «Голоценовый вулканизм Камчатки» №2016620587.

### **Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, главы, посвященной геологическому строению Камчатки, методической главы, четырех глав, соответствующих районированию вулканизма Камчатки, главы, обобщающей полученные результаты, заключения и списка литературы (137 наименований), изложенных на 111 страницах текста, и содержит 46 рисунков и 2 таблицы.

### **Благодарности.**

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю д.г.-м.н. А.И. Кожурину за руководство, организацию исследования, наставления и всевозможную поддержку. Автор глубоко признателен своим учителям и коллегам, сотрудникам ИВиС ДВО РАН д.г.н. В.В. Пономаревой и д.г.-м.н. Т.К. Пинегиной за помощь на всех этапах работы – начиная от организации экспедиций до ценных рекомендаций при написании диссертации. Автор благодарит коллектив лаборатории Неотектоники и современной геодинамики Геологического института РАН за поддержку и плодотворные обсуждения; а также всех товарищей по полевым работам, родных и близких, помогавших и вдохновлявших при написании диссертации.

Работы по теме диссертации проводились при финансовой поддержке РФФИ и РНФ, а также в рамках тем научно-исследовательских работ ГИН РАН, направленных на изучение новейшей и активной тектоники Альпийско-Гималайского и Притихоокеанского подвижных поясов.



## **Основное содержание работы**

Во введении сформулированы степень разработанности темы исследования, его цели и задачи; обоснована научная новизна и актуальность, предложены методы исследования и положения, выносимые на защиту.

**Глава 1. Геологическое строение полуострова Камчатка.** Раздел подготовлен преимущественно по литературным источникам и предназначен для формирования у читателя представления о специфике истории развития и современной геодинамической обстановки полуострова.

Полуостров Камчатка – часть активной Курило-Камчатской островодужной системы, протягивающейся на 2 000 км от Японии на юге до сочленения с Алеутской дугой на север (рис.1, врезка). Современное единство этой системы проявляется в непрерывных глубоководном желобе, сейсмофокальной зоне и поясе активного вулканизма. В то же время, Курильская островная дуга существует начиная с олигоцена [Lander, Shapiro, 2007], а современная структура Камчатки приобрела свой облик лишь в последние миллионы лет [Селиверстов, 2009], причем некоторые специфические черты структурного рисунка возникли в четвертичное время [Lander, Shapiro, 2007].

Все главные структуры полуострова протягиваются вдоль его оси, и сменяются с запада на восток, по мере приближения к глубоководному желобу, таким образом: Западно-Камчатский прогиб, Срединно-Камчатский горст-антиклинорий, Центральнo-Камчатский рифт, Восточно-Камчатский горст-антиклинорий, Горст-антиклинорий Восточных полуостровов. Такое сочетание геологических структур, не характерное для типичных островных дуг, связывают с развитием здесь трех разновозрастных вулканических комплексов. Наиболее древним является эоцен-олигоценoвый Западно-Камчатско-Корякский вулканоплутонический комплекс [Филатова, 1988]. Срединный хребет Камчатки соответствует Срединно-Камчатской вулканической дуге, активной с олигоцена по настоящее время и продолжающейся на юг Южно-Камчатско-Курильской вулканической дугой [Авдейко, Подпруженко, Палуева, 2002]. Вулканический пояс Восточной Камчатки имеет плиоцен-четвертичный возраст, здесь неизвестны вулканы старше 5 млн. лет [Lander, Shapiro, 2007].

Такое сочетание вулканических дуг не характерно ни для расположенных южнее Курильских островов [Мелекесцев и др., 1974], ни для примыкающей к Камчатке с востока Алеутской островной дуги [Nakamura, Jacob, Davies, 1977]. В обоих этих случаях островодужный вулканизм сконцентрирован в едином поясе, параллельном глубоководному желобу.

Наличие разобщенных в пространстве вулканических дуг разного возраста Камчатки объяснялось как ее положением на стыке зон субдукции [Tatsumi et al., 1994], так и историей формирования современной островодужной системы: вулканические пояса отвечают различным островодужным системам, сближенным в ходе позднекайнозойского развития северо-западной Пацифики [Авдейко, Палуева, Хлебородова, 2006, Селиверстов, 2009]. Структурную границу между относительно стабильной Курильской островной дугой и сложной островодужной системой Камчатки соотносят с расположенной в южной части полуострова Начикинской [Мелекесцев и др., 1974], Малки-Петропавловской [Геология СССР, 1964] или Авачинской [Lander, Shapiro, 2007] зоной поперечных дислокаций (см. рис. 1), которую интерпретируют как реликт трансформного разлома субдукция-субдукция. Вулканический пояс Срединного хребта интерпретируется как реликт надсубдукционного вулканизма, сместившегося к востоку после причленения к Камчатке Кроноцкой дуги [Авдейко, Палуева, Хлебородова, 2006] или дуги Ширшова-Бауэрс [Селиверстов, 2009], выраженной в современном рельефе Шипунским, Кроноцким и Камчатским полуостровами. С учетом абсолютных датировок и вариаций в глубинах субдукционной сейсмичности Ландер и Шапиро [Lander, Shapiro, 2007] обосновали время коллизии для Шипунского, Кроноцкого и Камчатского полуостровов в 7, 5 и 2 млн. лет назад соответственно. Начиная с этого времени Камчатка развивается в принципиально иной обстановке – коллизия островных дуг проявляется только в зоне сочленения Курило-Камчатской и Алеутской дуги, на полуострове Камчатский [Кожурин и др., 2014].

На фоне перестройки островных дуг северо-западной Пацифики в неогеновое время вполне обоснованной выглядит гипотеза о смене режима деформирования полуострова на неотектоническом этапе. И действительно,

накопленные к настоящему времени данные свидетельствуют об эпизодах выравнивания в конце раннего плиоцена и на рубеже эоплейстоцена и раннего неоплейстоцена [Мелекесцев, 1974]. Период стабилизации тектонического режима, проявленный в формировании предорогенной поверхности и завершившийся излияниями платобазальтов нижнего неоплейстоцена [Мелекесцев, 1974, Шеймович, Патока, 2000] является нижней границей этапа горообразования, продолжающегося и по настоящее время. Таким образом, не существует веских оснований а priori судить об унаследованном развитии активных структур, скорее же древние структуры являются не более чем пассивной средой, испытывающей деформации неотектонического этапа.

