

Актуальные проблемы

УДК 551.242

АКТИВНАЯ РАЗЛОМНАЯ ТЕКТНИКА ЮГА ЦЕНТРАЛЬНОЙ КАМЧАТКИ

© 2008 А.И. Кожурин¹, В.В. Пономарева², Т.К. Пинегина²

¹Геологический институт РАН, Москва, 119017;
e-mail: kozhurin@ginras.ru

²Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский, 683006;
e-mail: ponomareva@kscnet.ru

В статье рассматриваются общие черты активной разломной тектоники района южного замыкания Центральной Камчатской депрессии и перехода от структур Центральной Камчатки к структурам Южной Камчатки. Описание предваряется определением термина «активный разлом» и краткой характеристикой геолого-геоморфологических методов изучения активных разломов, включая тренчинг. Их применение иллюстрируется на примере одного их разломов, рассматриваемого в качестве представительного. В качестве дополнительного метода использовано георадиолокационное зондирование.

Палеосейсмологическая интерпретация нарушенного разреза молодых отложений и определение возраста деформированных и недеформированных слоев методами радиоуглеродного датирования и тефрохронологии позволили установить, что последняя подвижка по изученному разлому имела место между 8.4 и 10 тыс. лет назад. Общая величина смещения по плоскости разлома (с учетом угла падения) составила примерно 1.4 м. Длина появившегося на земной поверхности сейсморазрыва определена интервалом от 8 до 15-16 км. На основе этих данных, моментная магнитуда вызванного подвижкой землетрясения оценена значением порядка 6.5. Предполагается, что импульсный характер перемещений и способность генерировать сильные землетрясения свойственны всем активным разломам района.

Основные активные разломы района образуют ряд северо-западного простирания, в пределах которого они расположены относительно друг друга кулисно. Сбросовая морфология разломов и характер их подставления совместно указывают на то, что вдоль их зоны в целом происходят правосторонние, возможно, с небольшой компонентой поперечного растяжения, движения. Предполагается, что выделенная правосдвиговая зона может быть южным, направленным в сторону океана, продолжением Восточно-Камчатской зоны активных разломов. Если это так, то можно говорить о существовании структурно обособленного блока Центральной Камчатки, смещающегося относительно Западной и Южной Камчатки в сторону океана.

Отмечена необходимость дальнейшего изучения активной разломной тектоники данного относительно густонаселенного района Камчатки с целью выявления всех сейсмогенерирующих структур и более обоснованной оценки связанной с ними сейсмической опасности.

Ключевые слова: активный разлом, сеймотектоника, палеосейсмология, Камчатка, геодинамика, сейсмическая опасность.

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени установлено, что большинство активных разломов на Камчатке сосредоточены в двух зонах.

Первая из них, Восточно-Камчатская, протягивается между Центральной Камчатской

депрессией (ЦКД) и поднятием Восточных хребтов. Другая зона приурочена к осевой части вулканических поясов и зон востока Камчатки (Флоренский, Трифонов, 1985) и севера ЦКД (Леглер, 1978; Kozhurin, 2007) и, очевидно, тесно связана с молодым вулканизмом полуострова (рис. 1).

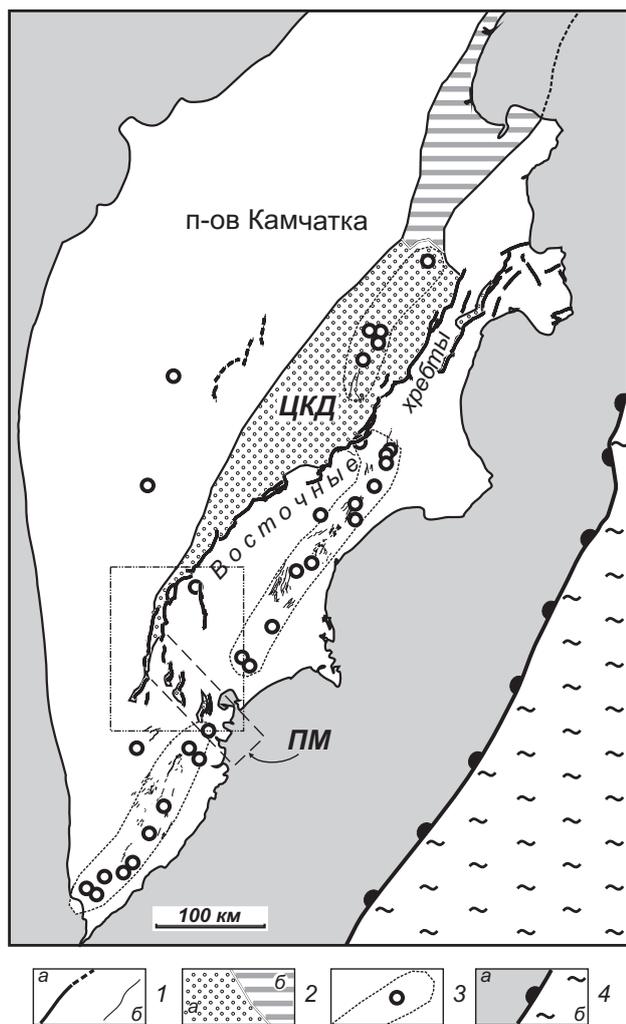


Рис. 1. Зоны активных разломов и вулканизма Камчатки.

1 – основные активные разломы: а – вне вулканических областей (пунктир – предполагаемые), б – осевых частей вулканических поясов; 2 – основные впадины: а – с аккумуляцией рыхлых четвертичных отложений, б – без их аккумуляции, в – поднятия; 3 – контуры поясов позднечетвертичного вулканизма восточной и южной Камчатки и основные центры активного вулканизма; 4 – ось глубоководного желоба, примерная граница между земной корой островной дуги (а) и океанической корой Тихоокеанской плиты (б). ЦКД – Центральная Камчатская депрессия, ПМ – Петропавловско-Малкинская зона поперечных дислокаций (ограничена пунктирными линиями). Прямоугольник (штрих-пунктирная линия) – границы рисунка 3.

разломной тектоники всегда оставался район южного завершения ЦКД и перехода от Центральной Камчатки к Южной. Основные вопросы, возникающие при обращении к этому району – как меняются параметры активной разрывной тектоники там, где ЦКД резко сужается и меняет свое простирание с ССВ на примерно субмеридиональное (Быстринский грабен) и где, образуя граничную между Центральной и Южной Камчаткой структуру, протягивается в северо-западном направлении т.н. Петропавловско-Малкинская (Начикинская) «зона поперечных дислокаций» (Геология., 1964).

В данном районе расположен целый ряд населенных пунктов, включая агломерацию г. Петропавловск-Камчатский – г. Елизово. Поэтому, помимо научного интереса, изучение активных разломов здесь имеет и очевидное практическое значение. Перемещения по активным разломам, при определенной амплитуде разовых смещений, сопровождаются сильными землетрясениями и оценка вероятности и частоты таких сейсмогенерирующих подвижек в самом густонаселенном районе Камчатки чрезвычайно важна.

Изложение первых результатов изучения активных разломов этого района является целью настоящей статьи.

О ПОНЯТИИ «АКТИВНЫЙ РАЗЛОМ»

Существующие определения термина «активный разлом» однотипны и звучат примерно следующим образом: активным следует считать разлом, если в течение некоторого интервала времени (считая от современности) по нему произошла хотя бы одна подвижка. По мнению К. Аллена (Allen, 1975), упомянутый интервал составляет последние ~ 10 тыс. лет (голоцен). По мнению В.Г. Трифонова (1983, 1985), этот интервал следует распространить в глубь времен до 100-130 тыс. лет при изучении подвижных обла-

Эволюция представлений о кинематике разломов Восточно-Камчатской зоны включила практически все возможные интерпретации - от надвиговой (Леглер, Флоренский, 1976; Тихонов, 1968) до сбросовой (Эрлих, 1973; Эрлих и др., 1974), и от левосдвиговой (Леглер, 1974, 1976) до сбросо-правосдвиговой (Кожурин, Востриков, 1988). Во многом расхождение во взглядах можно объяснить тем, что изучались, в большинстве случаев, геоморфологические проявления движений по разломам, а не смещения молодых отложений в обнажениях. Выполненное в последнее время изучение некоторых разломов зоны в стенках искусственных обнажений (канав) подтвердило, что по разломам зоны и зоне в целом в позднечетвертичное время происходили преимущественно сбросовые движения, иногда с меньшей или равной по амплитуде правосдвиговой компонентой (Kozhurin et al., 2006). Кроме того, полученные данные показали, что движения по разломам зоны происходили импульсами, то есть, генерируя сильные ($M_w \geq 6-6.5$) землетрясения, с периодами повторяемости в первые тысячи лет (Kozhurin et al., 2006).

Менее изученной в отношении активной

стей, и до ~ 700 тыс. лет – стабильных, платформенных. А.А. Никонов (1995) определил продолжительность искомого интервала примерно в 400 тыс. лет (поздний и средний неоплейстоцен).

Оставляя пока в стороне вопрос, что это за интервал времени, поясним смысл определенных. Главное состоит в том, что наличие следов подвижек по разлому в некотором недавнем геологическом прошлом является основанием предполагать, что подвижки по нему возможны и в сопоставимом геологическом будущем. Разлом, движения по которому не только происходили, но и будут происходить, следует считать активным.

Действительно, представим, что обнаружены некоторые убедительные признаки того, что движений по разлому, вероятнее всего, не будет. Возникнет ли идея назвать такой разлом назвать активным? Вряд ли. И уж точно, для практики, например, сооружения каких-то ответственных объектов или для сейсмического районирования такой разлом интереса представлять не будет – его уже нет, он «умер».

Понятно, что такое заключение может быть сделано только на основе данных о подвижках, которые уже произошли. Здесь мы не говорим о случае, когда движения по плоскости разлома происходят постоянно и непрерывно, или же понемногу и часто (что может фиксироваться, например, геодезическими методами). Таких разломов, с т.н. криповым типом смещений, чрезвычайно мало. Подавляющее же большинство разломов движутся импульсами, отдельными подвижками, разделенными периодами покоя продолжительностью в сотни и тысячи лет. Причем, имеются в виду перемещения собственно по разломной плоскости, и это не означает, что две точки по разные стороны от разлома, на удалении от него, скажем, в 10-15 км, смещаются относительно друг друга также импульсно, отдельными подвижками. Отсутствие смещений по плоскости разлома при, в общем, непрерывном движении его крыльев на некотором удалении от него служит, очевидно, причиной накопления напряжений и затем, после превышения прочности пород, их разрядке при подвижке. Эта подвижка и проявляется как землетрясение.

