

**ПРОДОЛЬНЫЕ СДВИГИ В ОСТРОВНОЙ ДУГЕ ПРИ НОРМАЛЬНОМ ПОДДВИГЕ
ОКЕАНИЧЕСКОЙ ПЛИТЫ: ПРИМЕР КАМЧАТКИ*****А.И. Кожурин^{1,2}, Т.К. Пинегина¹, В.В. Пономарева¹***¹ФГБУН Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, б-р Пийпа 9, г. Петропавловск-Камчатский, 683023;
e-mail: anivko@yandex.ru²ФГБУН Геологический институт РАН, Пыжевский пер. 7, стр. 1, г. Москва, 109017; e-mail: gin@ginras.ru

Поступила в редакцию 26. апреля 2023 г.

Продолжающаяся со среднего плейстоцена деформация земной коры Камчатки определяется двумя процессами: надсубдукционным растяжением, вызываемым смещением ее восточной части в сторону океана вслед за погруженной частью океанической плиты, и, сразу к северу от зоны субдукции, поперечным сокращением вследствие сближения с ней Командорского блока Алеутской дуги. Области разнонаправленных движений и деформаций Камчатки разделяет левосторонняя горизонтальная флексура, выраженная изгибами в плане поднятия Восточных хребтов, глубоководного желоба и, как следствие, оси Восточного вулканического пояса. Кинематически флексура заменяет ожидаемый между двумя по-разному деформирующимися частями Камчатки поперечный левосдвиговый разлом. Выявленные правосторонние смещения вдоль продольных разломов в северной части поднятия Восточных хребтов Камчатки представляют результат вращения против часовой стрелки смыкающего крыла флексуры. Тефрохронологическим методом датированы высокая аллювиальная терраса р. Камчатки, смещенные формы рельефа, а также нарушенные разломами слои почвенно-пирокластического чехла. Из полученных определений возраста следует, что повторяемость подвижек по разломам смыкающего крыла флексуры составляет примерно раз в 3–5 тыс. лет, средняя за вторую половину голоцена скорость сдвиговых смещений – порядка 1 мм в год. Сопоставление значений скорости и максимальной величины накопленного сдвигового смещения долины р. Камчатки предполагает, что горизонтальные движения начались не позже второй половины среднего плейстоцена. Это означает также, что долина р. Камчатки в то время уже существовала, а ее антецедентная часть сформировалась при врезе в растущее поднятие Восточных хребтов. Величина общего сдвигового смещения по всем разломам смыкающего крыла флексуры со второй половины среднего плейстоцена может быть оценена величиной примерно в 1 км. В целом, полученные результаты указывают на возможность сдвиговых движений вдоль продольных разломов в островной дуге при нормальном к ней направлении поддвига океанической плиты.

Ключевые слова: сдвиги в островной дуге, горизонтальная флексура, тефра, треннинг, р. Камчатка, Центральная Камчатская депрессия, п-ов Камчатка.

ВВЕДЕНИЕ

Океаническая плита может сближаться с островной дугой под разными к ней углами, в предельном случае – под прямым. Сближение не под прямым углом включает тангенциальную компоненту. Нормальная компонента сближения приводит к появлению в дуге структур поперечного сокращения или растяжения (в зависимости от того, смещается ли погруженная часть океанической плиты к дуге или от нее, в сторону океана [28]), тангенциальная – к появлению горизонтальных движений вдоль дуги [18].

Камчатский сегмент Курило-Камчатской островной дуги (Камчатка) представляет пример дуги, с которой океаническая плита сближается практически ортогонально (рис. 1).

Основными структурами Камчатки являются Центральная Камчатская депрессия и ее фланги – поднятия Срединного хребта и Восточных хребтов. Структурно, Центральная Камчатская депрессия (ЦКД) представляет собой ограниченный разломами только с восточной стороны грабен. Ранее В.А. Ермаков и др. [4] определили грабен как рифт. Обрамляю-

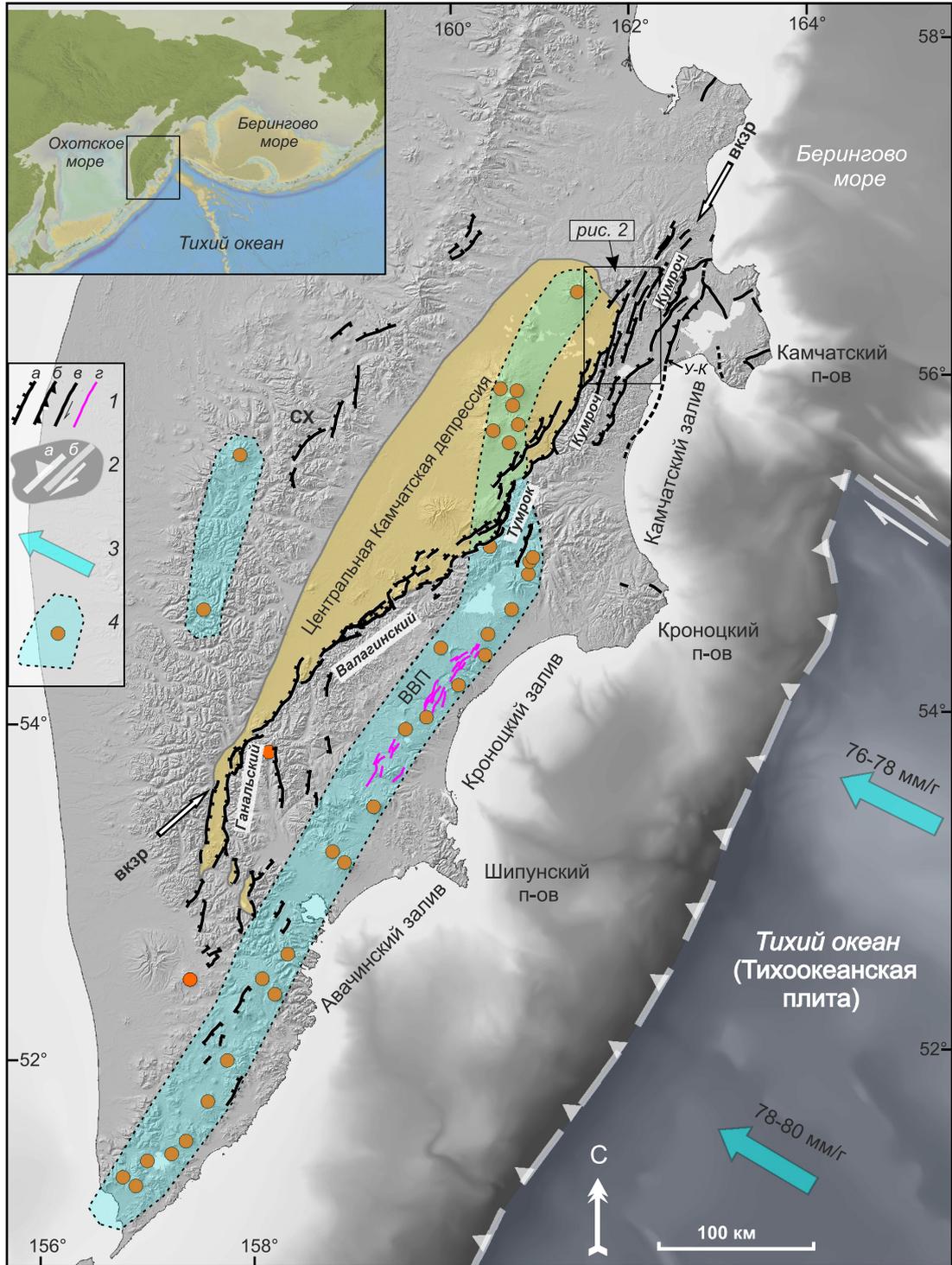


Рис. 1. Основные среднеплейстоцен-голоценовые элементы структуры Камчатского сегмента Курило-Камчатской островной дуги (положение рисунка – на врезке сверху слева).