Крупнейшим элементом современной структуры Камчатки является Центральная Камчатская депрессия (см. рис. 1), обрамленная с востока и запада Восточными хребтами и Срединным хребтом, соответственно, и не продолжающаяся южнее Начикинской зоны поперечных дислокаций. Эта депрессия имеет асимметричное строение с пологим западным и крутым восточным бортом. Начало формирования ЦКД относят к позднему плиоцену [Мелекесцев и др., 1974]. Граница между ЦКД и Восточными хребтами представляет собой систему сбросов (Восточно-Камчатская зона разломов, ВКЗР по [Kozhurin et al., 2006]). Активизация этой зоны маркируется горизонтами крупнообломочных отложений, которые относят к среднему плейстоцену около 300 тыс. л.н. Суммарное смещение, выраженное в рельефе, соотнесенное с этим периодом времени, соответствует скорости горизонтального раздвигания  $13,7 \pm 3,0$  мм/год [Kozhurin, Zelenin, 2017]. Разломы Срединного хребта охарактеризованы, например, в [Kozhurin et al., 2006]. Их разрозненность и слабая сохранность уступов, различимых на аэрофото- и космоснимках, позволяют судить о больших периодах повторяемости подвижек и, возможно, отсутствии активных среди них.

**Глава 2. Методика исследования.** В наиболее общей формулировке активным является разлом, движения по которому не только происходили, но и будут происходить в будущем. Период времени, необходимый и достаточный для определения активности в формулировках разных авторов варьирует от 10 тыс. лет [Allen, 1975] до 400 тыс. лет [Nikonov, 1995]. В.Г. Трифионов [1983,

1985] предлагает в качестве такого периода последние 100–130 тыс. лет. Из этого следует базовое предположение, определяющее ключевую роль аэрокосмических методов исследования: активные разломы деформируют позднечетвертичные формы рельефа и коррелятны им отложения.

К важным косвенным дешифровочным признакам разломов, относятся 1) накопление величины смещения со временем, 2) сохранение направления движений по разлому в течение длительного времени, 3) любой активный разлом формируется при том же напряженном состоянии литосферы, что и прочие активные структуры региона, и оттого его кинематика не может противоречить общему структурному рисунку. Из названных признаков вытекают основные требования к выбору данных дистанционного зондирования – возможность измерения или, как минимум, оценки высоты разломного уступа и величины выраженного в рельефе горизонтального смещения и непрерывный пространственный охват съемкой однородного качества для формирования полной картины распространения структур. Первое требование обуславливает необходимость привлечения цифровых моделей рельефа и стереоизображений; второе требование ограничивает применимость аэрофотоснимков, не умаляя их значимости при изучении конкретных разломов.

В исследовании используются возрасты сформированных вулканизмом и деформированных активной разломной тектоникой поверхностей, что обуславливает пристальное внимание к позднечетвертичной истории вулканизма Камчатки. Ее голоценовый этап восстановлен в результате многолетних исследований тефрохронологической группы Института вулканологии и сейсмологии в содружестве с сотрудниками Геологического института практически полностью, а результаты представлены в ряде статей по отдельным вулканам, включающих карты и схемы их вулканических образований. Для использования этих данных совместно с данными ДЗЗ автором была выполнена географическая привязка карт и схем. Во многих случаях контуры распространения тех или иных отложений были уточнены в соответствии с детальными данными ДЗЗ, атрибуты были приведены к единому виду и нормализованы. Подготовленные таким образом карты были собраны в

реляционную геопространственную базу данных (БД), структура которой наиболее удобна для использования в ГИС. Запрос на представление данных по голоценовому вулканизму в виде геопространственной БД, обусловил развитие рабочей БД автора до опубликованной [Романова и др., 2015] и зарегистрированной (Свидетельство о государственной регистрации №2016620587). После разработки способов изображения БД была включена в геопортал Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН как ГИС "Голоценовый вулканизм Камчатки" [Романова и др., 2015].

Важнейшим методом полевых исследований, позволяющим охарактеризовать непосредственно плоскость разлома вблизи земной поверхности, величины разовых смещений по нему и периодах повторяемости смещений является так называемый тренчинг, то есть выкапывание канавы поперек предполагаемой плоскости разлома и описание деформаций, вызванных подвижками, в стенке искусственного обнажения. Более того, интерпретация отложений в стенке канавы с той или иной точностью позволяет установить количество подвижек по разлому за время накопления вскрытых отложений, их амплитуду и возраст, а на их основе – магнитуду и повторяемость вызванных подвижками по разлому землетрясений [Трифонов, Кожурин, 2010].

Индикатором региональной и локальной геодинамической обстановки является взаимное расположение центров извержений. Значительная доля вулканических поясов Камчатки представляет собой поля ареального вулканизма [Дирксен, 2009], который зачастую проявляется синхронными извержениями из цепочек шлаковых конусов [Дирксен, 2009, Churikova et al., 2015]. Как натурные наблюдения, так и физическое моделирование [Rubin, 1995] показывают, что необходимым условием для такого извержения является вспарывание трещиной потоком магмы по механизму гидроразрыва, причем ориентация трещины в однородной среде будет тяготеть к горизонтальной проекции оси минимального сжатия. Несмотря на то, что в пределах отдельного вулканического центра ориентировка может быть подчинена сугубо локальным условиям [Tibaldi, 1995], для полного регионального набора данных показано [Le Corvec et al., 2013] соответствие региональному полю напряжений.

**Глава 3. Дизъюнктивные нарушения Восточного вулканического пояса.** Рассматриваемая в главе территория с юга ограничена Начикинской [Мелекесцев и др., 1974] или Малки-Петропавловской [Геология СССР, 1964] зоной поперечных дислокаций. На севере вулканический пояс смещается к западу и переходит в вулканы Центрально-Камчатской депрессии (ЦКД), рассматриваемые в главе 5.