Поясним вышесказанное схемой (рис. 2). Предположим, установлено, что по некоторому разлому подвижки происходили с периодичностью раз примерно в 2 тыс. лет, и что последняя подвижка произошла около 10 тыс. лет назад, то есть, движений по разлому не было в течение периода времени, включившего несколько средних периодов повторяемости (рис. 2, вариант А). Видимо, в таком случае, можно предположить, что движений по разлому больше не будет и определить разлом как уже неактивный. А если

при том же интервале повторяемости подвижек самая молодая произошла 500 лет назад, то есть, с ее момента прошло времени меньше одного среднего периода повторяемости (рис. 2, вариант Б) – вполне вероятно, что за ней последуют другие и разлом следует считать активным.

Вернемся теперь к вопросу об интервалах времени, присутствующих в вышеприведенных определениях активного разлома. По сути, этот интервал есть некоторый максимальный период повторяемости подвижек по разломам. Попробуем оценить его продолжительность, опираясь на то, что уже известно о периодах повторяемости.

Принятый в нашей идеальной схеме период повторяемости в 2000 лет вполне реален, однако известны разломы и с гораздо более продолжительными промежутками времени между подвижками. Так, например, для разлома Умехара в Японии Окадой установлен средний период повторяемости подвижек примерно в 14-15 тыс. лет (Kumamoto, 1998). Сделав поправку на возможную неполноту данных, примем в качестве максимального интервал примерно в 20000 лет. Для полной уверенности удвоим или даже утроим это значение. В итоге, можно заключить, что максимальная продолжительность искомого интервала (периода накопления напряжений между подвижками по активному разлому) может составлять первые десятки тысяч лет, охватывая весь голоцен плюс некоторую часть позднего плейстоцена. Такая оценка, очевидно, близка к предложенной В.Г. Трифоновым (1983, 1985) для подвижных областей.

Получение данных о повторяемости подвижек и возрасте последней из них возможно путем заложения канав через разломы и изучения деформированных движениями по разлому отложений. Однако перед проходкой канавы надо предположительно активный разлом сначала ведь выявить? Получается, вроде бы, замкнутый круг, выход из которого все же есть. Дело в том, что период в первые десятки тысяч лет, считая от современности, является временем, в течение которого сформировалось большинство наблюдаемых в настоящее время форм рельефа. Отсюда следует

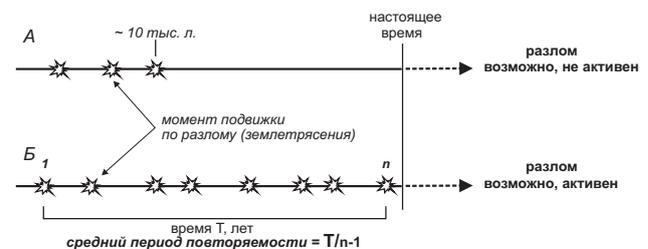


Рис. 2. Принципиальная схема возможных соотношений периода повторяемости подвижек и возраста последней подвижки по активному и неактивному разломам (пояснения в тексте).

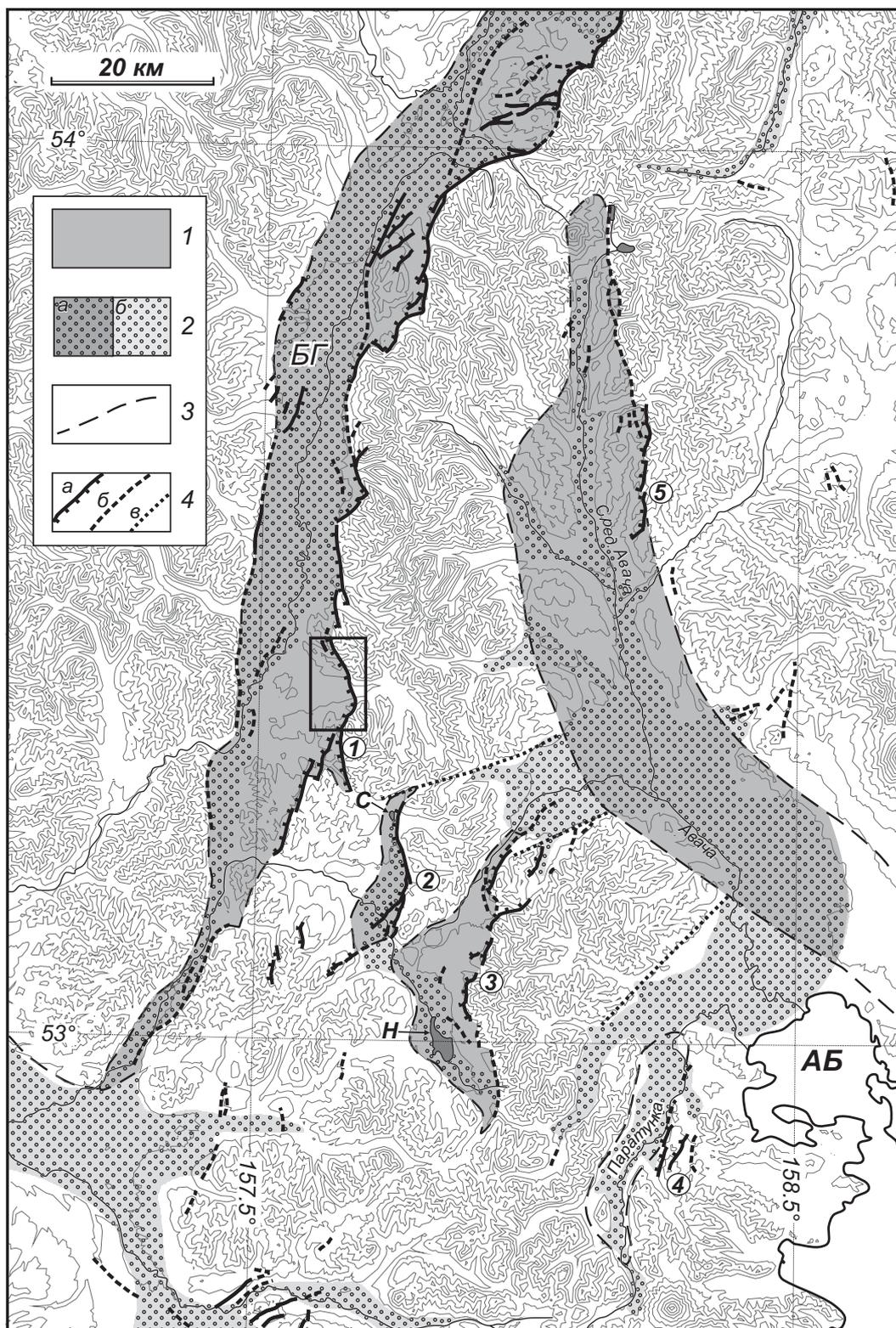


Рис. 3. Основные четвертичные впадины и активные разломы юга Центральной Камчатки (положение рисунка показано на рис. 1).

1 – впадины; 2 – области аккумуляции рыхлых четвертичных отложений: а – во впадинах, б – за их пределами; 3 – неразломные участки ограничений впадин; 4 – активные разломы: а – достоверные (штрихи на относительно опущенном крыле), б – активные предполагаемые, в – предполагаемые разломы ограничений блоков без признаков позднечетвертичной активности. Номера в кружках – разломы, описываемые и упоминаемые в тексте. БГ – Быстринский грабен, С – оз. Сокок, Н – оз. Начикинское, АБ – Авачинская бухта. Изолинии рельефа проведены через 200 м (по данным 3-хсекундной SRTM, <ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2>). Прямоугольник – положение рис. 4.

общее свойство активных разломов, практически значимое для их обнаружения и картирования – они деформируют элементы рельефа молодого (позднеплейстоцен-голоценового) возраста. То есть, увидев, например, на аэрофотоснимке, разломный уступ, нарушающий молодые формы рельефа, можно еще до наземных исследований полагать, что этот разлом является активным.

Изучение активных разломов имеет два аспекта. Во-первых, в таких параметрах движения по отдельным разрывам и их зонам как направление (кинематика) и средняя скорость движений прямо отражается характер (тип, режим) деформирования какого-то объема земной коры. Так, очевидно, что в смещениях по разрывам Восточно-Камчатской зоны реализуются движения блока ЦКД и ее восточного фланга (поднятия Восточных хребтов) относительно друг друга (рис. 1). Оба блока являются основными четвертичными и активными структурами полуострова. Понимание того, как они перемещаются относительно друг друга – это и некоторый ответ на вопрос о том, как деформируется и как может деформироваться в сходных ситуациях объем земной коры островной дуги на фоне продолжающегося пододвигания под него океанической плиты. Во-вторых, как сейсмогенерирующие структуры, активные разломы представляют интерес для решения широкого спектра вопросов оценки сейсмического риска и обеспечения, таким образом, сейсмической безопасности в пределах территории, где они развиты.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНЫХ РАЗЛОМОВ В РАЙОНЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основным методом выделения и картирования активных разломов в районе было дешифрирование аэрофотоснимков. Итоговая схема, в целом, соответствует картине распределения разрывов, полученной ранее В.А. Леглером (1974). Ее характерные особенности – более рассредоточенное, по сравнению с Восточно-Камчатской зоной, распределение отдельных разломов по площади и их преимущественно меридиональное, косое к общей вытянутости четвертичных структур Камчатки, простирающиеся (рис. 1, 3).

При видимом относительно равномерном распределении разломов, очевидна и их некоторая упорядоченность. За исключением разлома в левом (восточном) борту депрессии долины р. Средняя Авача (5 на рис. 3), они образуют ряд северо-западного простираения. На северо-западе ряд начинается разломом, пересекающим долину р. Поперечная (1 на рис. 3) и являющимся элементом разломного ограничения Быстринского гра-

бена (южное продолжение ЦКД). Юго-восточнее следуют разломы юго-восточных ограничений впадин с долиной р. Сокоч и озером Начикинское (2 и 3 на рис. 3). Далее к юго-востоку ряд, возможно, продолжается впадиной с долиной р. Паратунка (4 на рис. 3). Отметим все же, что в настоящее время ясности с наличием разломов в ограничениях долины этой реки нет, то есть, само существование Паратунской впадины не является окончательно доказанным. В данном случае, предполагая ее наличие, мы опираемся на характерную, как и у других упомянутых впадин, плановую морфологию и простирающиеся долины р. Паратунка (рис. 3).