1 – активные разломы (*а* – сбросы, *б* – взбросы, *в* – со сдвиговой компонентой, *г* – в пределах вулканического пояса (вулканотектонические), пунктирная линия – предполагаемое положение разломов на суше и в акватории; 2 – ось глубоководного желоба (*а*) и Алеутский трансформный правосдвиговый разлом (*б*); 3 – векторы сближения Тихоокеанской плиты с Евразийской (по [16, 17], с использованием Plate Motion Calculator, <https://www.unavco.org/software/geodetic-utilities>); 4 – центры извержений позднеплейстоценового и позднеплейстоцен-голоценового возраста (оранжевые кружки) и примерные контуры зоны вулканизма (голубая полупрозрачная заливка). СХ – Срединный хребет, ВКЗР – Восточно-Камчатская зона разломов, ВВП – Восточный вулканический пояс, У-К – Усть-Камчатский разлом (см. текст). Рельеф суши показан по данным ASTER GDEM (продукт METI и NASA), рельеф поверхности дна Тихого океана и Берингова моря – по [11].

щее ЦКД с востока поднятие Восточных хребтов состоит из четырех частных поднятий – хребтов Ганальского, Валагинского, Тумрока и Кумроча. Структурная пара «ЦКД–Восточные хребты», судя по данным О.А. Брайцевой и др. [2], возникла в результате деформации земной коры Камчатки примерно со среднего неоплейстоцена. Наклон поверхностей хребтов в сторону океана предполагает, что разломы восточного ограничения ЦКД – листрические, то есть с глубиной угол их падения уменьшается. Листрическая сбросовая тектоника свидетельствует о поперечном горизонтальном растяжении земной коры Камчатки, проще всего объясняемым смещением ее восточной части относительно западной Камчатки на восток, вслед за отступающими в сторону океана погруженной частью Тихоокеанской плиты и желобом [22].

Восточнее поднятия Восточных хребтов протягивается позднеплиоцен-четвертичный [9], в современном хроностратиграфическом расчленении позднего кайнозоя – четвертичный [20] Восточный вулканический пояс (Восточный вулканический фронт), а еще восточнее – самая ближняя к Тихому океану зона восточных полуостровов Камчатки – Шипунского, Кроноцкого и Камчатского. Шипунский и Кроноцкий полуострова нависают над зоной субдукции, Камчатский представляет крайний к северо-западу элемент Командорского блока Алеутской дуги. Транспрессионные сдвиги и взбросо-надвиги на полуострове Камчатском [6] подтверждают сокращение его земной коры примерно в поперечном направлении, согласно с движением Командорского блока (рис. 1). Повторными GPS измерениями выявлено движение Командорского блока Алеутской островной дуги на СЗ относительно Северо-Американской или Евразийской плит со скоростью примерно в 55 мм в год [7, 24].

Шипунский и Кроноцкий полуострова занимают одну и ту же позицию относительно зоны субдукции, но степень и характер их деформированности разные. На Шипунском полуострове нет ни одного активного разлома, видимого на космических или аэрофотоснимках. Его деформацию можно представить в виде свода или же наклоненного в том или ином направлении блока. Кроноцкий полуостров, напротив, дифференцирован: он разделен на меньшую северную и большую южную части системой разломов субширотного, поперечного Камчатке, простирания. Эту систему разломов ранее выделили В.А. Леглер и Л.М. Парфенов под названием Северный фас [8]. Разломы были отнесены ими к новейшим, а их кинематика определена как левосдвиговая.

Вопрос о том, происходят ли горизонтальные движения вдоль структур Камчатки, относится, пре-

жде всего, к Восточно-Камчатской зоне разломов (ВКЗР, название по [21]), разделяющей ЦКД и поднятие Восточных хребтов. Ранее зона называлась Передовым фасом [5]. В.А. Леглер предположил, что такие движения по разломам зоны есть и что они левосдвиговые, как и на Кроноцком полуострове [8]. Свидетельства активных левосторонних движений В.А. Леглер видел в отклонении влево активных русел рек, пересекающих зону. При этом сам автор наблюдений отмечал их неопределенность – эффект левого сдвига русел может появляться и при их обходе смещающихся вправо конусов выноса рек и т.н. «сухих дельт» [2]. Позднее А.И. Кожурин определил кинематику ВКЗР как сбросовую, с меньшей, до равной вертикальной, правосдвиговой компонентой. Признаки активных правосдвиговых смещений были обнаружены им только в подножье самой южной части хр. Кумроч [21], но вывод о присутствии в движениях по разломам правосдвиговой компоненты был отнесен ко всей ВКЗР.

Наконец, относительно недавно Серверой Хейллен [14] вновь было высказано предположение о наличии левосдвиговой компоненты движений вдоль Камчатки. Основаниями для предположения явились наблюдаемые на космических снимках отклонения влево русел некоторых водотоков на линиях активных разломов в подножье хр. Кумроч, подобные тем, что наблюдал В.А. Леглер в подножье Ганальского хребта [8].

В статье показано, что горизонтальная составляющая в движениях вдоль продольных разломов Камчатки существует, что она правосдвиговая и что она имеет ограниченное, не в масштабе всей островной дуги, распространение. Предложено объяснение появления правосдвиговой компоненты движений по продольным разломам Камчатки вне рамок модели косоугольного поддвига. Объектами исследований были активные тектонические нарушения в хр. Кумроч – северном сегменте поднятия Восточных хребтов, восточного фланга Центральной Камчатской депрессии.

МЕТОДЫ

Положенные в основу статьи данные получены дешифрированием разных по масштабу и качеству космических и аэрофотоснимков, цифровых моделей рельефа и местности, полевыми наблюдениями, изучением и анализом вскрытых разрезов. Наземные исследования включали построение топографических профилей поперек разломных уступов с применением ручного нивелира и рейки. Распознавание маркирующих прослоев тефры в разрезах основывалось на данных и опыте предыдущих исследований [25, 26].

АКТИВНЫЕ РАЗЛОМЫ ПОДНЯТИЯ ХР. КУМРОЧ – СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ПОДНЯТИЯ ВОСТОЧНЫХ ХРЕБТОВ

Хр. Кумроч, как средне-позднечетвертичное поднятие, неоднороден. Его южная часть, к югу примерно от среднего течения р. Радуга, представляет восточный фланг ЦКД, северная протягивается за пределами ЦКД, уже напротив полуострова Камчатского (рис. 1, 2).

Поднятие хр. Кумроч отличается от других хребтов восточного фланга ЦКД.

1) В районе рек Камчатки и Радуги хребет имеет минимальные для Восточных хребтов высоты поверхности – 600–700 м над уровнем моря, и те же примерно 600–700 м над поверхностью ЦКД. Для сравнения – высота поверхности самого южного из восточных хребтов, Ганальского, достигает 1500–1700 м над уровнем моря и примерно 1000 м над поверхностью ЦКД. Снижение высоты Восточных хребтов с юга на север, в общем, плавное. Севернее р. Радуга, напротив полуострова Камчатский, хребет Кумроч довольно резко воздымается до примерно в 1200 м над уровнем моря. Река Камчатка пересекает хр. Кумроч в его наиболее низкой части.

2) Южная часть хребта Кумроч состоит из двух параллельных хребтов-поднятий, разделяемых депрессией, структурно аналогичной ЦКД, – асимметричной, ограниченной сбросовым разломом только с восточной стороны (рис. 2). В депрессии находятся нижняя часть долины р. Радуга, долина р. Асхава, оз. Ажабачье, а также долины рек Пятая и Бушуйка (последние – за южной границей рис. 2). В тексте ниже она называется депрессией оз. Ажабачье. Поверхности обоих составляющих хребет поднятий наклонены в сторону океана.