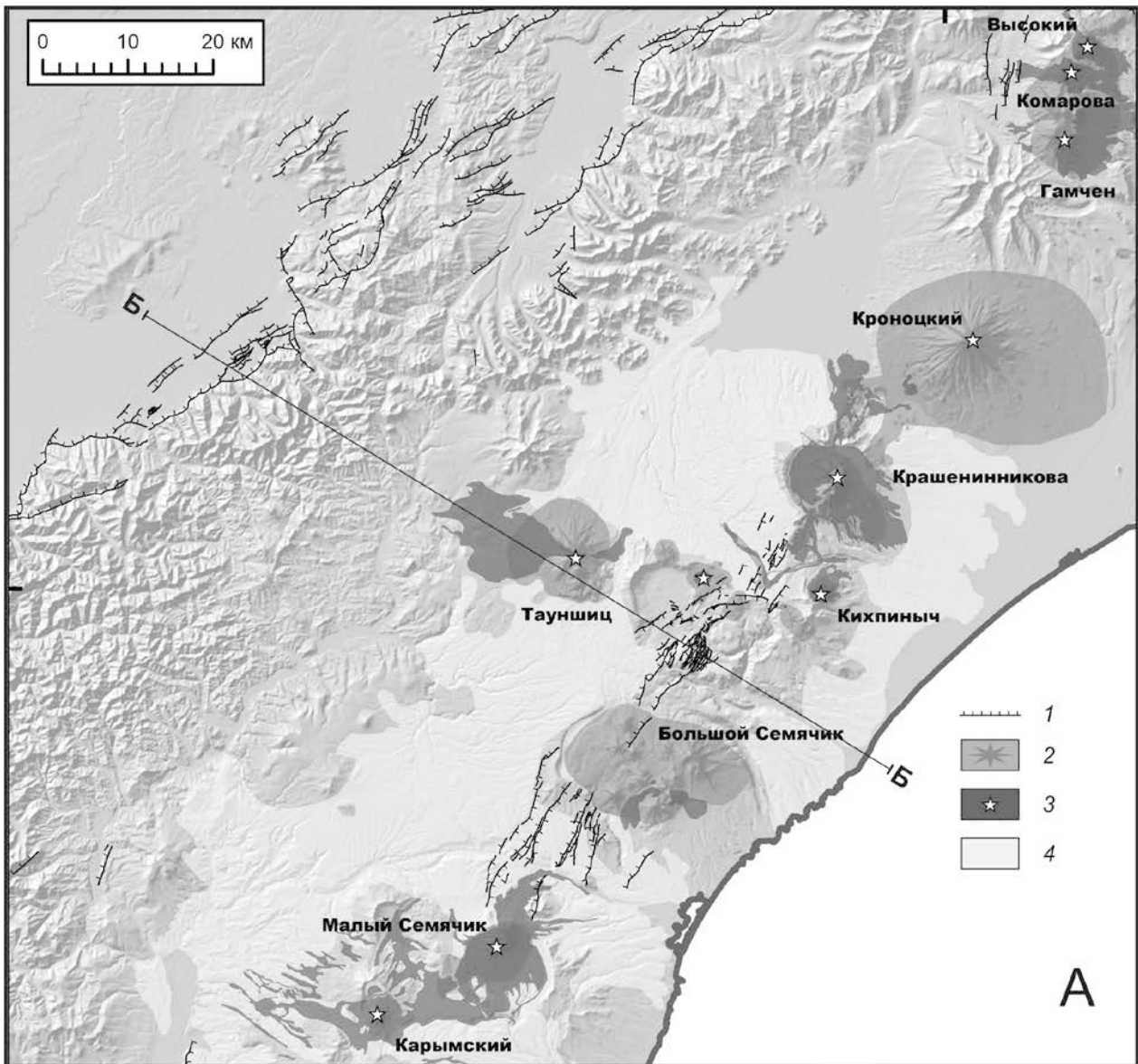
Специфической чертой вулканизма этого вулканического пояса является распространение четвертичных кальдер и обширных пирокластических полей между ними. Кальдеры сконцентрированы вдоль оси вулканической зоны и во многих случаях наложены друг на друга [Леонов, Гриб, 2004, Bindeman et al., 2010]. Разломы образуют узкую полосу вложенных грабенов вдоль оси вулканического пояса (рис. 2А). Ширина деформированной зоны постепенно уменьшается от 10 км на юге до 2 км на севере.

Автором были проведены детальные исследования параметров сбросов: фотограмметрические измерения позволили определить величину накопленного вертикального смещения по отдельным разломам с точностью до 1м и характерные углы падения на нескольких поперечных пересечениях зоны разломов, а данные о возрасте пирокластических отложений [Bindeman et al., 2010, Флоренский, 1984] послужили основанием для оценки скоростей деформаций. Кинематика движений по разломам была установлена в ходе полевых палеосейсмологических работ и при дешифрировании стереоснимков высокого разрешения.