Для всех перечисленных выше разломов характерна однонаправленность вертикальных движений – всегда относительно поднятыми оказываются их восточные крылья. Вероятнее всего, похожи они и по кинематике вертикальных движений. Наблюдаемое кулисное (эшелонированное) положение перечисленных разломов относительно друг друга является структурно и кинематически значимым, так как оно подразумевает, что каждый разлом является элементом единой зоны и что относительно зоны в целом, возможно, происходят горизонтальные движения. Принимая во внимание существующие представления о преимущественно сбросовой кинематике разломов (Леглер, 1974 и др.), можно предположить, что горизонтальные движения вдоль зоны имеют правый знак (то есть, это правосдвиговые движения). К вопросу о кинематике выделенных разломов и зон, ими образуемых, мы вернемся после изложения данных, полученных при изучении одного из разломов зоны в стенке специально пройденной траншеи.

ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ РАЗЛОМОВ

Перед изложением материала отметим некоторые особенности метода, который получил название «трэнчинг» (от англ. trench – траншея, канава, желоб).

Канавы представляют собой искусственное обнажение, вскрывающее разлом там (в той точке на линии разлома), где его изучение может дать результаты. Результатами, при этом, являются данные о том, как часто во времени происходили подвижки по разлому (их повторяемость), каковы были направление движений и их разовая (при одной подвижке) амплитуда, а также возраст последней подвижки. Иногда данные такого рода в целом называют палеосейсмологическими или палеосейсмогеологическими, так как они позволяют судить о примерной магнитуде вызванных подвижками по разлому сильных землетрясений

прошлого и представить, с той или иной степенью уверенности, что можно ожидать от данного разлома в будущем.

В процессе выбора места для канавы приходится опираться, главным образом, на геоморфологические наблюдения. Необходимо понять, с какого рода элементами рельефа в месте прохождения линии разлома мы имеем дело, определить их относительный возраст, понять, какие из них деформированы движениями по разлому, а какие нет. Следует также представить, какого типа отложения могут обнаружиться под земной поверхностью и насколько однозначной может быть корреляция отложений через линию разлома. Наиболее предпочтительными для заложения канав являются места аккумуляции рыхлых позднеплейстоцен-голоценовых отложений, накапливающихся горизонтально, слой за слоем, широким плащом. Для таких отложений характерна первичная выдержанность по составу и мощности на более или менее значительных расстояниях. Примером могут быть речные, озерные или морские отложения, слагающие соответствующие террасы.

В общем, интерпретация нарушенного разломом разреза опирается на известные методы структурного анализа и фаций и мощностей. Особенность применения этих методов при тренчинге (без понимания которой невозможно палеосейсмологическая интерпретация) состоит в учете того, что подвижка по разлому, деформировавшая вскрытые канавой отложения, деформировала, в подавляющем большинстве случаев, также и земную поверхность, будь то на суше или под водой, скажем, в русле протекавшей когда-то реки. А любая деформация земной поверхности, то есть, появление на ней большой или малой неровности, приводит к формированию, пусть локальному, специфических образований (отложений) за счет нивелирования этой неровности поверхностными процессами. Положительная неровность, соответствующая относительно приподнятому крылу разлома, будет каким-то образом, быстро или медленно, разрушаться (эродироваться), а продукты разрушения накапливаться под разломным уступом, в опущенном крыле разлома, нивелируя уступ. Если подвижка по разлому произошла в области продолжающейся аккумуляции, то стоит, очевидно, ожидать некоторого увеличения мощности формирующихся осадочных горизонтов в опущенном крыле и, в результате, уменьшения высоты уступа или же его полного исчезновения (в этом случае уступ окажется погребенным). Можно представить и промежуточную ситуацию, когда поднятое крыло выводится из-под уровня аккумуляции, тогда как в опущенном крыле продолжают накапливаться осадки. Возможны,

очевидно, и другие варианты. В любом случае, процессы эрозии, денудации и аккумуляции, действуя совместно, сформируют за какое-то время после подвижки по разлому новую земную поверхность, которая будет смещена следующей подвижкой по разлому, если таковая произойдет. Выявление земной поверхности прошлого (палеопереходности), существовавшей на момент подвижки, описание ее деформации и определение ее возраста (датирование) и составляют основу палеосейсмологической интерпретации разреза. Это та поверхность, которую Д. Пантости с соавторами (Pantosti et al., 1993) назвали «событийным горизонтом» (event horizon), имеющим, в идеале, нулевой возраст на момент подвижки. Таких поверхностей (событийных горизонтов) в разрезе может быть не одна, и каждая более древняя поверхность окажется деформированной всеми последующими, более молодыми, подвижками по разлому. Отметим, что, в силу особенностей конкретного разреза, то есть, типа отложений, степени их литологической и иной контрастности и т.п., можно и не распознать какой-то из событийных горизонтов, и тогда возникает то, что определяется как «пропуск события» (подвижки). Или же, наоборот, какие то элементы и особенности разреза ошибочно интерпретируются как возникшие при подвижке, и тогда появляется «лишнее событие». Вот почему, при возможности, необходима проходка через разлом более одной канавы.

Очевидно, что результаты изучения разлома в одной канаве, то есть, в точке на его линии, не могут полно характеризовать разлом в целом, даже если мы не пропустили какое-то событие или не нашли подвижки, которой не было. Если направление движений и среднюю скорость перемещений за относительно продолжительный период времени можно принять представительными для разлома на всем его протяжении и даже судить по эти параметрам о кинематике всей разломной зоны (направлении движений по ней), то амплитуда одноактного перемещения — это характеристика разлома в определенной его точке. Для того, чтобы выявить, как изменялась величина смещения при какой-то подвижке по разлому по его простиранию, от точки к точке, необходимо пройти целый ряд канав. Примерно также обстоит дело с повторяемостью подвижек. Определенная для конкретного разлома, она не может быть отнесена к структурно единой системе (зоне) разломов — оценка повторяемости сильных землетрясений, генерируемых зоной в целом, требует получения соответствующих значений для каждого из разломов зоны.

Особенностью молодых отложений на Камчатке является присутствие в них горизонтов вулканических пеплов (тефры). Вулканические

пеплы, переслаиваясь с горизонтами почв и эоловых супесей, образуют так называемый почвенно-пирокластический чехол (ППЧ), который облекает всю территорию Камчатки, отсутствуя лишь на крутых склонах и в горах выше границы растительности. Выпадение и отложение горизонта тефры происходит в течение очень недолгого времени после извержения; такой горизонт плащом покрывает огромную территорию и образует четкий маркер, который можно проследить на огромных территориях. Практически каждый горизонт тефры обладает уникальным набором свойств, позволяющим его идентифицировать в различных разрезах. На этом основана тефрохронология - геохронологический метод, использующий горизонты тефры для создания особой хронологической канвы или шкалы, которая может использоваться для датирования природных форм рельефа, различных отложений, археологических объектов и т.п. При изучении вскрытого канавой разреза наличие

горизонтов тефры, каждый из которых обладает своим собственным обликом, существенно облегчает корреляцию между крыльями разлома и, соответственно, палеосейсмологическую интерпретацию разреза.

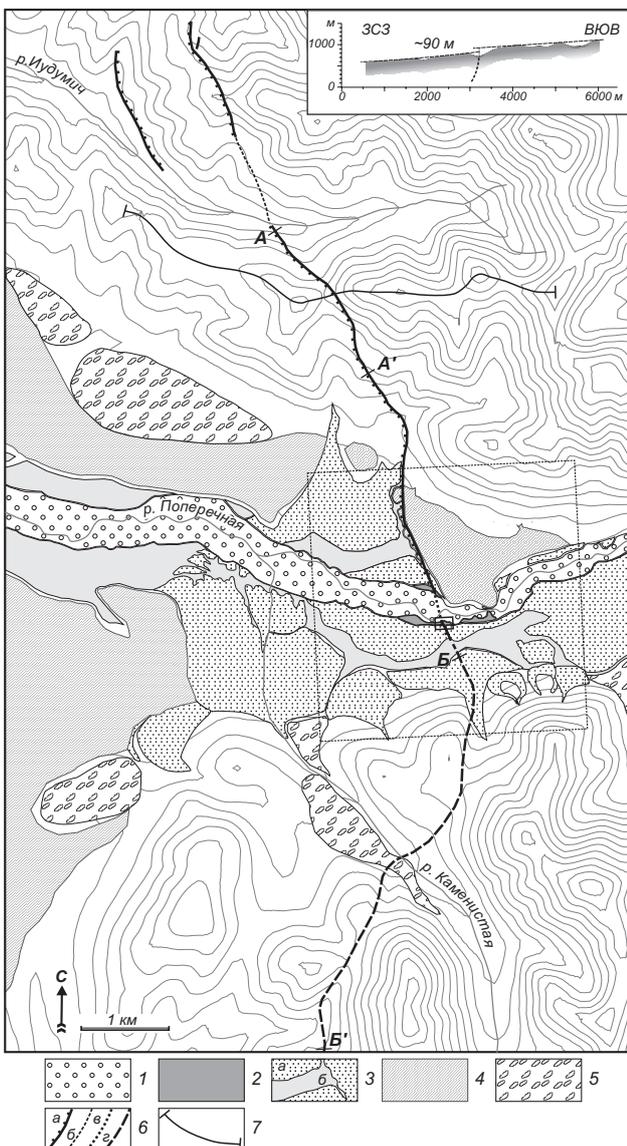
В качестве примера того, как изучаются разломы, ниже мы опишем выраженность в рельефе, характер проявленности в молодых рыхлых отложениях и палеосейсмологические параметры разлома, пересекающего долину р. Поперечной, левого притока р. Быстрая (1 на рис. 3). Ранее некоторые данные, полученные при изучении разреза, вскрытого этой канавой, были коротко и в схематичном виде описаны А.В. Тарабанько (2007). Ниже мы постараемся изложить логику палеосейсмологической интерпретации разреза и рассмотреть основания для того или иного вывода и заключения.

РАЗЛОМ РЕКИ ПОПЕРЕЧНОЙ

Данный разлом протягивается примерно от правого (северного) водораздела р. Иудумич на севере и почти до подножья южного (правого) склона долины р. Поперечная на юге (рис. 4). Разлом выражен в рельефе в виде уступа примерно метровой высоты. За пределами долины р. Поперечная этот молодой невысокий уступ проходит в подножии более высокого обращенного на запад разломного уступа (высотой до 90-100 м по поверхности водоразделов, врезка на рис. 4). Разломом деформированы надпойменная терраса р. Поперечной и поверхность флювиогляциальных и пролювиальных отложений, в которые она врезана (рис. 4, 5).

Рис. 4. Геоморфологическая схема участка долины р. Поперечная.