3) Только в хр. Кумроч есть несколько разломов, протягивающихся восточнее ВКЗР, то есть внутри поднятия хребта. Ниже они называются «внутренними». На север они протягиваются почти до Берингова моря, минуя северное ограничение ЦКД (рис. 1, 2).

Пересечения «внутренних» разломов с долиной р. Камчатки

Долину р. Камчатки пересекают, во-первых, два основных сбросовых разлома – восточных ограничений ЦКД и депрессии оз. Ажабачье (рис. 2). Плоскости разломов падают на запад. В западных, относительно опущенных крыльях этих разломов развиты молодые формы рельефа и области современной аккумуляции. В поднятых восточных крыльях рельеф эрозионно-тектонический. Это ограничивает возможности корреляции геоморфологических уровней через

линии разломов. Во-вторых, ее antecedentную часть пересекают два «внутренних» разлома (рис. 2, 3). В крыльях этих разломов находится одна и та же речная долина с ее высокими крутыми бортами.

Прослеживание подножий коренных бортов долины р. Камчатки в хр. Кумроч обнаруживает их резкие изгибы на линиях «внутренних» разломов (рис. 3). Невозможность появления таких изгибов в ходе обычной эволюции долины и их совпадение с линиями разломов заставляет предполагать, что изгибы представляют результат сдвиговых смещений бортов долины. Знак сдвига – правый.

Наиболее велико и заметно смещение коренного левого борта р. Камчатки по восточному из двух «внутренних» разломов – примерно на 300 м (измерено средствами GoogleEarth). Накопленное правостороннее смещение левого борта реки по разлому западнее составляет 40–50 м. Выраженность смещений правого борта долины реки не столь отчетлива. Возможно, это связано с разной степенью геоморфологического «отклика» разных бортов долины на горизонтальное смещение.

Смещения подчеркиваются также распространением в долине реки Камчатки самой высокой аккумулятивной террасы (с тыловым швом примерно в 9.5–10 м над уровнем низкой воды), примыкающей к ее коренным бортам. Нет случаев, когда она развита по обеим сторонам реки в одном и том же крыле разлома (рис. 3). Распространение террасы можно описать как «шахматное» – в левом борту реки терраса находится в западных крыльях разломов, и ее нет в восточных крыльях в том же борту и, наоборот, – в правом борту реки террас нет в западных крыльях, но они есть в восточных. Широкими частями террасы примыкают к линиям разломов, постепенно сужаясь вниз (в правом борту) или вверх (в левом борту) по течению от них.

Для определения возраста террасы, на ее поверхности, примерно в 1 км к западу от самого восточного из трех разломов, показанных на рис. 3, был заложен шурф. Голоценовые пеплы в районе подробно изучены [25], что позволило достаточно точно распознать их во вскрытом разрезе по стратиграфической последовательности, гранулометрическому составу, градиционной слоистости и цвету.

Большая верхняя часть разреза почвенно-пирокластического чехла (ППЧ), вскрытого шурфом, относится к голоцену (рис. 4). Его нижняя часть представлена пачкой грубых пемзовых пеплов вулкана Шивелуч, отложившихся в раннем голоцене 8–11 тыс. л.н. [25] (рис. 4, схематический разрез справа). Ниже вскрыта позднеплейстоценовая часть разреза. Она изучена и датирована хуже [25], поэтому точно судить о

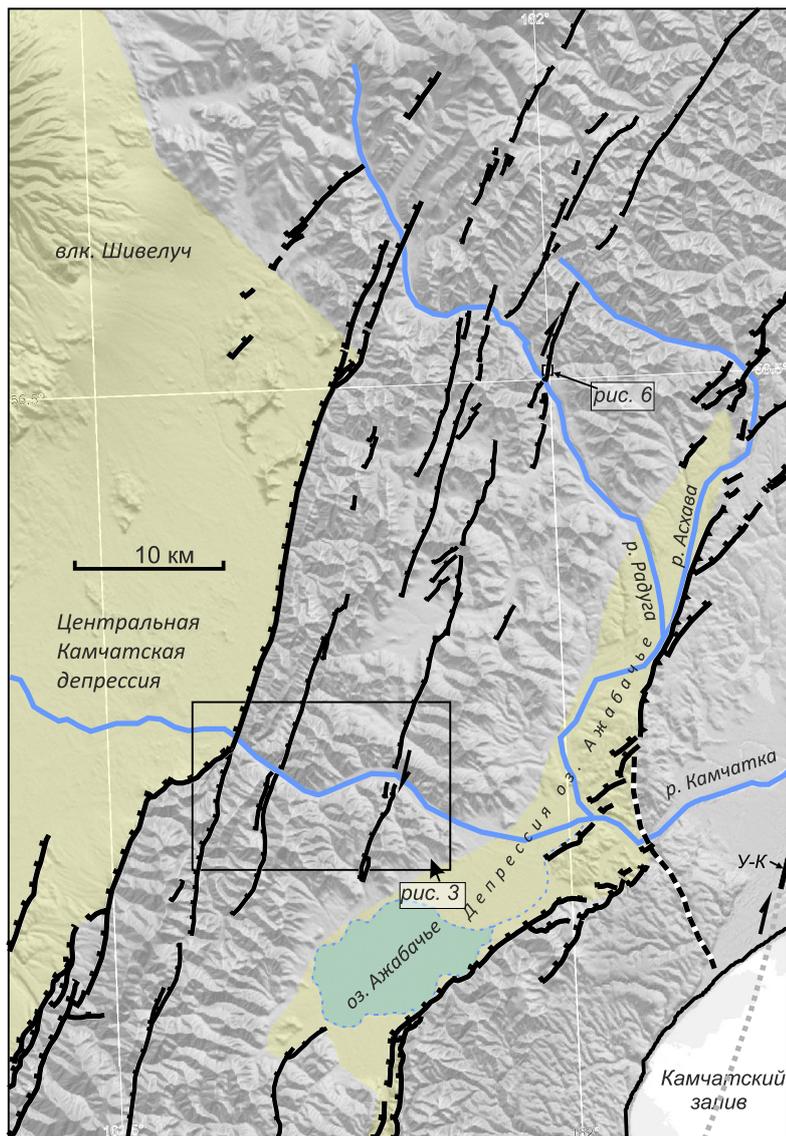


Рис. 2. Активные разломы в хр. Кумроч.

Условные обозначения для разломов – см. рис. 1. Основа рисунка – цифровая модель местности ArcticDem с 10-метровым разрешением [27]. Серая точечная линия – возможное продолжение Усть-Камчатского разлома (У-К) в акватории (см. также рис. 1). Черная пунктирная линия – возможное ныне неактивное продолжение разломов восточного борта северной части депрессии оз. Ажабачье.

