

УДК 551.242.12

ГОЛОЦЕНОВЫЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ ПОБЕРЕЖЬЯ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТСКИЙ (КАМЧАТКА) ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ МОРСКИХ ТЕРРАС

© 2010 Т.К. Пинегина¹, Е.А. Кравчуновская¹, А.В. Ландер²,
А.И. Кожурин³, Дж. Буржуа⁴, Е.М. Мартин⁴

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006;
e-mail: tsunami@kscnet.ru;

²Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН,
Москва, 113556;

³Геологический институт РАН, Москва, 119017;

⁴Университет штата Вашингтон, США, Сиэтл, WA 98195-1310

В статье приведены новые данные о скорости и направлении вертикальных движений побережья полуострова Камчатский, полученные при изучении геолого-геоморфологического строения голоценовых морских аккумулятивных террас. Впервые предложена оригинальная методика реконструкции положения древних береговых линий и определения параметров вертикальных тектонических движений за временные интервалы от нескольких сотен до первых тысяч лет. Установлено, что тектонические движения побережья полуострова Камчатский в голоцене были неравномерными, вплоть до смены знака вертикальных движений во времени для одного и того же участка побережья. Полученные средние значения скоростей вертикальных движений за последние ~ 2000 лет (от -1.1 до +10.9 мм в год) практически повторяют определенные инструментально средние значения скоростей за период в несколько десятков лет. В статье показано, что тектонические движения вдоль побережья Камчатского полуострова резко дифференцированы, обнаружена определенная корреляция участков с разными параметрами движений с линиями и распространением известных активных разломов. Выявлено, что для наиболее короткого из изученных временных интервалов, продолжительностью в ~ 340 лет, средние скорости вертикальных движений были наиболее высокими. Сделан вывод о вероятной косейсмической природе вертикальных движений побережья полуострова в голоцене.

Ключевые слова: голоценовые аккумулятивные морские террасы, скорость, направление, вертикальные движения.

ВВЕДЕНИЕ

В ряду полуостровов восточного побережья Камчатки полуостров Камчатский занимает особое положение: находясь прямо на продолжении поднятия Командорских островов, он выступает в виде связующего звена между Алеутской и Камчатской островными дугами.

От других полуостровов его отличают северо-западное простираие, промежуточное между простираиями островов запада Алеутской дуги и Камчатки, и дифференцированность рельефа — наличие нескольких изолированных поднятий, окружающих депрессию озер Нерпичье и Култучное. Последняя особенность связана, очевидно, с неравномерным воздыманием от-

дельных частей полуострова в четвертичное время, после предполагаемого причленения блока полуострова к Камчатке в интервале от 2 до 0.5 млн лет назад (Шапиро, Ландер, 2003; Lander, Shapiro, 2007), то есть, с неравномерными по площади и скорости тектоническими движениями.

В настоящее время общепринятым является предположение о том, что причиной деформации полуострова является коллизионное взаимодействие Алеутской и Камчатской островных дуг (рис. 1), при движении Командорского блока (Левин и др., 2009; Apel et al., 2006) на северо-запад вдоль трансформного разлома западных Алеут (Geist, Scholl, 1994; Mackey et al., 1997; Watson, Fujita, 1985; Zonenshain et al., 1990).

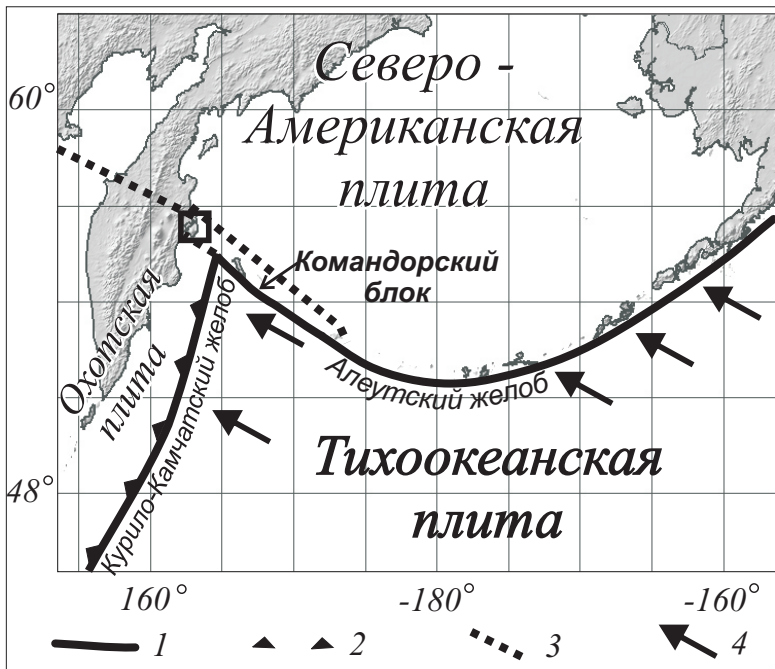


Рис. 1. Границы плит и тектонических блоков в зоне взаимодействия Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг: 1 – граница Тихоокеанской плиты; 2 – субдукция Тихоокеанской плиты под Охотскую плиту; 3 – граница Северо-Американской и Охотской плит (предполагаемая); Командорский блок показан по (Apel et al., 2006). 4 – направление движения Тихоокеанской плиты. В черном квадратике – полуостров Камчатский.