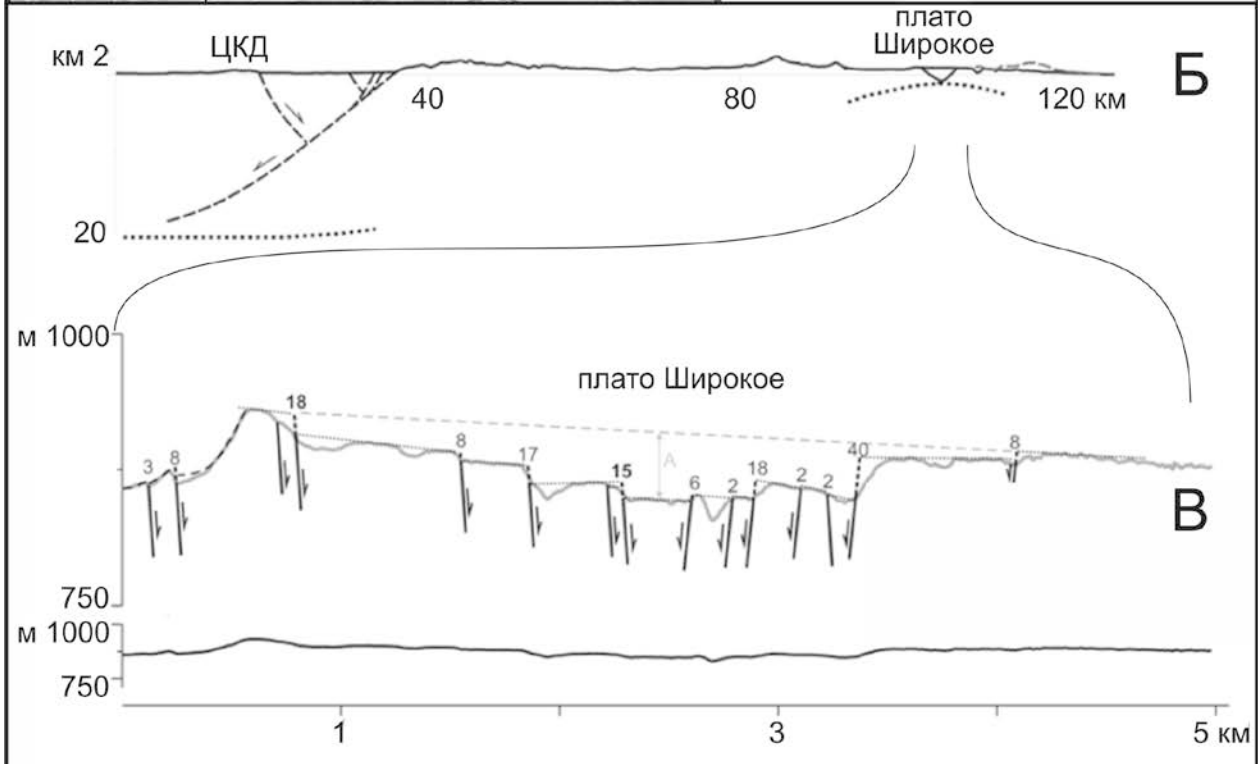
Рис. 2. А. Дизъюнктивные нарушения Восточного вулканического пояса. 1 – активные сбросы [Zelenin, Kozhurin, 2017]. 2 – верхнеплейстоценовые вулканы и центры извержений [Ponomareva et al., 2007], 3 – голоценовые вулканы и центры извержений [ГИС «Голоценовый вулканизм Камчатки»], 4 – поля пирокластических отложений [Bindeman et al., 2010]. Б-Б – положение линии профиля (рис. 2Б). Географическая основа – теневая отмывка по ЦМР SRTM [USGS EarthExplorer].

Б. Структурный профиль через восточную часть Центральной Камчатской депрессии (ЦКД) и Восточный вулканический фронт [Кожурин, Зеленин, 2017]. Пунктирная линия – предполагаемое положение основания хрупкого слоя коры.

В. Гипсометрический профиль через плато Широкое, вверху – с преувеличенным вертикальным масштабом, внизу – с равным вертикальным и горизонтальным масштабами [Kozhurin, Zelenin, 2017]. Числа соответствуют вертикальному смещению по разломам. Сумма смещений составляет 147 м при глубине грабена 60-61 м.



А



Для разломов на плато между Большим и Малым Семячиком установлена величина накопленного вертикального смещения около 170 м при глубине грабена 65 м; для плато Широкого величина накопленного вертикального смещения составила как минимум 147 м при глубине грабена 60-65 м и характерных углах падения  $40\pm 8^\circ$  (рис. 2 В). Горизонтальное раздвигание, соответствующее такой кинематике, составляет как минимум  $175\pm 50$  м. Средняя скорость горизонтального раздвигания составляет  $4,0 \pm 1,2$  мм/год за время существования плато, последние ~40 тыс. лет [Kozhurin, Zelenin, 2017].

Ширина деформированной части ВВФ соответствует мощности хрупкого слоя 2-3 км под плато Широким и не более 10 км под плато между Большим и Малым Семячиком. Небольшая мощность хрупкого слоя земной коры в осевой части вулканических поясов, то есть небольшая площадь плоскостей разрывов, обуславливает частые подвижки по разломам с меньшей разовой амплитудой, что показано на примере деформаций почвенно-пирокластического чехла плато Широкого плоскостью разлома с минимальной амплитудой подвижки 1 см и максимальной амплитудой не более 45 см. Существующие геофизические данные для Восточной Камчатки [Гонтовая, Гордиенко, Гордиенко, 2009] подтверждают подъем вдоль оси вулканического пояса изотермы  $500^\circ\text{C}$ , соответствующей подошве хрупкого слоя в основных породах [Handy, 1989], до глубины меньше 20 км. К сожалению, малая детальность геофизических данных не позволяет уверенно определить фактическую глубину изотермы.

Сейсмологические зависимости [Villamor et al., 2001, Leonard, 2010, Hanks, Vakup, 2002] показывают, что описанная геометрия разрывов соответствуют моментной магнитуде крупнейших подвижек около 4,2 при средней повторяемости для каждого из крупных разломов 100-400 лет. Разовые подвижки, соответствующие такой магнитуде составляют порядка 15 см, что полностью соответствует наблюдаемым смещениям почвенно-пирокластического чехла.

**Глава 4. Дизъюнктивные нарушения вулканического пояса Южной Камчатки.** В главе рассмотрена южная часть Восточного вулканического