1 – пойменные и низкие надпойменные террасы р. Поперечная ($Q_4^2 - Q_4^4$); 2 – высокая надпойменная терраса р. Поперечная (Q_4^1); 3 – пролювиальные шлейфы и пологие ложбины-промоины (Q_4^1) на поверхности флювиогляциальных отложений (вторая фаза позднеплейстоценового оледенения?); 4 – флювиогляциальная равнина (первая фаза позднеплейстоценового оледенения?); 5 – морены позднеплейстоценового оледенения; 6 – отрезки активного разлома: а – с последней подвижкой в раннем голоцене (штрихи на относительно опущенном крыле); б – предположительно, не вышедшие на поверхность в раннем голоцене; в – под поверхностью пойменных и низких надпойменных террас; г – без раннеголоценовой подвижки; 7 – линия гипсометрического профиля, показанного на врезке сверху справа; А-А' и Б-Б' – отрезки разлома, показанные на рис. 10; квадрат примерно в центре рисунка – границы рис. 5, маленький прямоугольник внутри – границы рис. 6. Изолинии рельефа проведены через 50 м (по данным 3-хсекундной SRTM). При интерпретации форм рельефа использовались данные О.А. Брайцевой и И.В. Мелекесцева (1974).



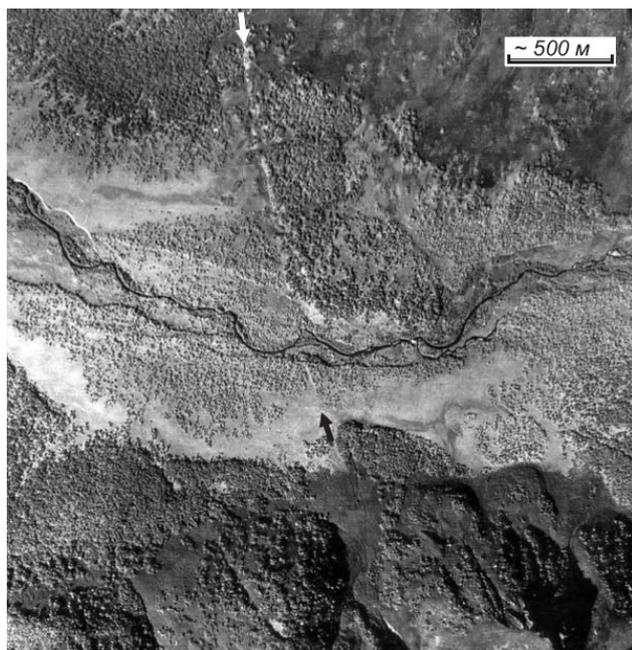


Рис. 5. Аэрофотоснимок участка долины р. Поперечная, пересекаемой разломом. Встречные стрелки направлены вдоль раннеголоценового разломного уступа.

Канавы пройдены поперек разлома там, где он смещает поверхность надпойменной террасы р. Поперечная (рис. 6, рис. 7 на 2-й стр. обложки). Судя по составу вскрытых отложений (см. ниже), терраса является эрозионной, с цоколем из водно-ледниковых отложений. Координаты канавы – 157.67488° в.д., 53.38805° с.ш. В месте канавы высота разломного уступа составляет примерно 1 м (рис. 8А на 2-й стр. обложки). Такую же высоту он имеет за пределами террасы, в поверхности флювогляциальных и пролювиальных отложений. Ширина уступа в плане составляет 6-7 м. Восточное окончание канавы почти достигает бровки уступа, западное же располагается опущенном крыле. Стоит отметить, что, таким образом (в основном, по причине трудоемкости процесса ручной копки), не удалось соблюсти одно из правил прохождения канавы – она должна пересекать не только весь разломный уступ, но и обоими окончаниями заходить в пределы и поднятого, и опущенного крыльев, чтобы вскрыть там ненарушенный, в первичном залегании, разрез. В данном конкретном случае это затруднение преодолевается вполне разумным предположением, что горизонты ППЧ и поверхность водно-ледниковых отложений в поднятом крыле восточнее канавы параллельны поверхности террасы, которая описывается гипсометрическим профилем, более протяженным, чем канавы (рис. 8А, 8Б на 2-й стр. обложки).

Стратиграфическое описание разреза

Отложения во вскрытом разрезе представ-

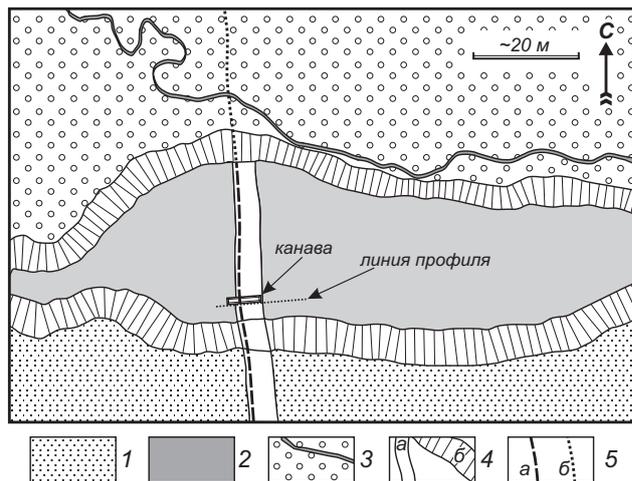


Рис. 6. Расположение канавы относительно тыловых швов террас и разломного уступа.

1 – поверхность водно-ледниковой террасы; 2 – поверхность цокольной речной террасы раннеголоценового возраста; 3 – комплекс речных террас средне-позднеголоценового возраста; серая линия – главное русло р. Поперечная; 4 – уступы: а – разновозрастных террас (тыловые швы); б – разлома; 5 – проекция выхода линии разлома на современную поверхность: а – в пределах разломного уступа; б – участок с недеформированной подвижкой по разлому поверхностью.

лены тремя основными горизонтами (снизу вверх):

1) несортированный средне-хорошо окатанный галечник общего серого цвета (горизонт 1 на рис. 8Б);

2) перекрывающие его пойменные серые и желто-серые пески и супеси с редкими линзами гравия и мелкой гальки (горизонт 2 на рис. 8Б);

3) почвенно-пирокластический чехол (ППЧ, горизонт 3 на рис. 8Б).

В почвенно-пирокластическом чехле выделяется ряд прослоев тефры, имеющих мощность от 0.5-1 см до 8-10 см и крупность от тонкого до грубозернистого вулканического песка. Идентификация прослоев тефры проводилась с учетом известных ареалов голоценовых пеплопадов (Брайцева и др., 1998; Braitseva et al., 1997; Ponomareva et al., 2004), а также путем сопоставления с детально изученным и датированным торфяником, расположенным всего в ~12 км к западу (Певзнер и др., 2006). Наиболее древний пепловый горизонт, распознаваемый в стенках канавы, – это тефра с индексом КО, связанная с крупнейшим голоценовым извержением, приведшем к возникновению кальдеры Курильского озера на Южной Камчатке около 7600 ¹⁴С лет назад (Zaretskaia et al., 2001).

Одинаковая последовательность горизонтов 1-3 наблюдается и в западной, и в восточной частях канавы. Она, очевидно, нарушена под разломным уступом в поверхности террасы. Под

его нижней частью, примерно между вертикальными отметками 2.8 и 3.7 м (рис. 8Б), от склона в поверхности галечника отходит тонкая линза тех же пойменных песков и супесей, что ниже залегают непосредственно на галечнике, но в обратной последовательности – супеси снизу, грубые пески сверху (линза обозначена на рис. 8Б как горизонт 2а). Эта линза пойменных отложений перекрыта линзой мелкого галечника и гравия в буром песчано-суглинистым заполнителе (1а на рис. 8Б). Еще выше по разрезу, только в пределах разломного уступа, выделяются линзы материала, аналогичного слагающему ППЧ, но в различной степени насыщенного мелкой плавающей галькой (горизонт 3в). Неровная поверхность кровли верхней линзы горизонта 3в облекается слоем тефры КО. Особенностью разреза под разломным уступом является также залегание тонких отложений почвенно-пирокластического горизонта 3 и линз гумусированного материала (палеопочвы) непосредственно на галечнике горизонта 1 (между вертикальными отметками 4 и 5 м).

В опущенном крыле, почвенно-пирокластические отложения горизонта 3, перекрытые пойменными отложениями подгоризонта 2а (ниже горизонтальной отметки 1 м), разделяются тонкими гумусированными прослоями палеопочв на два подгоризонта (обозначены на рис. 8Б как 3а и 3б). Граница раздела подгоризонтов, оставаясь примерно параллельной поверхности галечника, прослеживается к западу примерно до вертикальных отметок 1.2-1.3 м. Примерно на вертикали 2.7 м она деформирована в пережатую синклираль. В целом получается, что разрез сдвоен – горизонт 2 с подгоризонтом 3а перекрываются подгоризонтом 3б с подгоризонтом 2а, причем во втором случае последовательность отложений обратная, перевернутая (внизу – почвенно-пирокластические отложения, выше – пойменные).

Палеосейсмологическая интерпретация (рис. 8В)

Ключевыми для интерпретации особенностями разреза являются изгибы (наклоны) поверхности галечника и низов перекрывающих отложений, сдвигание разреза пойменных и части почвенно-пирокластических отложений под нижней частью склона разломного уступа, появление содержащих гальку прослоев и линз среди тонкого почвенно-пирокластического материала, залегание почвенно-пирокластических отложений непосредственно на галечнике примерно под средней частью разломного уступа.

Поверхность галечника в интервале между вертикальной отметкой 5.8 м и восточным окончанием канавы неровная, но, в общем, ее проекцию на стенку канавы можно аппроксими-

ровать почти горизонтальной линией. Между вертикалями 3.8 и 5.8 м поверхность галечника немного выпукла кверху и, в целом, наклонена на запад под средним углом порядка 20°. Примерно на вертикали 3.7 м она круто, практически вертикально, погружается на 0.5 м. Между вертикальными отметками 3.7 и 1.8 м поверхность галечника вогнута книзу, а ближе к западному окончанию канавы становится опять практически горизонтальной.

Пойменные отложения горизонта 2 и их отдельные слои залегают, повторяя конфигурацию поверхности галечника. Между вертикальными отметками 3 и 3.7 м они наклонены на запад (в сторону опущенного крыла) под углом примерно в 30°, а на отметке 3.6-3.7 м, рядом с вертикальной ступенью в поверхности галечника, их наклон возрастает до 60-65° (рис. 8Б). При этом мощности пойменных отложений, в целом, и отдельных прослоев супесей и серых песков остаются примерно постоянными, не увеличиваясь в западном направлении. В опущенном крыле, согласно с пойменными отложениями и поверхностью галечника, и также без изменения мощности, залегают отложения подгоризонта 3а (нижняя часть почвенно-пирокластического чехла). Выше лежащие отложения (начиная с подгоризонта 2а в опущенном крыле) залегают горизонтально или слегка наклонно, и протягиваются без резкого изменения гипсометрического положения из поднятого крыла в опущенное, постепенно выполаживаясь и увеличиваясь в мощности.