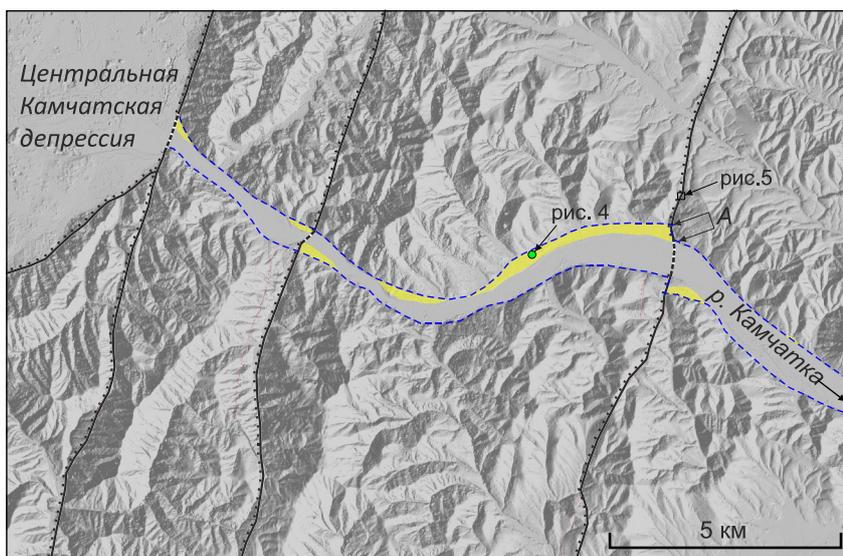
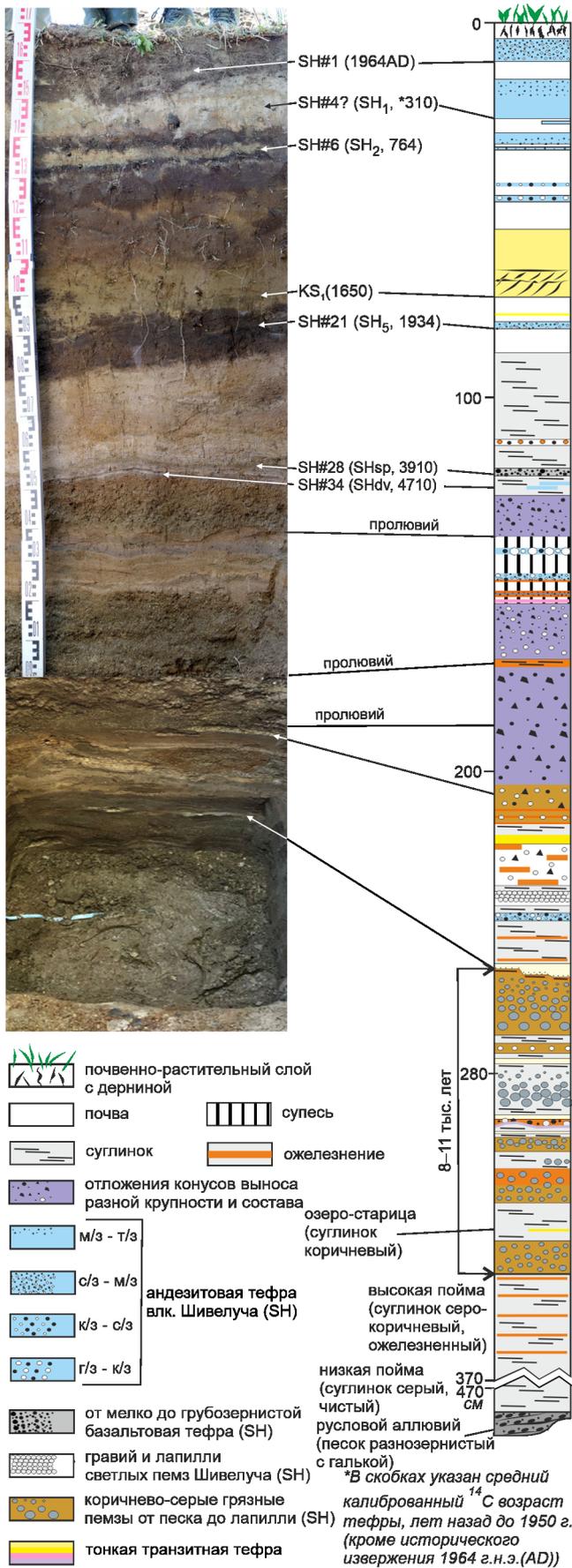


Рис. 3. Активные разломы и террасы р. Камчатки в хр. Кумроч.

Обозначения для разломов – см. рис. 1. Желтая полупрозрачная заливка – позднелейстоценовые террасы в долине современной р. Камчатки. Голоценовые террасы не показаны. А – праводвиговое смещение левого коренного борта р. Камчатки (см. текст). Зеленый кружок – положение шурфа (рис. 4).



возрасте тевры в этой части разреза, перекрывающей русловой аллювий, не представляется возможным. В интервале 11–17.5 тыс. лет назад (позднеледниковое время) пемзовые грубые пемпы вулкана Шивелуча не известны [26]. С глубины примерно в 2.8 м и ниже горизонты тевры залегают во влажных тонкослоистых суглинках, которые могли образоваться в мелководном озерно-речном зарастающем водоеме выше по течению от разлома. Таким образом, можно полагать, что речная терраса сформировалась в интервале от 11 до 17 тыс. лет назад.

Подтверждением наличия правосдвиговой компоненты движений по восточному «внутреннему» разлому служат наблюдения на его линии примерно в 900 метрах к северу от р. Камчатки (в точке с координатами 56.27147° с.ш., 161.81525° в.д.). Смещен по горизонтали, вправо, и по вертикали тальвег ручья, левого притока р. Камчатки. Правостороннее смещение тальвега составляет примерно 7 м, вертикальное – 2.4 м (замеры рейкой и ручным нивелиром) (рис. 5). Общее (с двумя компонентами) смещение – 7.4 м. В шурфе на относительно поднятом крыле, на ставшей неактивной после смещения части тальвега, обнаружены ручьевые и склоновые отложения, перекрытые чехлом почвенно-пирокластических отложений. Самая древняя тефра над отложениями активного русла – тефра вулкана Шивелуч (SHb), выпавшая примерно 2900 л.н. (полевое определение, возраст по [25]). Наличие аллювиально-пролювиальных осадков под теврой позволяет заключить, что русло ручья перестало быть активным примерно 3000 л.н.

Плоскость «внутреннего» разлома в разрезе

Несколько «внутренних» разломов пересекают долину р. Радуги – левого притока р. Камчатки (рис. 2). Через один из них, с целью выявления строения плоскости «внутреннего» разлома и определения режима движений по нему (средняя скорость движений, период повторяемости подвижек), была пройдена канава. Как и у всех разломов в хр. Кумроч, у этого разлома относительно опущено западное крыло разлома.

Канавой (координаты 56.500649° с.ш., 161.996411° в.д.) вскрыт разрез ППЧ голоценового возраста (рис. 6). Разрез включает нижнюю часть,

Рис. 4. Разрез ППЧ на поверхности аллювиальной аккумулятивной позднеплейстоценовой террасы (положение шурфа см. на рис. 3).

Слева – фотография разреза (монтаж снимков). Справа – схема разреза. Обозначения маркирующих горизонтов тевры: SH – вулкана Шивелуч, KS₁ – вулкана Ксудач; в скобках справа – возраст прослоев тевры (округленное до десяти средневзвешенное значение в калиброванных годах до 1950 г.), по [25].