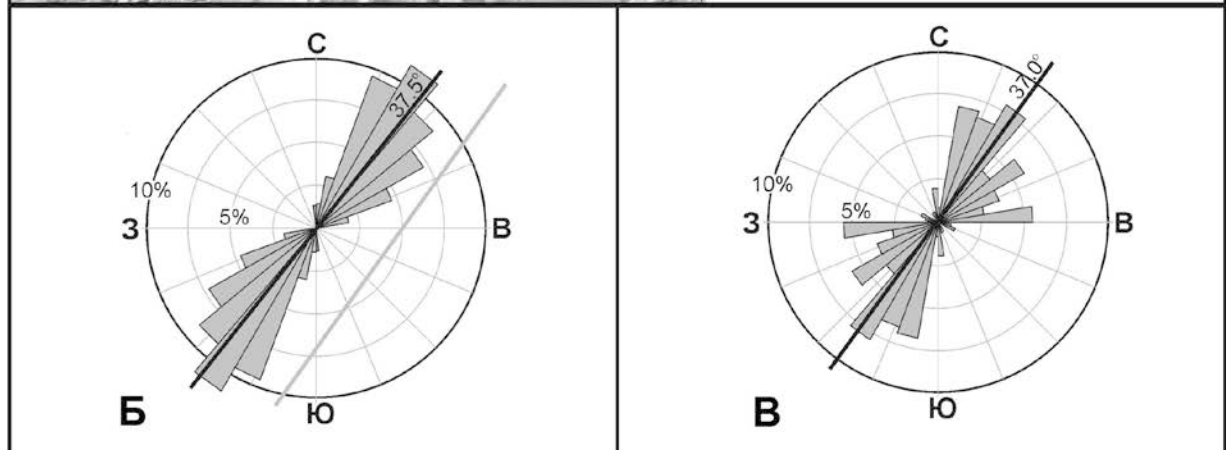
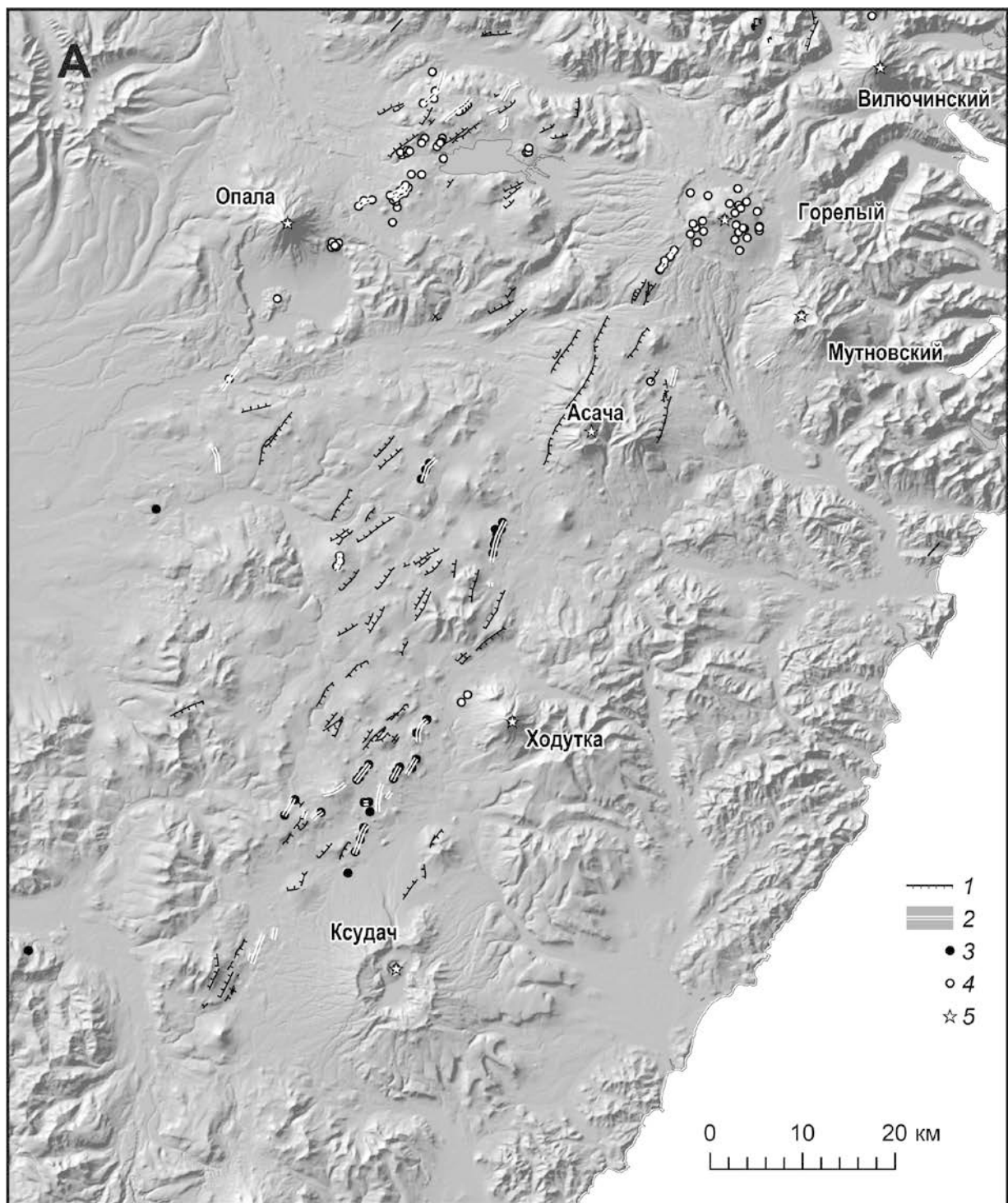


пояса, включающая в себя все позднечетвертичные вулканы Южной Камчатки от Начикинской зоны поперечных дислокаций до южного окончания полуострова Камчатки.

Выявленные на Южной Камчатке позднечетвертичные разломы представлены сбросами, ориентированными преимущественно вдоль островной дуги (рис. 3 А, Б). В целом, наличие таких разрывных нарушений свидетельствует о поперечном удлинении земной коры Южной Камчатки. Помимо сбросов, это удлинение проявлено и одноактными магмоподводящими трещинами такого же простирания, как и у разломов (рис. 3 В). Сумма горизонтальных поперечных смещений по отдельным нарушениям дает среднее значение скорости поперечного удлинения дуги примерно в 1,6 мм/год в позднечетвертичное время, что на порядок меньше, чем раздвигание в пределах Центральной Камчатки (рис. 4).

Характерная длина выявленных разломных уступов не превышает 8 км. Как отмечено в работах [Leonard, 2010, Hanks, Bakun, 2002], 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 (например [England, Katz, 2010]).

**Глава 5. Дизъюнктивные нарушения вулканического пояса Центральной Камчатской депрессии.** Индикатором тектонического режима территории является ориентировка цепочек шлаковых конусов в пределах полей ареального вулканизма за пределами крупных вулканических построек. Азимут простирания таких цепочек составляет от 30° до 55° – они параллельны глубоководному желобу южной части и косо приближаются к зоне субдукции в северной части, что соответствует обстановке растяжения земной коры



перпендикулярно оси субдукции при уменьшении величины раздвигания в северной части группы вулканов (рис. 4).