Относительно пологий склон, образуемый поверхностью галечника в интервале 3-5.8 м, в принципе, мог образоваться как эрозионная или аккумулятивная форма, но, в этом случае, только до накопления пойменных песков и супесей и нижней части ППЧ. То, что мощности горизонта 2 и подгоризонта 3а остаются примерно постоянными (не увеличиваются в опущенном крыле) свидетельствует о том, что накопились они на первоначально примерно горизонтальной поверхности галечника и что их общий с поверхностью галечника наклон представляет результат изгибной деформации типа флексурной. Очевидно, что изгиб произошел после формирования подгоризонта 3а.

Почти вертикальный полуметровый уступ на фоне склона в поверхности галечника не мог образоваться в силу каких-то причин чисто седиментационного характера или в результате экзогенных процессов, что заставляет предполагать его тектоническую природу и считать результатом вертикального смещения по разлому. Очевидно, что смещение претерпел и горизонт 2 – в опущенном крыле он, не меняя мощности, примыкает к «галечной ступени» и там заканчивается. Продолжение горизонта в поднятом

крыле можно искать, только допустив его разломную деформацию. Подгоризонт 3а залегает на пойменных отложениях в опущенном крыле согласно и, поэтому, должен был деформироваться одновременно с ними. Следует заключить, что подвижка по разлому, как и изгиб слоев, произошла также после накопления подгоризонта 3а.

Таким образом, особенности залегания отложений позволяют выделить деформации двух типов – изгибную (флексурную) и разрывную. Вопрос о том, одновозрастны эти деформации или же они появились одна за другой после накопления подгоризонта 3а, есть предмет дальнейшей интерпретации разреза.

Для разреза под нижней частью разломного уступа в поверхности террасы характерно наличие относительно коротких линз разнородного материала – подгоризонтов 1а, 2а, 3б и 3в. Их особенностями являются либо обратная нормальная последовательность отложений (последовательность 3б-2а, отдельные слои в линзе 2а), либо смещение материала разных горизонтов. Так, в основании подгоризонта 2а находятся несколько крупных, 10–15 см в поперечнике, галек, как бы плавающих в песчаном матриксе и переместившихся, очевидно, из горизонта 1. Основная масса подгоризонта 1а представлена материалом ППЧ и многочисленной мелкой галькой горизонта 1. Вышележащий подгоризонт 3в отличается лишь соотношением материала ППЧ и гальки – первый преобладает. В целом, эти подгоризонты образуют особое тело, приуроченное к слону в поверхности галечника и не несущее следов каких-либо деформаций. Очевидно, что подгоризонты образовались уже в аэральных условиях, после накопления нижней части ППЧ (подгоризонта 3а) и после того, как все перекрываемые ими слои были изогнуты и смещены по разлому. Все это дает основания интерпретировать их вместе как т.н. коллювиальный клин (colluvial wedge), то есть, как комплекс отложений, сформировавшихся за счет гравитационного разрушения склона, в нашем случае – склона разломного уступа.

В коллювиальном клине можно выделить две части – нижнюю, включающую подгоризонты с обратной последовательностью, и верхнюю, в которой смешан материал из разных горизонтов разреза (соответственно, $СW_1$ и $СW_2$ на рис. 8В). Формирование обратной последовательности в залегании можно представить таким образом, что при подвижке по разлому (смещении земной поверхности) часть пойменных отложений и существующего почвенно-пирокластического чехла (то есть, в объеме 2+3а) была сорвана с галечного основания, подброшена вверх и перевернута. Переместившись примерно на метр вниз по склону, она «приземлилась» под склоном на

поверхности ППЧ. Возможно, также, что процесс перемещения и перевертывания фрагмента перекрывающих гальку отложений происходил как разворачивание свернутого «ковра», один край которого (нижний по склону) оставался примерно на месте. Месту отрыва соответствует, очевидно, та часть галечного склона, которая сейчас свободна от пойменных отложений и где непосредственно на галечнике находятся короткие линзы палеопочвенного материала (примерно между вертикальными отметками 4 и 5 м). Дерновый покров на поверхности ППЧ, существовавший на момент смещения, мог способствовать тому, что сорванный фрагмент перекрывающих галечник отложений не разрушился.

После образования коллювиального клина происходило, видимо, уже более или менее растянутое во времени разрушение склона. Короткий шлейф мелкой гальки, смешанной с материалом ППЧ, составил слой, который в нашей стратиграфической последовательности выделен как подгоризонт 1а, а перекрывающие его линзы подгоризонта 3в сформировались при оползании и сгуживании под склоном части почвенно-пирокластического чехла. При этом материалом ППЧ был перекрыт и участок галечного горизонта, с которого в момент подвижки по разлому были сорваны перекрывающие отложения.

В общем, две составляющие коллювиального клина соответствуют тому, что обычно определяется как, соответственно, нижний грубый (сформировавшийся сразу после смещения) и верхний тонкий (результат позднего относительно продолжительного «спокойного» разрушения склона) коллювий.

Возвращаясь к вопросу о соотношении во времени изгибной и разрывной деформаций, отметим, что наличие в разрезе, в соответствии с нашей интерпретацией, только одного коллювиального клина есть свидетельство их одновременности. Говоря об одновременности, мы имеем в виду, что эти деформации не были разделены во времени сотнями или тысячами лет, то есть, промежуток времени, в течение которого могли бы появиться распознаваемые литологические, стратиграфические и структурные образования. Однако, вполне возможно, что промежуток времени продолжительностью в первые годы или даже десятки лет выявить бы не удалось, но это уже вопрос разрешающей способности метода.

Таким образом, с точки зрения структурообразования, изгибы слоев вблизи плоскости разрыва следует описывать, в нашем случае, моделью складок волочения вдоль разрыва (drag folds) и отказаться от модели последовательного формирования сначала флексуры над разрывом,

а затем распространения разрыва через нее вверх (faut-penetration folds (Schlische, 1995 и др.)). В этом случае, полное вертикальное смещение включает в себя примерно 0.5 метра перемещения собственно по плоскости разлома и то смещение, которое реализовалось в изгибе слоев. Наиболее просто и точно общее вертикальное смещение можно измерить по изменению гипсометрического положения кровли смещенных отложений при переходе через разлом, причем, на таких удалениях от него, где залегание смещенных слоев первичное, слегка наклонное вниз по течению реки (примерно 2°). Искомое значение составляет примерно 1.2 м (по поверхности галечника – амплитуда A_2 на рис. 8А). Стоит заметить, что высота разломного уступа в современной земной поверхности несколько меньше – около 1 м (A_1 на рис. 8А). Это легко понять, т.к. после появления уступа в земной поверхности прошлого аккумуляция отложений тефры и ППЧ у его подошвы проходила интенсивнее, чем у бровки, и с течением времени уступ нивелировался.

Определение возраста деформаций

Подвижка по разлому деформировала (флексурно-разрывная деформация) земную палео-поверхность и подстилающие ее отложения. В опущенном крыле положение земной поверхности прошлого достаточно очевидно – ей соответствует граница раздела между подгоризонтами 3а и 3б и кровля подгоризонта 3а восточнее (рис. 8В). В поднятом крыле выделение палеоповерхности сложнее. Ближе к восточному окончанию канавы, она должна проходить внутри ППЧ, на некоторой высоте над пойменными отложениями, примерно равной мощности подгоризонта 3а. Ближе к склону разломного уступа и на нем эта поверхность уже не существует, поскольку там она была уничтожена при оползании вниз по склону материала ППЧ, составившего верхнюю тонкую часть коллювиального клина (подгоризонт 3в – $СW_2$). То есть, соединяет сохранившиеся фрагменты палеоповерхности уже эрозионная поверхность (на рис. 8В показано ее примерное положение). Возраст этой поверхности в настоящее время (в палеосейсмологической терминологии – событийного горизонта) есть возраст подвижки.

Определение возраста того или иного события в геологии состоит в нахождении временного интервала, внутри которого оно произошло. Чем более узким окажется полученный временной интервал, тем точнее будет и определение возраста. В нашем случае следует, во-первых, понять, какие отложения моложе подвижки, а какие древнее (это вопрос интерпретации разреза), во-вторых, найти возможность узнать возраст и тех, и других.

Если попытаться определить возраст слагающего коллювиальный клин материала, перекрывшего событийный горизонт, то полученное значение, конечно, даст нижний (древнее возраста подвижки) возрастной предел, так как этот материал на момент подвижки, очевидно, уже существовал. Выход состоит в нахождении и датировании отложений, перекрывших коллювиальный клин. Такими отложениями является прослой тефры КО, который залегает сразу на коллювиальных отложениях, повторяя все неровности их поверхности. Как уже было сказано, извержение, в результате которого образовался слой тефры КО, привело к образованию кальдеры Курильского озера на Южной Камчатке и произошло около 7600 ^{14}C лет назад или 8400 калиброванных лет назад (калибровка проведена с помощью программы Calib 5.0 (Stuiver et al., 2005)). Примем это значение как верхнее ограничение временного интервала, в пределах которого произошла подвижка.

К определению нижнего предела временного интервала можно подойти следующим образом. Согласно нашей интерпретации, фрагмент галечного слоя, свободный от пойменных образований, был перекрыт материалом ППЧ при его перемещении вниз по склону. В этом месте, прямо на галечном слое, были обнаружены отдельные короткие линзы палеопочвенного материала. Поскольку на момент подвижки часть ППЧ, содержащая линзы палеопочв, уже существовала, то их возраст и мог бы быть искомым значением нижнего возрастного ограничения подвижки.

Датирование фрагментов древесного угля, отобранных в одной из таких линз (рис. 8Б), дало радиоуглеродный возраст 8900 ± 50 лет, что соответствует калиброванному возрасту ~10 000 лет. Датирование проведено в лаборатории Beta Analytic, калибровка согласно М. Стюверу с соавторами (Stuiver et al., 2005). Таким образом, подвижка по разлому произошла в интервале 8.4 и 10 тыс. л.н.

Конечно, интервал примерно в полторы тысячи лет может показаться слишком продолжительным. Сузить его можно было бы, получив несколько определений возраста самой нижней части почвенно-пирокластических отложений (подгоризонта 3а) и выбрав из них минимальное. Также можно постараться найти поддающийся датированию материал между тефрой КО и кровлей коллювиального клина. Однако, все зависит от целей и задач – от того, насколько принципиальным и критичным является как можно более точное определение возраста подвижки. Полученный нами возрастной интервал позволяет оценить возраст последней подвижки и представить, как часто, в среднем, могут

происходить подвижки по данному разлому на данном его отрезке. Вполне может быть, что предшествующую подвижку от той, что датирована, отделяли три или пять тыс. лет, а, может быть, и двенадцать – вряд ли стоит ожидать, что движения по разлому происходят строго через равные промежутки времени.