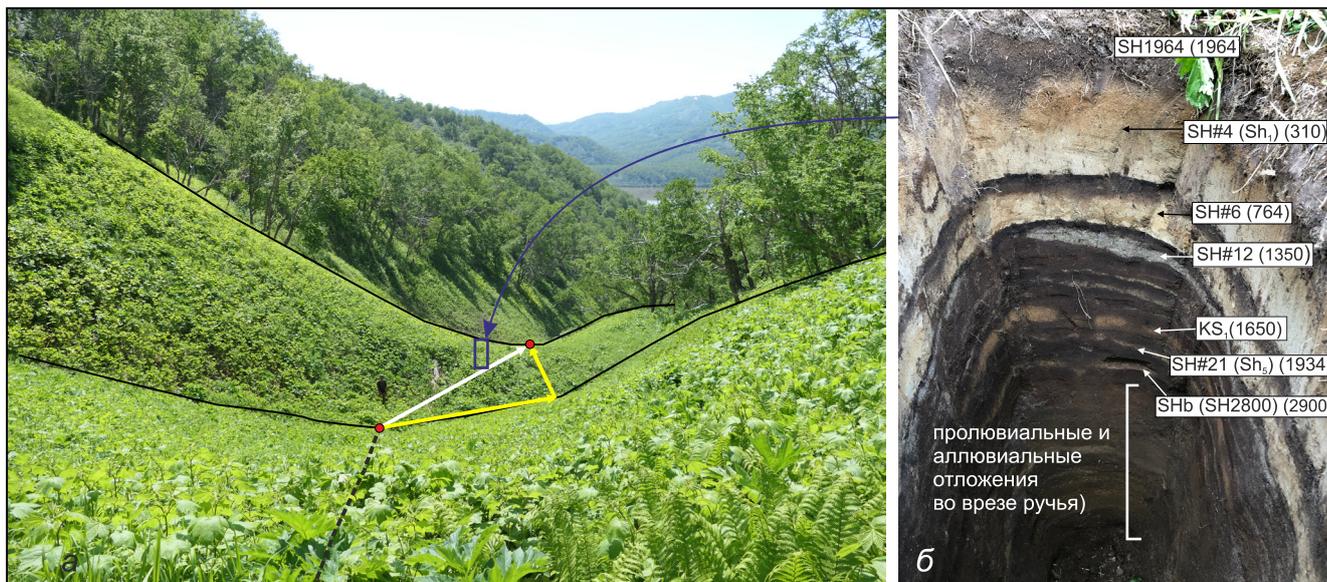


Рис. 5. Правосдвиговое смещение ручья, левого притока р. Камчатки.

a – черная пунктирная линия – линия тальвега врез в относительно опущенном (западном) крыле, красные кружки – точки выхода линии тальвега к линии разрыва в крыльях, белая стрелка – направление общего смещения тальвега, желтые стрелки – вертикальная и горизонтальная компоненты смещения тальвега; *б* – фотография вскрытого шурфом разреза. Глубина шурфа – примерно 2 м. Рост видимого на снимке человека ~170 см. Простираие разлома в точке наблюдения – 35° ССВ. Вид на юг, в направлении стока (на заднем плане – р. Камчатка). Обозначения горизонтов тефры и их возраст – см. рис. 4.

деформированную движением по разлому, и верхнюю, недеформированную. Деформированная часть разреза содержит тефры вулканов Ушковский (Плоский) (PL2), Шивелуча (SH) и Хангара (KHG). Недеформированная часть разреза начинается немного ниже маркирующего пепла вулкана Шивелуч SH#34 (SHdv), отложившегося примерно 4700 лет назад [25]. Разломные плоскости, видимые в разрезе, протягиваются по восстанию практически до этой тефры.

Прослой тефры в деформированной части разреза примерно параллельны, мощность отложений между ними примерно одинакова в обоих крыльях разлома. Мощность отложений в опущенном крыле увеличивается над тефрой SH#34 (SHdv). Тефра вулкана Ксудач (KS) уже параллельна поверхности разломного уступа.

Из изложенного следует, что самая молодая подвижка произошла незадолго до выпадения тефры SH#34 (SHdv), примерно 5000 лет назад. Это значение, 5000 лет, следует принять за минимальную продолжительность периода повторяемости подвижек по разлому.

Сочетание разломных плоскостей и смещений по ним не могут считаться однозначно ни сбросовыми, ни взбросовыми. Оно более соответствует сдвиговым (см., например, [29]). Очевидно наличие компоненты растяжения в движениях по разлому.

Средняя скорость горизонтальных движений по «внутренним» разломам

Приведенные выше примерные значения максимальной величины сдвига коренного борта р. Камчатки (~300 м) и предполагаемого возраста террасы (~11–17 тыс. лет) не могут быть использованы для точной оценки средней скорости правосдвиговых движений. Прямое сопоставление цифр дает среднее значение скорости сдвига в диапазоне примерно от 17 до 27 мм в год, которое нуждается в серьезном подтверждении: оно слишком велико (примерно полскорости движений по разлому Сан-Андреас). Возможен вариант, при котором аккумулятивная терраса стала заполнять возникающие при сдвиге коренного борта реки Камчатки пространства только через некоторое время.

Более обоснованной представляется оценка средней скорости правосторонних движений вдоль «внутренних» разломов по данным шурфа в тальвеге смещенного ручья (рис. 5) и канавы (рис. 6).

Три тысячи лет (см. описание шурфа, рис. 5) можно принять за минимальное значение периода повторяемости подвижек, однако нет уверенности в том, что тефра SHb с возрастом 2900 лет не деформирована: она вскрыта шурфом, а не канавой, пройденной поперек разлома. Теоретически, интервал между подвижками может быть, по крайней мере, вдвое короче.

В то же время, минимальный период повторяемости подвижек в ~5 тыс. лет, следующий из разреза в стенке канавы, по порядку близок к 3000 лет. Таким образом, 3000 лет как период повторяемости (минимальное значение) кажется вероятным: вряд ли периоды повторяемости подвижек вдоль однотипных разломов сильно различаются.

Оценка средней скорости горизонтальных движений по разлому при наблюдаемой амплитуде сдвига в 7 м и периоде повторяемости в 3–5 тыс. лет зависит от принятого допущения: 7 метров – результат разовой подвижки или, по крайней мере, двух. Вариант с 7-метровым разовым смещением представляется маловероятным: для сдвиговых разломов оно (считать ли его средним или максимальным) соответствует магнитуде землетрясения примерно в 7.5–8.0 [30], при этом длина восточного «внутреннего» разлома примерно в 30 км дает значение M не выше 6.8 (там же). Следует считать, что сдвиговое смещение в 7 м есть результат, по крайней мере, двух подвижек, в среднем на 3.5 м каждая. Если так, то средняя скорость смещений может быть оценена величиной от 0.7 (при интервале повторяемости в 5 тыс. лет) до 1.2 мм в год (при интервале повторяемости в 3 тыс. лет).

Такие оценки средней скорости означают, что примерно 300-метровое смещение коренных бортов долины р. Камчатки по восточному из «внутренних» разломов могло накопиться за время от 250 до 430 тыс. лет, то есть со второй половины среднего плейстоцена.

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Установлено, что в движениях по «внутренним» разломам северной части поднятия Восточных хребтов Камчатки есть правосдвиговая составляющая. Правосдвиговая компонента движений по ВКЗР в южной части хребта Кумроч была выявлена ранее [21]. Возможно, крайним восточным элементом системы «внутренних разломов» является Усть-Камчатский разлом на Камчатском полуострове (У-К на рис. 1 и 2), правосдвиговая кинематика которого следует из структурных данных [10].

2. Максимальная средняя за вторую половину голоцена скорость правосдвиговых движений по разломам хр. Кумроч могла достигать 0.7–1.2 мм в год. Разброс значений скорости определяется оценкой среднего периода повторяемости подвижек по восточному из «внутренних» разломов.

3. Видимые на земной поверхности горизонтальные смещения по «внутренним» разломам хр. Кумроч представляют результат движений со второй половины среднего плейстоцена.

ОБСУЖДЕНИЕ

1. В настоящее время нет данных, свидетельствующих о правосдвиговых движениях по ВКЗР южнее хр. Кумроч, хотя попытки их обнаружения предпринимались [8, 14]. Очевидно, что отклик активного русла водотока изменением его направления при пересечении активного разлома зависит от многих факторов, прежде всего – от соотношения скорости сдвига и скорости врезания водотока в земную поверхность. Решающее значение имеют орографические и климатические условия. Отклонения активных русел влево или вправо можно принимать во внимание только тогда, когда они повторяются с одним знаком, от водотока к водотоку. Единственный случай не может служить подтверждением сдвигового движения. Убедительными свидетельствами могут быть только смещения уже неактивных форм рельефа. Проследивание послеледниковых (голоценовых) форм рельефа из крыла в крыло ВКЗР могло бы выявить сдвиговые смещения в первые, до десятков, метры, но не выявило. Таким образом, приуроченность продольных сдвиговых смещений только к самой северной части поднятия Восточных хребтов следует принять за факт, нуждающийся в объяснении.