Благодаря исследованиям трещинного извержения ТТИ-50, происходившего в Толбачинской региональной зоне шлаковых конусов в 2012 – 2013 гг., были выявлены деформации поверхности, которые допустимо экстраполировать на предшествовавшие трещинные извержения этой зоны. По данным дифференциальной радарной интерферометрии было установлено, что извержение сопровождалось внедрением дайки мощностью около 6 м, [Lundgren et al., 2015]. Грубая экстраполяция этих измерений на голоценовое время соответствует общему раздвиганию 10-30 м при средней скорости 1-3 мм/год.

Единственная существенно деформированная разломами территория, которую относят к Ключевской группе вулканов – Хапичинский дол [Святловский, 1967] или Хапиченское плато [Ермаков, 1977], базальтовое плато возрастом  $274 \pm 8$  тыс. лет [Calcins, 2004], расположенное в северо-восточной части Ключевской группы и деформированное Восточно-Камчатской зоной разломов. Обособленные разломами фрагменты часто перекошены, наклонены на юго-восток. Кроме крупных разломов с видимым смещением, на ДДЗ сверхвысокого разрешения различимы малые разрывы, проявленные в рельефе цепочками суффозионных воронок. Среднее простирание трещин, полученное осреднением ориентаций трещин скользящим окном, совпадает с осью Восточно-Камчатской зоны разломов, вариации в простирании не превышают  $15^\circ$  и не образуют какой-либо закономерности.

Рис. 3. А. Активные дизъюнктивные структуры Южной Камчатки [Зеленин, 2017]. 1 – активные разломы (штрихи в направлении опущенного крыла), 2 – послеледниковые магмопроводящие трещины; одноактные центры извержений: 3 – предположительно голоценовые, 4 – голоценовые датированные; 5 – крупнейшие вулканические центры, активные в голоцене. Географическая основа – теневая отмывка по ЦМР SRTM [USGS EarthExplorer].

Б. Роза-диаграмма ориентировки активных разломов Южной Камчатки, Серая линия - азимут простирания глубоководного желоба.

В. Роза-диаграмма ориентировки магмопроводящих трещин Южной Камчатки.

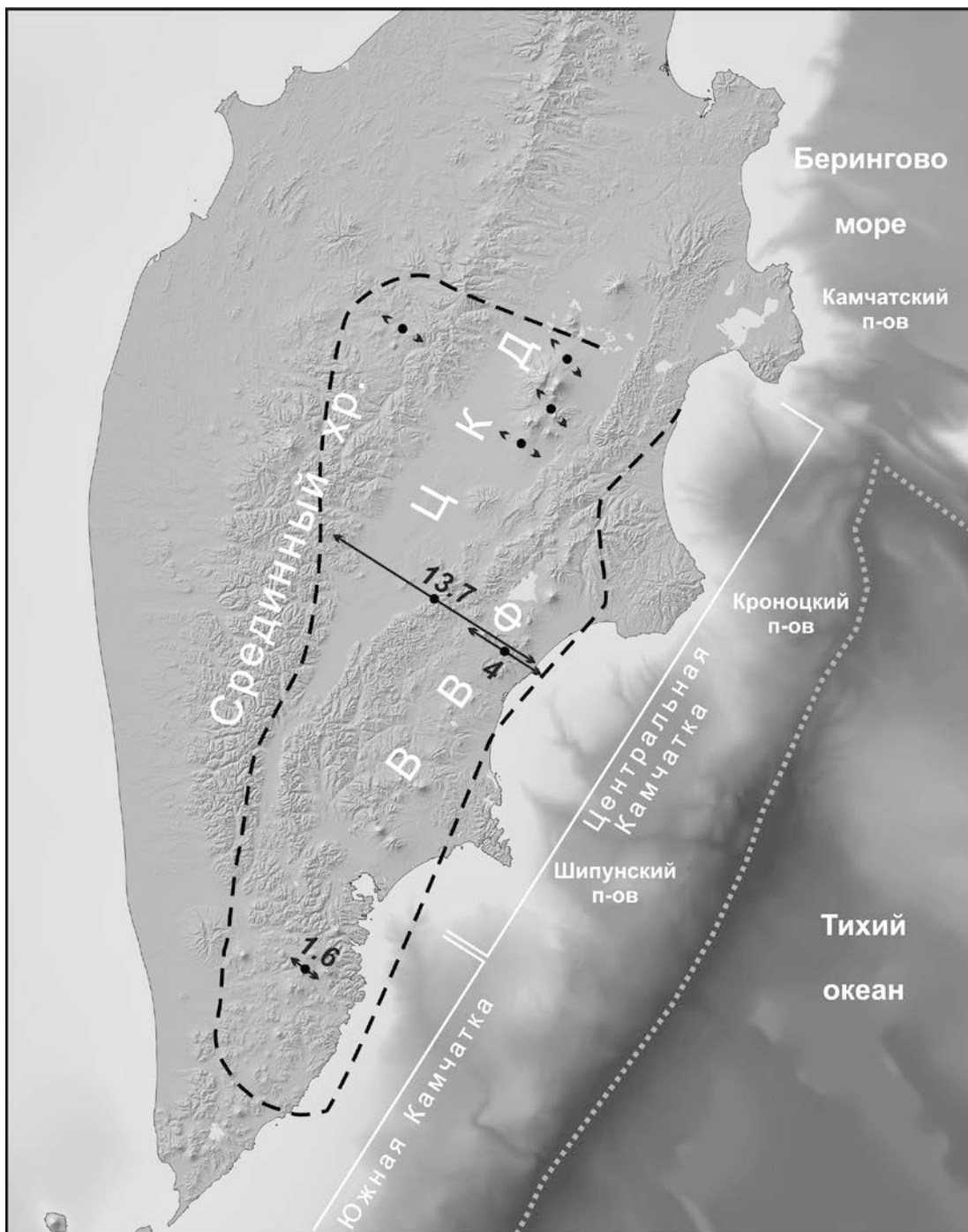


Рис. 4. Векторы современного горизонтального растяжения полуострова Камчатка. Черными стрелками показано направление и скорость растяжения (мм/год). Стрелки без линий показывают направление растяжения, проявленного в магмопроводящих трещинах Ключевской группы вулканов и разломах Срединного хребта. Штриховая линия ограничивает область распространения активных структур растяжения. Географическая основа для суши - теневая отмывка по ЦМР SRTM 1 arc-second [USGS EarthExplorer], для океана – донный рельеф, в соответствии с [Селиверстов, 2009]. ЦКД – Центральная Камчатская депрессия (отвечает Центрально-Камчатскому рифту по [Государственная..., 2006]) ВВФ – Восточный вулканический фронт (Восточно-Камчатский вулканический пояс по [Государственная..., 2006]).