Опираясь на полученный возраст, можно лишь утверждать, что среднее значение периода повторяемости подвижек по разлому реки Поперечной гораздо больше сотен лет и достигает первых тысяч, возможно, десяти тыс. лет. Весьма вероятно, что до будущей подвижки и, соответственно, сильного землетрясения, осталось совсем немного (в геологическом смысле) времени.

Направление смещения по разлому и его полная величина (амплитуда)

В разрезе плоскости разлома соответствует практически вертикальная часть галечного уступа, к которой примыкают пойменные отложения (рис. 8). Крутая, но не вертикальная, часть галечного уступа, находящаяся гипсометрически выше и перекрытая нижней частью коллювиального клина (подгоризонты 2а и 1а), немного отклонена от плоскости разлома к востоку в результате разрушения (иногда говорят, деградации) разломного уступа.

Является ли плоскость разлома действительно вертикальной? Ведь мы видим только ее самое верхнее окончание? И если она наклонена, то в какую сторону, и на какой глубине происходит изменение угла ее падения? Часто оказывается, что, основываясь только на положении плоскости разлома в стенке канавы, ответить на такие вопросы невозможно. Ответить же необходимо, так как, например, изменение направления падения плоскости по отношению к поднятому и опущенному крыльям на противоположное переводит разлом из взброса в сброс, и наоборот, а это означает и смену представлений о напряженном состоянии, геодинамике района и т.д.

В нашем распоряжении есть два типа данных, которые можно использовать для определения истинного положения плоскости разлома, причем, на разных глубинах от земной поверхности.

Данные георадарного зондирования

Работа георадара основана на свойстве радиоволн отражаться от границ раздела сред с различной диэлектрической проницаемостью. Наиболее важными параметрами, характеризующими возможности применения метода георадиолокации в различных средах, являются удельное затухание и скорость распространения электромагнитных волн в среде, которые определяются ее электрическими свойствами (Владов, Старовойтов, 2005). Такими границами раздела

могут быть, например, контакты между сухими и влагонасыщенными грунтами, между породами различного литологического состава, между породой и материалом искусственного сооружения, между мерзлыми и тальми грунтами, коренными и рыхлыми породами и т.д.

Глубина зондирования и разрешающая способность могут быть разными, в зависимости от частоты посылаемого в среду электромагнитного сигнала. При уменьшении частоты глубина зондирования растет, а разрешение уменьшается, и наоборот. Полученные радарограммы обрабатываются, привязываются к измеренным топографическим профилям и после этого интерпретируются.

Вдоль южной стенки канавы (рис. 8) была проведена георадарная съемка через разлом (использовался георадар «ОКО» производства НПО «Логис»). При работе с антеннами АБ 700 и АБ 250 использовался Датчик Перемещения, отсчеты записывались в Блок Обработки через каждые 5 и 10 см. При работе с АБД «Тритон» съемка делалась пошагово с интервалом 1м и в непрерывном режиме. Антенна АБ 700 является экранированным блоком с центральной частотой 700 МГц, обладает разрешающей способностью 5-10 см и глубинностью 3-5 м. Антенна АБ 250 также является экранированным блоком, но с центральной частотой 250 МГц, что обеспечивает проникновение сигнала на глубину порядка 8 м при разрешающей способности 10-30 см. Антенный блок АБД «Тритон» не экранирован. При центральной частоте 50 МГц, глубина зондирования достигает 20-25 м, а разрешающая способность составляет 0.5-1 м.

Полученные профили представлены на рис. 9. На обоих малоглубинных профилях (рис. 9А, Б) наиболее хорошо распознается поверхность раздела между двумя наиболее контрастными пачками отложений – грубыми галечными и тонкими почвенно-пирокластическими. Что касается разлома, то, как и в канаве, на радарограммах хорошо виден уступ в поверхности галечного горизонта, а поведение плоскости разлома на глубине не отображается.

Наиболее интересен для нас профиль с максимальной глубиной зондирования (рис. 9В). На нем хорошо видна уходящая вниз «колонна» коротких интенсивно отраженных сигналов, которую можно интерпретировать как зону связанных с разломом возмущений среды (дробления? перетирания?). Получается, что до глубины, по крайней мере, 20-25 м, плоскость разлома погружается практически вертикально.

Топографический рельеф и плановая морфология линии разлома

Примерно определить примерный средний угол падения плоскости разлома до некоторой

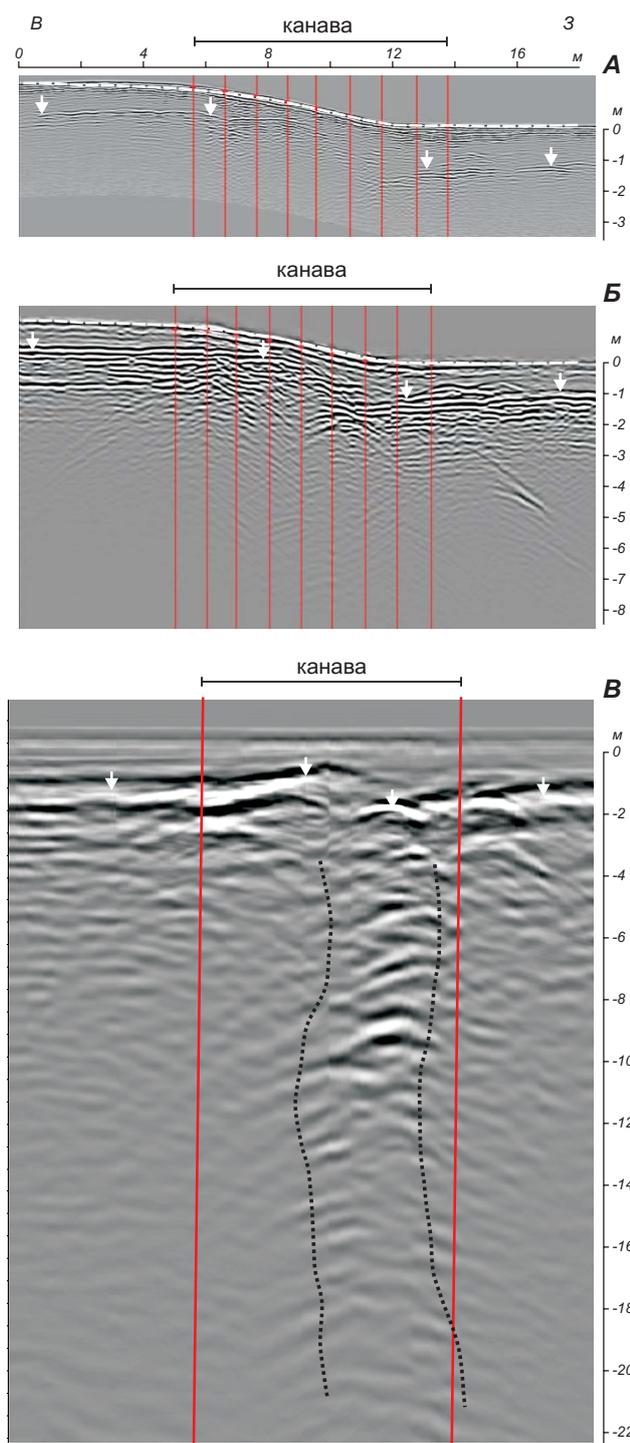


Рис. 9. Георадарные профили, пройденные вдоль южной стенки канавы вкrest разломного уступа. *A* – с антенной АБ 700, *B* – с антенной АБ 250, *B'* – с антеннным блоком АБД «Тритон». Соотношение вертикального и горизонтального масштабов – 1:1. Вертикальные сплошные линии на *A* и *B* проведены через 1 м, на *C* – ограничивают канаву. Белая пунктирная линия – часть гипсометрического профиля, показанного на рис. 8А. Вертикальные стрелки показывают положение поверхности валунно-галечных отложений горизонта I (рис. 8Б). Точечные линии на рис. 8В – примерные ограничения зоны, в которой находится плоскость разлома (интерпретация). Радарограммы на рис. 8А и рис. 8Б привязаны к гипсометрическому профилю, радарограмма на рис. 8С показана без привязки.

от точности проведения линии разлома, так и точности топографического материала. Все же, основываясь на полученных параметрах, можно утверждать, что, во-первых, плоскость разлома не вертикальна и, во-вторых, падает на запад.

Таким образом, можно заключить, что плоскость исследуемого разлома до глубины в первые десятки метров погружается практически вертикально, а затем становится более полой. По соотношению же направления ее падения с относительно поднятым и опущенным крыльями, разлом должен классифицироваться как сброс.

Имея данные о величине угла падения плоскости разлома, можно оценить и полное (общее) смещение по его плоскости, произошедшее примерно 9 тыс. лет назад. Примем, что разломная плоскость погружается в среднем под углом в 60° . При вертикальной компоненте смещения в 1.2 м (соответствует катету *bc* на врезке внизу справа на рис. 10), полное смещение по ней должно было достичь величины (округляя до десятых в сторону большего значения) примерно 1.4 м (*ac* на врезке внизу справа на рис. 10). Отметим, что значения возраста подвижки и амплитуды смещения позволяют получить и примерное среднее значение скорости смещений по разлому в голоцене – оно составляет примерно 0.15 мм в год. Очевидно, что это значение должно рассматриваться как максимальное значение, поскольку мы не знаем, сколько времени пройдет до следующей подвижки.