2. Тихоокеанская плита сближается с Камчаткой – северной частью Курило-Камчатской островной дуги – практически в перпендикулярном к ней направлении (рис. 1). Такое сближение не подразумевает сдвиговых движений вдоль продольных разломов Камчатки. Однако, как показывают данные исследования, они есть, но только в северной части поднятия Восточных хребтов.

Особенностью северной части поднятия Восточных хребтов (южной части хр. Кумроч) является его близкое к меридиональному простираю (от 30° до 17°), не такое как у Восточных хребтов южнее (~45°). Разница в простирающих составляет примерно 30°. В масштабе Камчатки это проявляется в сужении ЦКД к северу. В близком к меридиональному направлению (~17°) протягиваются и «внутренние» разломы южной части хр. Кумроч. Севернее, за ЦКД, они, как и северная часть хр. Кумроч, разворачиваются снова к северо-восточному направлению. В целом, такие изгибы можно представить как горизонтальную левостороннюю флексуру, на передовое крыло которой приходится южная часть поднятия хр. Кумроч (рис. 7).

Формирование флексуры подразумевает вращение ее смыкающего крыла и, как следствие, проскальзывание слагающих его слоев, или крыльев разломов, относительно друг друга: правосдвиговое при вращении против часовой стрелки и левосдвиговое при вращении по часовой стрелке. В рассматриваемом

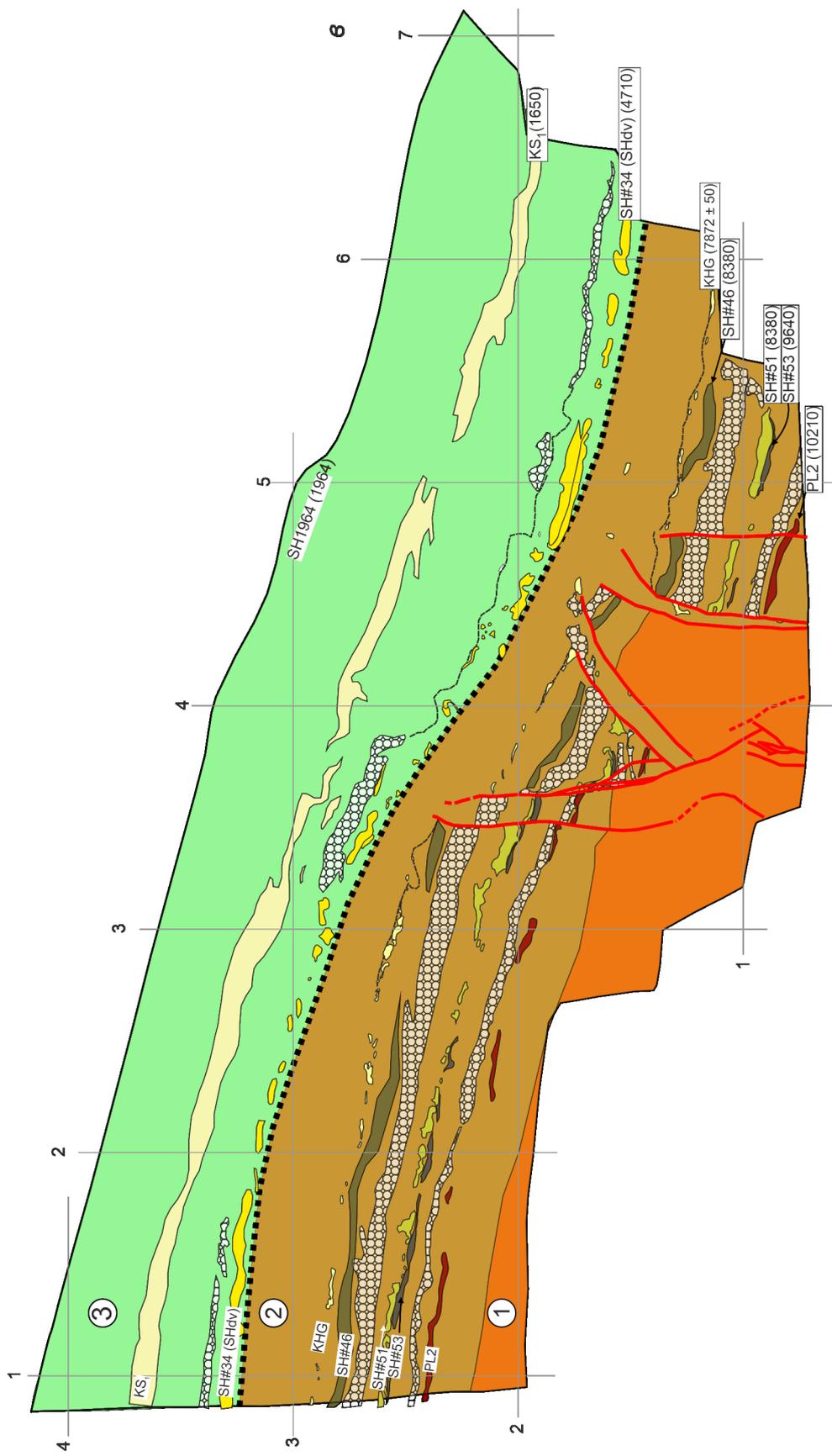


Рис. 6. Нарушенный активным разломом голоценовый почвенно-пирокластический чехол, вскрытый канавой (положение см. на рис. 2).

a – топографический профиль через разломный уступ и положение канавы на уступе (указана примерная величина вертикального смещения в определении [13]); *б* – фотография вскрытого разреза и обозначения основных маркирующих слоев тefры; *в* – зарисовка южной стенки канавы. Обозначения горизонтов тefры и их возраст – те же, что на рис. 4 и 5. Возраст тefры вулкана Хангар (KHG) – по [15]. Цифры в кружках – нумерация основных составляющих вскрытого разреза: 1 – долоценовое основание (тонкозернистые светло- и темно-коричневые плотные пески), 2 – нижняя, деформированная часть разреза почвенно-пирокластического чехла, 3 – часть почвенно-пирокластического чехла, накопившаяся после самого молодого смещения (после выравнивая уступа в земной поверхности), точечная линия – ее подошва. Красные линии – выходы разломных плоскостей на стенку канавы. Расстояние между вертикальными и горизонтальными линиями разметки – в метрах.