Описанные в стенках искусственных обнажений (канав) деформации почвенно-пирокластического чехла подтверждают активность системы разломов и сбросовую кинематику подвижек по ним. Общее простирание разломов и трещин плато соответствует ориентировке Восточно-камчатской зоны разломов, в вариациях простирания трещин не прослеживается концентричности, которую можно было бы ожидать при деформациях обусловленных влиянием вулканических построек. Наклон поверхностей блоков указывает на листрическую морфологию разломов, отвечающую условиям поперечного горизонтального растяжения.

#### **Глава 6. Дизъюнктивные нарушения Срединного хребта.**

Голоценовый вулканизм Срединного хребта не образует непрерывного пояса [ГИС «Голоценовый вулканизм Камчатки»], а положение его в тылу островной дуги позволяет ожидать малых скоростей деформаций в этой зоне, если они вообще присутствуют. Поскольку за исторический период ни один из вулканов хребта не проявлял активности, исследователи считают пояс затухающим [Авдейко и др., 2002, 2006] или полностью неактивным [Park et al., 2002]. Активные разломы никогда здесь детально не изучались: в работе [Kozhurin et al., 2006], например, отмечалось существование отдельных разломов в Срединном хребте при очевидно малой скорости подвижек. Все выявленные в настоящей работе разломы расположены в центральной части Срединного хребта, приблизительно на широте Ключевской группы вулканов (рис. 4). Они приурочены к северной части Анаунского дола, позднечетвертичного лавового плато, и вытянуты косо по отношению к оси глубоководного желоба. Некоторые из разломов пересекают долины реки Тигиль и ее притоков, что позволяет определить углы падения и направление движения по разломам. Все измеренные разломы являются сбросами с падением 55-60°. Отсутствие надежных возрастных привязок не позволяет оценить скорости деформаций. Разломные уступы прослеживаются и севернее описанной территории, но слабая сохранность уступов не дает оснований считать эти разломы активными.

**Глава 7. Вариации параметров деформирования вулканических областей Камчатки и их геодинамическая интерпретация.** Как было показано в главах 3-6, значительная часть территории полуострова южнее сочленения с Алеутской дугой вовлечена в современное раздвигание, поперечное оси полуострова. Скорость раздвигания убывает вдоль Камчатки с севера на юг, с удалением от северного края погружающейся плиты. Для Центральной Камчатки оно составляет 17,7 мм в год, тогда как для Южной Камчатки на порядок меньше – 1,6 мм/год (рис. 4). Это раздвигание проявляется как в пределах вулканических поясов, так и в Восточно-Камчатской зоне разломов, причем вариации в выраженности структур растяжения не коррелируют с продуктивностью вулканизма. Тем не менее, раздвигание, вызванное расклинивающим действием магмы, аналогичным гидроразрыву, может проявляться локально, как показано для юго-западного склона вулкана Горелый [Zelenin et al, 2014].

Теоретически, возможность для независимого контроля сделанных выводов о современном характере деформирования надсубдукционной части Камчатки предоставляют данные долгосрочного GPS-мониторинга и коровой сейсмичности. Несмотря на очевидную неполноту данных, связанную с коротким рядом GPS-мониторинга и неопределенностями в повторяемости крупнейших субдукционных землетрясений, полученные скорости и направления смещения земной коры Камчатки не противоречат установленным путем изучения активных разломов, хотя и не могут их уточнить. Выборка механизмов очагов коровых землетрясений Камчатки, опубликованных в рамках проекта «The Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) Project» состоит всего лишь из 9 событий: все они имеют сбросовую кинематику, что подтверждает выводы о доминирующей сбросовой кинематике активных разломов и общем режиме поперечного удлинения земной коры полуострова в позднечетвертичное время.

Скорости деформаций увеличиваются к северному окончанию зоны субдукции, что может указывать на обусловленность режима деформирования



положением полуострова Камчатка у окончания зоны субдукции. Такая связь была обоснована математическим трехмерным моделированием развития зоны субдукции [Schellart et al., 2007] как результат латерального внедрения магмы в астеносферный клин у боковой границы слэба (рис. 5А). Расчетная скорость такого растяжения, исходя из ее протяженности и относительных скоростей плит Курило-Камчатской зоны субдукции, составляет 28 мм/год близ северного окончания зоны субдукции [Schellart et al., 2007]. Поскольку эта скорость близка к минимальной оценке скорости растяжения, проявленного в активной разломной тектонике Центральной Камчатки – 17,7 мм/год [Kozhurin, Zelenin, 2017], модель латерального мантийного потока представляется

удовлетворительным объяснением наблюдаемого поперечного растяжения земной коры полуострова. Детальные расчеты [Honda, 2009] позволяют оценить масштабы вовлеченных в растяжение объемов литосферы и астеносферы. При модельной