глубины можно, сопоставив, насколько выгибается в плане в ту или иную сторону линия выхода разлома на земную поверхность при пересечении им положительных и отрицательных форм рельефа. В нашем случае, мы использовали отрезки разлома *A-A'* и *B-B'* пересекающие водоразделы сразу к северу и югу от р. Поперечная (рис. 10). Полученные углы падения в 40° , 50° и 70° , конечно, следует рассматривать как очень примерные. Очевидно, что используемые для вычислений значения (катеты *ab* и *bc* на рис. 10 и врезке внизу справа) сильно зависят как

Магнитуда землетрясения, вызванного подвижкой по разлому

Для оценки магнитуды землетрясений прошлого используют эмпирические зависимости, полученные при сопоставлении параметров современных сейсморазрывов и вызванных ими землетрясений. Таких зависимостей предложено много (Стром, Никонов, 1997), но как стандартные в практике оценки сейсмической опасности чаще используются зависимости, выявленные Д. Уэллсом и К. Копперсмитом (Wells, Coppersmith,

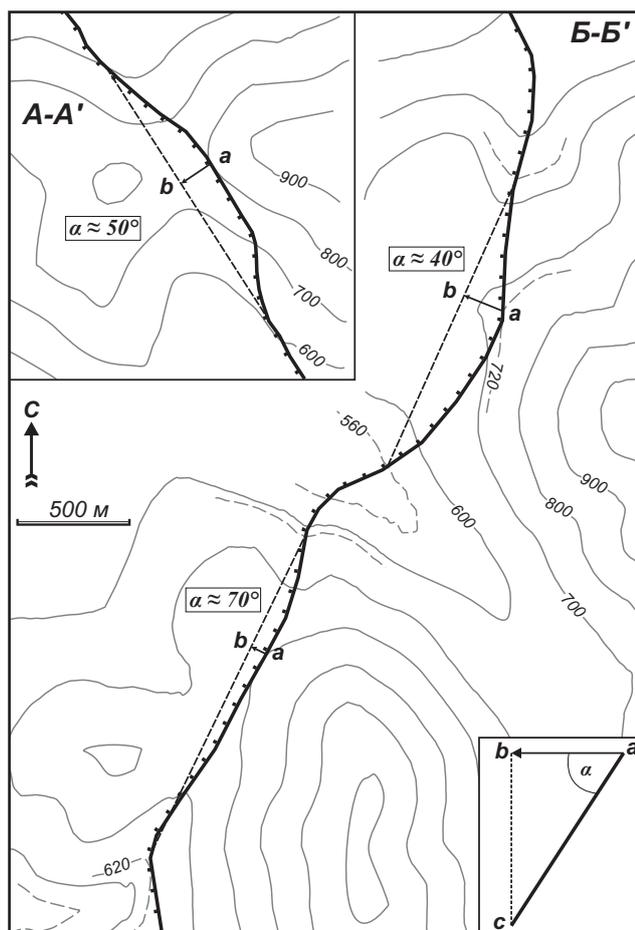


Рис. 10. Изменение плановой геометрии линии разлома при пересечении неровностей топографического рельефа.

Положение отрезков разлома *A-A'* и *B-B'* показано на рис. 4. *a* – угол падения плоскости разлома, вектор *ab* – направление падения, *ac* – плоскость разлома (на врезке внизу справа). Изолинии рельефа – по данным трехсекундной SRTM.

1994). Как и во всех других зависимостях, магнитуда землетрясения *M* (моментная) в них связана или с величиной одноактной общей подвижки *D* (с разделением по кинематике и без него), или с длиной появившегося на земной поверхности разрыва *L* (длина части разлома, обновившейся при подвижке). В первом случае зависимость имеет вид $M = a + b \cdot \log(D)$, во втором – $M = a + b \cdot \log(L)$, в которых *a* и *b* представляют коэффициенты уравнений регрессий (их значения приведены в упомянутой выше работе).

Понятно, что при изучении подвижек и землетрясений прошлого наибольшую сложность представляет как раз получение значений *D* и *L*. Например, неясно, насколько представительна для разлома величина смещения, измеренная в одной его точке – близка ли она к максимальному, минимальному или среднему его значению. Более предпочтительным, поэтому, является использование длины сейсморазрыва, который

появился на земной поверхности тысячи лет назад, хотя и ее определить часто сложно, а иногда и невозможно, в особенности, когда подвижка происходит лишь на каком-то отрезке длинного разлома. Разломный уступ, потерявший со временем четкость выраженности в рельефе, может остаться нераспознанным на фоне более высокого разломного уступа, сформировавшегося при некотором количестве предыдущих подвижек.

В нашем случае, разлом прослеживается в виде непрерывного уступа высотой 1-1.5 м от точки примерно в 200-250 м южнее канавы до тальвега р. Иудумич, на севере, то есть, на протяжении примерно 5.5 км. На склоне правого (северного) борта реки уступ на снимках не виден, но сразу за водоразделом обнаруживается похожий уступ протяженностью примерно 1.5 км (рис. 4). Считая его продолжением разломного уступа реки Поперечной, получаем в сумме 7 км, а с учетом «не вышедшего на поверхность» отрезка – примерно 8 км. Продолжается ли разлом к югу от р. Поперечная, также после пропуска на поверхности, сказать без дополнительных исследований точно нельзя. Короткие отрезки невысоких разломных уступов видны на аэрофотоснимках в районе водораздела к р. Каменистая (левый приток р. Поперечная), а также южнее р. Каменистая, в районе верховий правых притоков р. Ключевка. Если все они представляют результат подвижки по разлому, произошедшей примерно 9 тысяч лет назад, то общая длина сейсморазрыва (surface rupture length) того времени составила примерно 15-16 км.

Что касается величины общего одноразового смещения, то, за неимением данных о том, как изменялась величина подвижки вдоль разлома, примем, что полученное значение 1.4 м близко к среднему (average displacement).

Оказывается, что при использовании любого из приведенных значений длины поверхностного сейсморазрыва, различающихся практически в два раза, как с учетом его сбросовой кинематики, так и без, значения моментной магнитуды инициированного подвижкой землетрясения не выходят из интервала 6-6.5. Более высокие, порядка 6.8-7, значения магнитуды получаются при использовании в оценке величины среднего смещения. Понятно, что при имеющейся неопределенности используемых параметров, вряд ли стоит оперировать точными (более дробными, чем половина значения) величинами магнитуды. Видимо, значение магнитуды порядка 6.5 можно считать, в настоящее время, наиболее обоснованной оценкой.

Подвижки по другим разломам района исследований

По методике, описанной выше, был изучен также разлом в восточном борту впадины с до-

линой р. Сред. Авача (5 на рис. 3). Обработка полученных данных еще не закончена, но их предварительная интерпретация позволяет заключить, что первая из зафиксированных в разрезе подвижек по разлому произошла, как и по разлому р. Поперечная, где-то в начале голоцена, а последняя, возможно, — порядка 2 тыс. лет назад. Уступ в земной поверхности, образовавшийся в результате последней подвижки, хорошо сохранился, так что его протяженность определяется по аэрофотоснимкам вполне уверенно — она составляет примерно 8-9 км. Основываясь на приведенных цифрах можно заключить, что по частоте подвижек и силе связанных с ними землетрясений этот разлом, в общем, аналогичен разлому реки Поперечной.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В основе излагаемых ниже выводов лежит предположение, что параметры изученного разлома реки Поперечной являются представительными для всех субмеридиональных разломов описываемого района.

1. Позднечетвертичная структура и геодинамика

Прежде всего, обратимся к образуемой этими разломами (1-4, рис. 3) зоне северо-западного простираения. Как мы отметили ранее, кулисное расположение разломов в зоне предполагает наличие в движениях вдоль нее горизонтальной компоненты. Вопрос о том, какая это компонента по направлению — правая или левая — решается на основе данных о кинематике разломов зоны и способе подставления разломов друг другом, то есть, в какую сторону смещается в плане очередной разлом при движении вдоль зоны — вправо или влево (рис. 11). В нашем случае, тип подставления — левый, а разломы зоны — сбросы (структуры растяжения), что свидетельствует о правом знаке сдвиговой компоненты движений вдоль зоны в целом (а на рис. 11).

Пожалуй, это единственный «структурный» вывод, который можно отнести к разряду фактов. Вопросы положения сдвиговой зоны в молодой структуре Камчатки и ее геодинамического значения могут решаться только путем логических построений, которые, по своей сути, не являются однозначными.

Можно, конечно, отметить, что правосдвиговая зона северо-западного простираения в плане совпадает с Петропавловск-Малкинской (Начикинской) «зоной поперечных дислокаций» и, вероятно, ее является молодым (средне-позднечетвертичным) выражением. Однако существование Петропавловск-Малкинской зоны, насколько нам известно, до сих пор не имеет обоснованных объяснений с позиций геодина-

мики. Более интересным кажется представить, как северо-западная правосдвиговая зона соотносится с другими, развивающимися одновременно с ней, структурами Камчатки. В этом отношении важным представляется следующее. Во-первых, зона смыкается с Быстринским грабеном (южным окончанием Центральной Камчатской депрессии) и ее крайний северо-западный элемент — разлом реки Поперечной — является и элементом восточного ограничения грабена. Во-вторых, нет каких-либо структурных признаков продолжения зоны на северо-запад, за грабен, в пределы поднятия Срединного хребта. Отсюда следует, что структурно и кинематически северо-западная разломная зона связана именно с Центрально-Камчатской депрессией, точнее — с ее восточным ограничением, которым является Восточно-Камчатская зона активных разломов. Если это так, то можно говорить о существовании единой региональной зоны активных разломов, отделяющей блок Восточной Камчатки от западной и южной частей островной дуги (рис. 12).

Предположение о существовании такого блока, перемещающегося до некоторой степени независимо от остальной Камчатки, ранее уже высказывалось (Kozhurin et al., 2006). Из общих соображений, направление относительного движения блока было принято примерно юго-западным. Теперь, располагая полученными данными, можно заключить, что там, где зона разломов простирается в север-северо-восточном направлении, ограничивая с востока Центральную Камчатскую депрессию, происходят преимущественно сбросовые движения, иногда

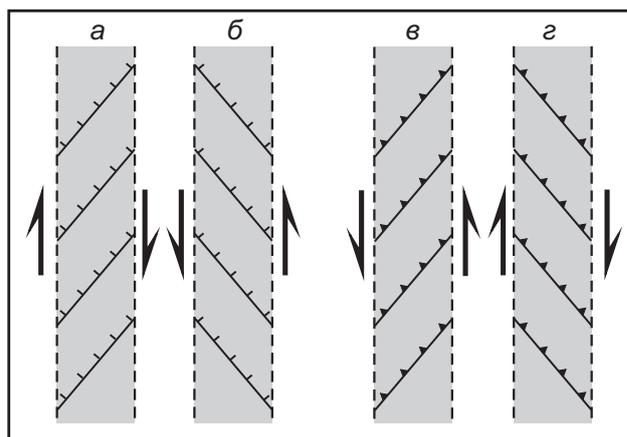


Рис. 11. Интерпретация знака горизонтальной компоненты движений вдоль кулисного ряда по кинематике эшелонированных структур и типу их подставления.

а, б — кулисные ряды сбросов; в, г — взбросов; а, в — левосторонние подставления; б, г — правосторонние подставления. Большие черные стрелки показывают знак сдвиговой компоненты движения: а, г — правый; б, в — левый. Пунктирные линии — ограничения зон разломов.



Рис. 12. Блок Восточной Камчатки и его предполагаемое относительное движение в средне-позднечетвертичное время.