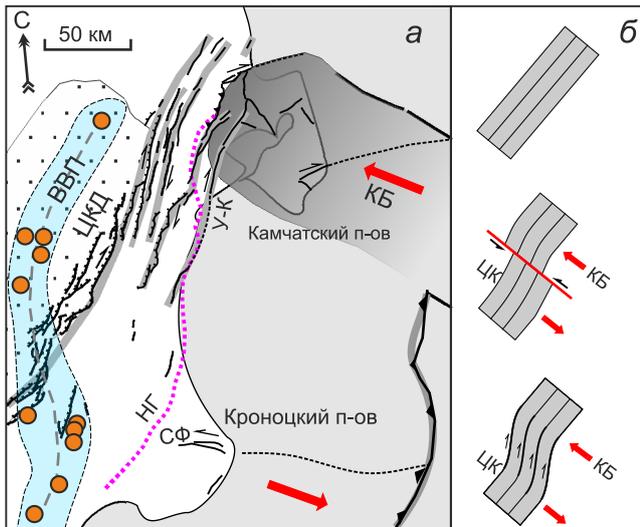


Рис. 7. Схема флексурных деформаций в зоне перехода от коллизионных деформаций Камчатки к деформации ее растяжения.

a – северная часть Камчатки (условные обозначения разломов, центров извержений и контуров вулканического пояса – см. рис. 1). Серая штриховая линия – ось ВВП. Жирные серые линии аппроксимируют линии активных разломов и оси глубоководного желоба. Серая полупрозрачная заливка – северо-западная часть Командорского блока Алеутской островной дуги (КБ). Красные стрелки – движение Командорского блока и восточной Камчатки относительно западной Камчатки. НГ – надвиг Гречишкина (малиновая точечная линия, по [1, 12]), У-К – Усть-Камчатский разлом (см. также рис. 1, 2), СФ – разломы «Северного фаса» Кроноцкого полуострова [8], с изменениями по данным дешифрирования. Правосдвиговые разломы на Камчатском полуострове – по [6]; *б* – варианты деформаций в зоне сочленения Командорского блока (КБ) Алеутской островной дуги с Центральной Камчаткой (ЦК): вверху – исходное положение слоев (блоков), в центре – вариант с левосдвиговым разломом (красная линия) между областями растяжения и сокращения, внизу – левосдвиговая флексура вместо левосдвигового разлома. Черные односторонние стрелки – сдвиговая компонента движений.

случае, на смыкающем крыле флексуры, в поднятии хр. Кумроч, следует ожидать правосторонние смещения, которые и происходят.

Зависимость между углом поворота передового крыла флексуры, расстоянием между параллельными разломами в ней и величиной смещения была предложена Р. Фройндом [19]. В случае поднятия Восточных хребтов угол поворота составляет примерно 30° , среднее расстояние между «внутренними» разломами – примерно 3 км (рис. 1 и 2). Такие значения приводят к величине накопленного сдвигового смещения по одному разлому примерно в 1.5 км, в пять раз превышающее измеренное, но по порядку с ним сопоставимое.

Источниками несоответствия могут быть следующие.

Во-первых, следует учитывать неизбежную неточность определения средней скорости движений по восточному «внутреннему» разлому, а также времени начала формирования ЦКД и ее восточного фланга [22].

Во-вторых, нет причин считать, что формирование флексуры началось со времени формирования ЦКД и Восточных хребтов.

Блок Камчатского полуострова, как элемент Кроноцкой палеодуги, достиг основного массива Камчатки примерно 2 млн л. н. [23]. После этого движения блока полуострова на северо-запад относительно западной Камчатки происходили под давлением западной части Алеутской дуги (см., например, [6] и ссылки в этой статье). Можно представить, что северная часть ЦКД в начале ее формирования унаследовала (в какой степени – непонятно) появившийся к тому времени изгиб. В этом смысле показательным является гораздо больший флексурный изгиб линии надвига Гречишкина напротив Камчатского полуострова – шовной структуры между Камчаткой и Кроноцкой палеодугой (рис. 7). Таким образом, угол поворота передового крыла флексуры за средне-позднечетвертичное время мог быть меньше 30° . При расчете величина сдвига на передовом крыле флексуры уменьшается прямо пропорционально уменьшению угла поворота.

3. Величина накопленного смещения примерно в 300 м по одному из разломов не может быть отнесена к другим разломам смыкающего крыла флексуры. Измеренное по дистанционным данным накопленное смещение по разлому западнее изученного не превышает 40–50 м. Остаются неизвестными величины правосдвиговых смещений, накопленных со второй половины среднего плейстоцена вдоль разлома между ЦКД и поднятием Восточных хребтов, а также вдоль Усть-Камчатского разлома. Если же приписать к каждому из разломов накопленное смещение в первые десятки и сотни метров, то общую величину сдвига за счет формирования флексуры можно оценить очень приблизительно примерно в 1 км.

4. Левосторонняя флексура кинематически замещает левосдвиговой разлом, который должен был бы разделять две по-разному деформирующиеся части Камчатки – коллизионную и с поперечным растяжением (рис. 7, б, в центре). Такого разлома нет – его роль выполняет левосторонняя флексура (рис. 7, б, внизу).

5. Разнонаправленность движений Алеутской дуги и восточных блоков Камчатки относительно западной Камчатки означает, что в флексурную деформацию должны быть вовлечены все составляющие северной части Курило-Камчатской островодужной системы. Действительно, ближе к меридиональному направлению отклоняется глубоководный желоб севернее Кроноцкого полуострова (рис. 1, 7) и, как возмож-

ное следствие, Восточная вулканическая зона Камчатки, перемещающаяся в ЦКД. В целом, появление флексуры и ее развитие можно представить как результат противодействия Командорского блока Алеутской дуги расширению Центральной Камчатки в сторону океана.

6. Левосдвиговой флекуре соответствуют левосторонние движения вдоль субширотных активных разломов Кроноцкого полуострова [8]. Если ошибки в определении кинематики этих разломов нет, то их можно считать осложняющими смыкающее крыло левосдвиговой флексуры.

7. Полученные данные о параметрах «внутренних» разломов позволяют высказать предположения палеографического характера.

Накопление примерно 300-метрового смещения долины р. Камчатки могло начаться 250–430 тыс. лет тому назад. Если подсчеты верны, то верно также заключение, что 250–430 тыс. л.н. долина р. Камчатки уже существовала. В это время (вторая половина среднего плейстоцена) только начинали орографически оформляться Центральная Камчатская депрессия и ее фланги [2, 3, 5]. Это также время, когда на месте будущей ЦКД еще существовало обширное озеро, отложения которого, видимые в разрезах, представлены комплексом «синих глин» [2, 3, 5]. Такие хронологические совпадения подразумевают, что еще до формирования поднятия хр. Кумроч сток из существовавшего озера был и что он происходил там, где находится антецедентная часть современной долины р. Камчатки. Представляется закономерным положение этой части долины в самой низкой (вследствие или меньшей скорости воздымания, или же несколько более позднего начала воздымания) части поднятия Восточных хребтов.

ВЫВОДЫ

Правосдвиговые движения по продольным разломам на севере Камчатки представляют результат проскальзывания разделяемых разломами блоков в связующем крыле горизонтальной левосдвиговой флексуры, соединяющей части Камчатки с разным режимом деформирования – поперечного коллизионного сокращения и поперечного надсубдукционного растяжения. В целом, полученные данные свидетельствуют о возможности появления локальных сдвиговых движений в островной дуге при нормальном к ней поддвиге океанической плиты.

Авторы благодарны рецензентам за время, потраченное ими на прочтение статьи, и сделанные замечания. Ответы на них помогли улучшить статью.