длительности субдукции 5 млн. лет растяжение должны испытывать верхние

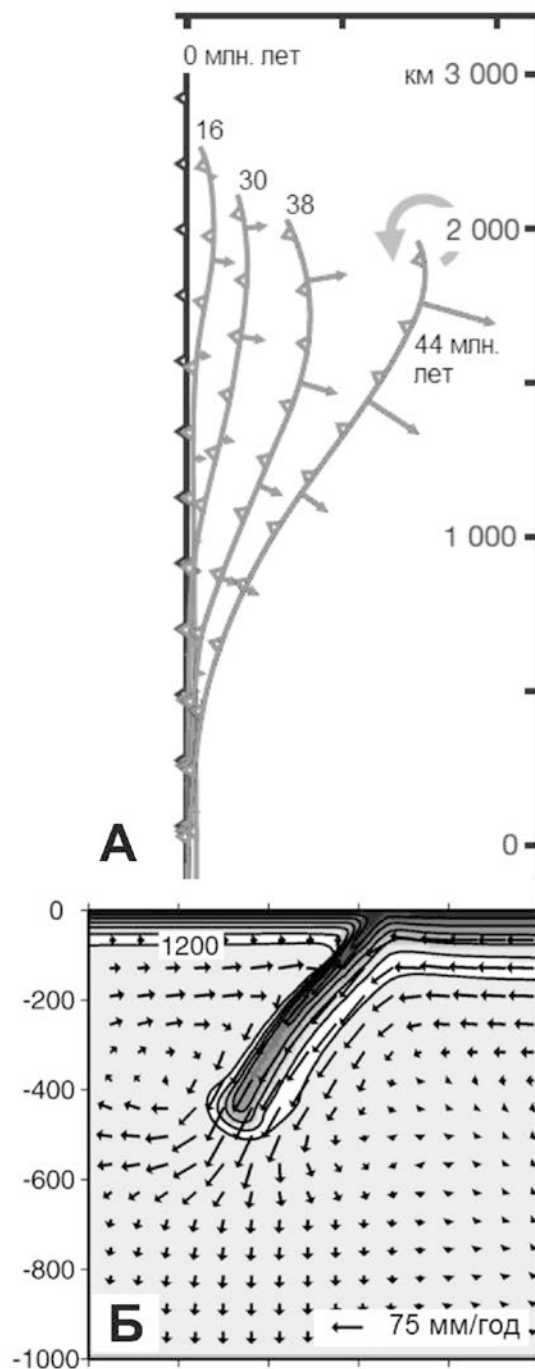


Рис. 5. А. Численная модель отступления зоны субдукции у края субдуцирующей плиты, вызванного латеральным мантийным током (стрелка у края зоны субдукции через 44 млн. лет) [Schellart et al., 2007]. Б. Численная модель скорости мантийных токов у края субдуцирующей плиты, вертикальный разрез [Honda, 2009]. Изолиниями показана температура. Длительность погружения слэба – 5 млн. лет

~300 км на расстоянии 0-600 км от оси желоба (рис. 5Б). Сравнимую ширину имеет и полоса активных разломов Камчатки, что также является аргументом в пользу предложенного механизма растяжения.

**Заключение.** Проведенная работа позволила выявить основные закономерности пространственного распределения и параметры активных разломов вулканических областей Камчатки, а также особенности движений по активным разломам вулканических поясов – их кинематику и средние скорости, что дало основания предположить возможные механизмы деформирования земной коры вулканических поясов Камчатки.

### **Список основных публикаций по теме диссертации:**

#### **Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. Зеленин Е.А., Позднечетвертичные деформации Южной Камчатки // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. №3. Вып. 35. С. 103-111.
2. Романова И. М., Зеленин Е. А., Михайлюкова П. Г., Пономарева В. В. Геопортал Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН и геосервис «Голоценовый вулканизм Камчатки» // Геодезия и картография. №8. 2015. С. 17-24.
3. Kozhurin A.I., **Zelenin E.A.**, An extending island arc: The case of Kamchatka // Tectonophysics 2017. V.706-707. P. 91-102.
4. Ponomareva V., Portnyagin M., Pendea I.F., **Zelenin E.**, Bourgeois J., Pinegina T., Kozhurin A., A full holocene tephrochronology for the Kamchatsky Peninsula region: Applications from Kamchatka to North America // Quaternary Science Reviews. 2017. V.168. P.101-122.
5. Churikova T.G., Gordeychik B.N., Edwards B.R., Ponomareva V.V., **Zelenin E.A.**, The Tolbachik volcanic massif: A review of the petrology, volcanology and eruption history prior to the 2012–2013 eruption // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2015. V. 307. P. 3-21.



Пономарева В.В., Зеленин Е.А., Михайлюкова П.Г., свидетельство о государственной регистрации базы данных "ГИС "Голоценовый вулканизм Камчатки"" №2016620587.

**Тезисы и материалы совещаний:**

**Зеленин Е.А.,** Кожурин А.И., Активные разломы областей современного вулканизма Камчатки // Тектоника современных и древних океанов и их окраин. Материалы XLVI Тектонического совещания. М. "ГЕОС", 2017, т. 1, с. 140-143.

Кожурин А. И., **Зеленин Е.А.,** Активные разломы Восточного вулканического фронта: параметры, возможные механизмы образования // Материалы XX региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвящённой Дню вулканолога, 30 – 31 марта 2017 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2017. С. 126-129.

**Zelenin E. A.,** Kozhurin A. I., Pinegina T. K., Mikhaylyukova P. G., An opening magmatic fissure: structural pattern of its termination. Geophysical Research Abstracts Vol. 16. EGU2014-9776. 2014. EGU General Assembly 2014.

**Zelenin E.A.,** Ponomareva V.V., Mikhaylyukova P.G., The geospatial database of Kamchatka Holocene volcanism: structure and implementation using PostgreSQL/PostGIS. Modern Information Technologies in Earth Sciences: Proceedings of the International Conference, Petropavlovsk-Kamchatsky, September 8-13, 2014. Vladivostok: Dalnauka. 2014. P. 158.

---

## ОБРАЗЕЦ ОТЗЫВА

На автореферат диссертации Зеленина Егора Александровича  
«Активная разломная тектоника областей современного вулканизма  
Камчатки», представленной на соискание ученой степени кандидата геолого-  
минералогических наук по специальности 25.00.03 – геотектоника и  
геодинамика.

Текст

Фамилия Имя Отчество

Ученая степень

Ученое звание

Должность, структурное подразделение

Полное наименование организации (как в Уставе)

Адрес: 000 000, г. \_\_\_\_\_, ул. \_\_\_\_\_, д. \_\_\_\_\_

Интернет сайт организации

Email: \_\_\_\_\_

раб. тел.: (000) 000-0000

Я, Иванов Иван Иванович (ФИО полностью), даю согласие на включение моих  
персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного  
совета и их дальнейшую обработку.

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г. \_\_\_\_\_

Место печати

\_\_\_\_\_ Подпись

Подпись Иванова И.И. заверяю (подпись заверяется заведующим канцелярией,  
с указанием его должности и фамилии, и скрепляется печатью организации).

---