1 – зона разломов западного и юго-восточного ограниченный блока (а) и его возможная площадь (б); 2 – участки зоны разломов: а – с преимущественно сбросовой кинематикой, б – сдвиговой кинематикой; в – предполагаемое направление движения блока относительно Западной и Южной Камчатки; 3 – островная дуга (а) и океаническая плита (б). Знаки вопросов поставлены там, где положение границ блока неясно.

примерно поперечного Камчатскому сегменту островной дуги растяжения, является удивительным. Ни к югу от Курило-Камчатской островной дуги (Японская дуга), ни к западу (Сахалин), ни к северу (Северная Камчатка и Корякской нагорье) структуры растяжения, простирающиеся вдоль окраины Азии, неизвестны.

2. Сейсмотектоника

Выводы о сейсмотектонике района в настоящее время могут быть только предварительными. Сейчас же важен сам факт появления данных, дающих основание считать, что движения по активным разломам описываемого района происходят импульсами, то есть, генерируя сильные коровые землетрясения. Судя по тому, что длины всех этих разломов примерно одинаковы (рис. 3) и имея в виду оценки, сделанные в отношении разлома реки Поперечной, можно думать, что магнитуда землетрясений, связанных с подвижками по любому из этих разломов, может достигать значения 6-7.

О продолжительности временных интервалов между подвижками по разломам района судить пока трудно. Все же, нельзя не заметить, что данные по разлому реки Поперечной и (предварительные) по разлому к востоку от р. Сред. Авача согласованно указывают на то, что происходят они, видимо, достаточно редко. Однако не стоит забывать, что полученные оценки относятся каждый раз к конкретному разлому и что если разломы объединены в зону, то период повторяемости подвижек в ней всегда будет меньше, чем для одного из ее элементов. Поэтому, вероятность таких событий, несомненно, должна учитываться при оценке сейсмической опасности в районе, помимо той, что исходит от сильных землетрясений в зоне поддвига Тихоокеанской плиты под Камчатскую островную дугу.

Наконец, отметим, что необходимо детальное и целенаправленное изучение данной территории, где сконцентрирована основная часть населения Камчатки, на предмет выявления всех молодых разломных деформаций, а не только основных. Это позволит полнее представить распределение разломов по площади, а их изучение – более обоснованно судить о вкладе

с небольшой правосторонней компонентой, в то время как часть зоны юго-восточного простирается является, в основном, правосдвиговой. Такая кинематика движений вдоль северо-западной и юго-западной границ блока Восточной Камчатки возможна при его смещении относительно западной Камчатки к юго-востоку, в сторону океана (рис. 12)¹.

В чем причины вероятного обособления блока островной дуги, и что заставляет его смещаться в сторону океана – судить сейчас сложно. Возможно, ответ кроется в особенностях взаимодействия Камчатского сегмента островной дуги с пододвигающейся океанической плитой. Отметим, что просто само наличие сбросовых движений, свидетельствующих об условиях

¹ Поскольку речь идет об относительных движениях, то можно представить и другой вариант – фиксированное положение выделенного блока и смещение к западу остальной части островной дуги. Этот вариант предполагает наличие каких-то структур сжатия, в которых такое смещение реализуется, будь то на западе Камчатки или в краевой части Охотского моря. Пока такие структуры неизвестны.

активной разломной тектоники в сейсмическую опасность.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 06-05-64960 и 06-05-64025). Радиоуглеродная дата была получена благодаря гранту Национального научного фонда США EAR-0125787. Авторы благодарны А.А. Сахарову, Е.А. Кравчуновской и А.В. Тарабанько за помощь в проведении полевых работ.

Список литературы

- Брайцева О.А., Базанова Л.И., Мелекесцев И.В., Сулерджицкий Л.Д.* Крупнейшие голоценовые извержения вулкана Авачинский на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 1998. № 1. С. 3-24.
- Брайцева О.А., Мелекесцев И.В.* Аккумулятивные равнины Центральной Камчатской депрессии // Камчатка, Курильские и Командорские острова. История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока. М.: Наука, 1974. С. 234-249.
- Владов М.Л., Старовойтов А.В.* Введение в георадиолокацию. Уч. Пособие. М.: МГУ, 2005. 153 с.
- Геология СССР. Т.31. Камчатка, Курильские и Командорские острова. Геологическое описание. М.: Недра, 1964. 733 с.
- Кожурин А.И., Востриков Г.А.* Приокеанические подвижные пояса // Неотектоника и современная геодинамика подвижных поясов. М.: Наука, 1988. С. 67-151.
- Леглер В.А.* Разломная тектоника четвертичных грабенов Восточного хребта Камчатки // Структурный анализ дислокаций. Хабаровск: Изд-во ДВНЦ АН СССР. 1974. С. 234-248.
- Леглер В.А.* Деформация погружающейся литосферной плиты и продольные сдвиги Курило-Камчатской островной дуги // Тектоника литосферных плит (динамика зоны поддвига). М.: Институт океанологии АН СССР, 1976. С. 103-147.
- Леглер В.А.* Новейшие разломы и горизонтальные тектонические движения Восточной Камчатки: Автореф. дис. канд. геол.-минерал. наук. Хабаровск, 1978. 24 с.
- Леглер В.А., Флоренский И.В.* Структурное положение надвигов Валагинского хребта Камчатки // ДАН. 1976. Т. 226. № 1. С. 168-171.
- Никонов А.А.* Активные разломы: определение и проблемы выделения // Геоэкология. 1995. № 4. С. 16-27.
- Певзнер М.М., Пономарева В.В., Сулерджицкий Л.Д.* Голоценовые почвенно-пирокластические чехлы Центральной Камчатской депрессии: возраст, строение, особенности осадконакопления // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 24-38.
- Стром А.Л., Никонов А.А.* Соотношения между параметрами сейсмогенных разрывов и магнитудой землетрясений // Физика Земли. 1997. № 12. С. 55-67.
- Тарабанько А.В.* Применение георадиолокации при изучении разрывных нарушений, связанных с коровыми землетрясениями в районе реки Поперечная (Южная Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. № 1. Вып. 9. С. 154-158.
- Тихонов В.И.* Надвиги на Восточной Камчатке // Геотектоника. 1968. № 3. С. 88-101.
- Трифонов В.Г.* Позднечетвертичный тектогенез. М.: Наука, 1983. 224 с.
- Трифонов В.Г.* Особенности развития активных разломов // Геотектоника. 1985. № 2. С.16-26.
- Флоренский И.В., Трифонов В.Г.* Новейшая тектоника и вулканизм Восточной вулканической зоны Камчатки // Геотектоника. 1985. № 4. С. 78-87.
- Эрлих Э.Н.* Современная структура и четвертичный вулканизм западной части Тихоокеанского кольца. Новосибирск: Наука, 1973. 243 с.
- Эрлих Э.Н., Мелекесцев И.В., Шанцер А.Е.* Новейшая тектоника // Камчатка, Курильские и Командорские острова. История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока. М.: Наука, 1974. С. 345-368.
- Allen C.R.* Geological criteria for evaluating seismicity // Bull. Geol. Soc. Amer. 1975. V. 86. № 8. P. 1041-1057.
- Braitseva O.A., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D. et al.* Holocene key-marker tephra layers in Kamchatka, Russia // Quaternary Res. 1997. 47. P. 125-139.
- Kozhurin A.* Kamchatka island arc: two modes of extension in the overriding plate // Geophysical Research Abstracts. 2007. V. 9, 06060, SRef-ID: 1607-7962/ ra/EGU2007-A-06060© European Geosciences Union. 2007.
- Kozhurin A.I., Acocella V., Kyle P.R. et al.* Trenching active faults in Kamchatka, Russia: paleoseismological and tectonic implications // Tectonophysics. 2006. V. 417. P. 285-304.
- Kumamoto T.* Long-term conditional seismic hazard of Quaternary active faults in Japan // J. Seismol. Soc. Japan. 1998. V. 50. P. 53-71.
- Pantosti D., Schwartz D.P., Valensise G.* Paleoseismology along the 1980 surface rupture of the Irpinia fault: Implications for earthquake recurrence in the southern Apennines, Italy // J. Geophys. Res. 1993. V 98. P. 6561-6577.
- Ponomareva V.V., Kyle P.R., Melekestsev I.V. et al.* The 7600 (¹⁴C) year BP Kurile Lake caldera-forming eruption, Kamchatka, Russia: stratigraphy and

- field relationships // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2004. V. 136. P. 199-222.
- Stuiver, M., Reimer, P.J., Reimer, R.W.* CALIB 5.0 14C age calibration program, www.calib.org. 2005.
- Schlische R.W.* Geometry and origin of fault-related folds in extensional settings // *AAPG Bulletin*. 1995. V. 79. P. 1661-1678.
- Wells D.L., Coppersmith K.J.* New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1994. V. 84. № 4. P. 974-1002.
- Zaretskaia N.E., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D., Dirksen O.V.* Radiocarbon dating of the Kurile Lake caldera eruption (South Kamchatka, Russia) // *Geochronometria*. 2001. V. 20. P. 95-102.

ACTIVE FAULTING IN THE SOUTH OF CENTRAL KAMCHATKA

A.I. Kozhurin¹, V.V. Ponomareva², T.K. Pinegina²

¹*Geological Institute, Moscow, 119017*

²*Institute of Volcanology and Seismology, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006*

The paper describes general pattern of active faulting in the area of the southern termination of the Central Kamchatka Depression, where the Central Kamchatka structures give place to those of South Kamchatka. The authors discuss what fault can be termed «active» and describe the methods used in active fault studies including trenching. A case study of one of active faults considered representative demonstrates application of these methods. Ground penetrating radar profiling was used as a complementary method.

Paleoseismological interpretation of the faulted young sedimentary sequence, and radiocarbon and tephrochronological dating of both deformed and intact layers suggest that the most recent event on the fault occurred between 8.4 and 10 Ka years ago. The total dip-slip offset reached ~1.4 m, and the surface rupture may have extended to 8 to 15-16 km. Estimation of MW of the event-related earthquake yields 6.5. We suggest that all the active faults in the area are most likely moving by impulses and are thus seismogenerating structures.

Main active faults in the region are arranged en echelon in an array of NW-SE strike. Normal kinematics of the faults together with stepping sense indicate overall right-lateral movement along the array, likely accompanied with some array-normal extension. It is suggested that the array may be the southern ocean-directed extension of the East Kamchatka fault zone. If so, there may exist a structurally isolated block of eastern Central Kamchatka, which moves oceanward relative to West and South Kamchatka.

The need for further studies of active faulting in this relatively densely populated area of Kamchatka focused at the documenting of all the seismogenerating structures and assessment of fault-related seismic hazard is emphasized.