Данные, положенные в основу статьи, были получены при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-27-00069.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бахтеев М.К., Морозов О.А., Тихомиров С.Р. Строение безофиолитового коллизионного шва Восточной Камчатки – зоны надвига Гречишкина // Геотектоника. 1997. № 3. С. 74–85.
2. Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Евтеева И.С., Лупкина Е.Г. Стратиграфия четвертичных отложений и оледенения Камчатки. М.: Наука, 1968. 226 с.
3. Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Сулержицкий Л.Д. Новые данные о возрасте плейстоценовых отложений Центральной Камчатской депрессии // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2005. Т. 1, № 1. С. 106–115.
4. Ермаков В.А., Милановский Е.Е., Таракановский А.А. Значение рифтогенеза в формировании четвертичных вулканических зон Камчатки // Вестн. МГУ. 1974. № 3. С. 3–20.
5. История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока. Камчатка, Курильские и Командорские острова. М.: Наука, 1974. 448 с.
6. Кожурин А.И., Пинегина Т.К., Пономарева В.В., Зеленин Е.А., Михайлюкова П.Г. Скорость коллизионных деформаций полуострова Камчатский (Камчатка) // Геотектоника. 2014. № 2. С. 42–60.
7. Левин В.Е., Магуськин М.А., Бахтиаров В.Ф. и др. Мульти-системный геодезический мониторинг современных движений земной коры на Камчатке и Командорских островах // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 54–67.
8. Леглер В.А., Парфенов Л.М. Системы разломов островных дуг // Тектоническое районирование и структурно-вещественная эволюция Северо-Востока Азии. М.: Наука, 1979. С. 134–156.
9. Певзнер М.А. Палеомагнетизм и стратиграфия плиоцен-четвертичных отложений Камчатки. М.: Наука, 1972. 68 с. (Тр. ГИН. Вып. 235)
10. Пинегина Т.К., Кожурин А.И., Пономарева В.В. Оценка сейсмической и цунамиопасности для поселка Усть-Камчатск (Камчатка) по данным палеосейсмологических исследований // Вестн. КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2012. Вып. 19, № 2. С. 138–159.
11. Селиверстов Н.И. Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский. Изд-во КамКГУ им. Витуса Беринга, 2009. 191 с.
12. Шапиро М.Н. Надвиг Гречишкина на побережье Камчатского залива // Геотектоника. 1980. № 3. С. 102–110.
13. Caskey S.J. Geometric relations of dip slip to a faulted ground surface: new nomograms for estimating components of fault displacement // J. Structural Geol. 1995. V. 17, N 8. P. 1197–1202.
14. Cervera Heinlein S.N. Spatial patterns of geomorphic surface features and fault morphology based on diffusion equation modeling of the Kumroch Fault Kamchatka Peninsula, Russia // J. Volcanol. and Geotherm. Res. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.01.017>.
15. Cook E., Portnyagin M.V., Ponomareva V.V., Bazanova L.I., Svensson A., Garbe-Schönberg D. First identification of cryptotephra from the Kamchatka Peninsula in a Greenland ice core: implications of a widespread marker deposit that links Greenland to the Pacific northwest // Quat. Sci. Rev. 2018. 181. P. 200–206. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.11.036>.
16. DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S. Effect of recent

- revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions // *Geophys. Res. Lett.* 1994. 21. P. 2191–2194. <https://doi.org/10.1029/94GL02118>.
17. DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F. Geologically current plate motions // *Geophys. J. Intern.* 2010. 181. P. 1–80. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x>.
 18. Fitch T.J. Plate convergence, transcurrent faults and internal deformation adjacent to southeast Asia and the western Pacific // *J. Geophys. Res.* 1972. V. 77. P. 4432–4460.
 19. Freund R. Kinematics of transform and transcurrent faults // *Tectonophysics.* 1974. 21. P. 93–134.
 20. Gibbard Ph, Cohen K. Global chronostratigraphical correlation table for the last 2.7 million years // *Episodes.* 31(2):243. DOI:10.18814/epiugs/2008/v31i2/011).
 21. Kozhurin A.I., Acocella V., Kyle P.R., Lagmay F.M., Melekestsev I.V., Ponomareva V., Rust D., Tibaldi A., Tunesi A., Corazzato C., Rovida A., Sakharov A., Tengonciang A., Uy H. Trenching active faults in Kamchatka, Russia: paleoseismological and tectonic implications // *Tectonophysics.* 2006. V. 417. P. 285–304.
 22. Kozhurin A.I., Zelenin E.A. An extending island arc: The case of Kamchatka // *Tectonophysics.* 2017. T. 706. C. 91–102. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.04.001>.
 23. Lander A. V., Shapiro M.N. The Origin of the modern Kamchatka subduction zone // *Amer. Geophys. Union, Geophys. Monograph Ser.* «Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region» / Eds: J. Eichelberger, Gordeev, E. Kasahara M. et al. 2007. V. 172. P. 57–64.
 24. Levin V.E., Bakhtiarov V.F., Titkov N.N., Serovetnikov S.S., Magus'kin M.A., Lander A.V. Contemporary crustal movements (CCMS) in Kamchatka // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth.* 2014. V. 50, N 6. C. 732–751. DOI: 10.1134/S1069351314060044.
 25. Ponomareva V., Portnyagin M., Florin F. I., Zelenin E., Bourgeois J., Pinegina, T., Kozhurin A. Full holocene tephrochronology for the Kamchatsky Peninsula region: Applications from Kamchatka to North America // *Quater. Sci. Rev.* 2017. V. 168. P. 101–122. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.04.0310277-3791>
 26. Ponomareva V., Pendea, F., Zelenin E., Portnyagin M., Gorbach N., Pevzner M., Plechova A., Derkachev A., Rogozin A., Garbe-Schönberg D. The first continuous late Pleistocene tephra record from Kamchatka Peninsula (NW Pacific) and its volcanological and paleogeographic implications // *Quater. Sci. Rev.* 2021. T. 257. 106838. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.106838>.
 27. Porter Claire, Morin Paul, Howat Ian et al. «ArcticDEM». 2018. <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH>, Harvard Dataverse, V1, [Date Accessed].
 28. Schellart W.P. Subduction zone trench migration: Slab driven or overriding-plate-driven? // *Physics Earth Planet. Inter.* 2008. 170. P. 73–88.
 29. Sylvester Arthur G. Strike-slip faults // *Geol. Soc. Amer. Bull.* 1988. 100.1666-1703. doi:10.1130/0016-7606(1988)100<1666:SSF>2.3.CO;2
 30. Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // *Bull. Seism. Soc. Am.* 1994. V. 84, N 4. P. 974–1002.

*Рекомендована к печати В.Г. Быковым
после доработки 10.05.2023 г.
принята к печати 03.07.2023 г.*

A.I. Kozhurin, T.K. Pinegina, V.V. Ponomareva

Arc-parallel strike-slip faulting in an island arc under arc-normal subduction: the case of Kamchatka

Crustal deformation in Kamchatka since the Middle Pleistocene is driven by two processes: transverse extension as a result of its eastern part displacement towards the ocean following the submerged part of the oceanic plate, and transverse shortening just north of the subduction zone as the Komandor block of the Aleutian arc gets closer to Kamchatka. The areas of differently directed movements and deformations of Kamchatka are separated by the left-lateral horizontal flexure appearing in plan as curved uplifts of the Eastern Range, the deep water trench, and consequently, the axis of the East volcanic belt. Kinematically, the flexure replaces the expected transverse left-lateral strike-slip fault between the two differently deformed parts of Kamchatka. The revealed right-lateral displacements along the longitudinal faults in the northern part of the uplift of the Eastern Range in Kamchatka result from bedding-plane slip in the flexure limb. The high alluvial terrace of the Kamchatka River, displaced landforms, and faulted layers of the soil-pyroclastic cover were dated by the tephrochronological method. Age determinations imply that the recurrence of displacements along the faults of the flexure is about once every 3-5 thousand years, and the average rate of lateral displacements during the second half of the Holocene is about 1 mm per year. Comparison of the fault movement rates and the maximum value of the accumulated lateral displacement of the Kamchatka River valley suggest that horizontal movements began no later than the second half of the Middle Pleistocene. This also means that the Kamchatka River valley already existed at that time, and its antecedent part was formed when down-cutting into the bedrock of the uplifting Eastern Range. The total amount of displacement along the faults of the flexure since the second half of the Middle Pleistocene is estimated at about 1 km. On the whole, the results suggest the possibility of lateral movements along longitudinal faults in an island arc with the oceanic plate direction being normal to it.

Key words: strike-slip faulting in an island arc, horizontal flexure, tephra, trenching, Kamchatka River, Central Kamchatka depression, Kamchatka Peninsula.