Следует отметить, что определение взаимодействия дуг как коллизионного, в определенной степени, условно: Командорский сегмент все еще отделен от полуострова Камчатский участком океанической коры (Камчатский пролив), а по сейсмическим данным (Ландер и др., 1994; Geist, Scholl, 1994), контакт дуг находится восточнее полуострова Камчатский, в основании его подводного склона.

Пожалуй, коллизионным, в обычном понимании этого термина, может считаться взаимодействие дуг лишь в рамках представлений К. Гедике с соавторами (Gaedike et al., 2000), которые предприняли попытку найти продолжения структур Командорского блока (продольных сдвиговых разломов) в пределах полуострова Камчатский, то есть, структурно связать две дуги. А.И. Кожурин (Kozhurin, 2007) наоборот, предполагает автономное (не коллизионное) деформирование блока полуострова Камчатского, при его дифференцированном вращении, вызываемом неравномерным давлением на него со стороны Командорского блока.

Очевидно, что любая модель взаимодействия дуг и закономерностей деформирования блока полуострова должна интегрировать в себе реальные параметры тектонических движений, такие, как скорость и направление движений, их распределение во времени и по площади полуострова.

Помимо выявления закономерностей распределения активных разломов, направления и скорости перемещений по некоторым из них (Kozhurin, 2007), исследования тектонических движений на полуострове включали также инструментальные наблюдения (Кириенко, Золо-

тарская, 1989; Левин и др., 2002, 2006) и изучение плейстоценовых морских террас с возрастом порядка 125 тыс. лет и древнее (Freitag et al., 2001; Pedoja et al., 2006).

Повторным нивелированием 1971–1986 гг. установлено, что скорости вертикальных движений на побережье полуострова Камчатский доходили до 10 мм/год (Кириенко, Золотарская, 1989), а во время землетрясения 1971 г. вертикальное изменение высот реперов друг по отношению к другу составило 80 мм, что, по сути, является косейсмической деформацией.

По данным о плейстоценовых морских террасах, скорости движений на побережье Камчатского полуострова, осредненные за период 125 тыс. лет, составили от 0.08 до 1.33 мм/год (Pedoja et al., 2006). Эти значения оказались в десятки раз меньше скоростей, полученных по инструментальным данным (Кириенко, Золотарская, 1989). Такой эффект «несоответствия» средних значений скоростей тектонических движений для разных по продолжительности периодов времени и их увеличение от прошлого к современности был установлен и ранее, при изучении многих побережий тектонически активных регионов мира (Япония, Таиланд, Папуа – Новая Гвинея, Новая Зеландия и др.).

Как видно, за пределами внимания исследователей до сих пор оставались вертикальные движения, происходившие в пределах полуострова в голоцене. В настоящей статье приводятся данные изучения голоценовых морских террас и, на их основе, характеризуются вертикальные тектонические движения побережья полуострова Камчатский, что восполняет этот пробел. Отметим, что голоценовое время яв-

ляется достаточно продолжительным, чтобы в течение него проявились основные тенденции в тектонических движениях (деформациях) блоков полуострова Камчатский. С другой стороны, изучая промежутки времени в первые сотни и тысячи лет, можно понять, как именно (постепенно или импульсно, однонаправлено или разнонаправлено и т.д.) происходили вертикальные движения. Исследование движений земной поверхности в пределах полуострова Камчатский представляется очень важным, так как может дополнить представления о процессах, происходящих в зоне Камчатско-Алеутского взаимодействия.

МЕТОДИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЙ БЕРЕГОВЫХ ЛИНИЙ НА АККУМУЛЯТИВНЫХ ГОЛОЦЕНОВЫХ МОРСКИХ ТЕРРАСАХ И РАСЧЕТ СКОРОСТЕЙ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ПОБЕРЕЖЬЯ

В настоящее время существует несколько взглядов на характер колебаний уровня моря в голоцене (Каплин и др., 1991; Селиванов, 1996; Douglas et al., 2001). На основании наших многолетних исследований (Bourgeois et al., 2006; Pinegina et al., 2003), мы пришли к выводу, что на Камчатке максимальный уровень моря в голоцене был достигнут в период 5-6 тыс. лет назад. К этому времени относится формирование лагун практически по всему восточному побережью Камчатки. Значительных колебаний уровня моря после этого не происходило, т.е. уровень практически соответствовал современному. Поэтому колебания относительного уровня моря, имевшие место в последние примерно 5 тыс. лет, следует считать результатом вертикальных тектонических движений побережий. Это находит подтверждение в разновысотности одновозрастных голоценовых морских террас вдоль восточного побережья Камчатки (Klavchunovskaya et al., 2004; Martin et al., 2004; Pinegina, Bourgeois, 2004).

Изменения относительного уровня моря непосредственно влияют на формирование морских террас. От них зависит само наличие или отсутствие береговых (надводных) морских террас, их высота, выдержанность по простиранию, морфология и геологическое строение. Высота террас контролируется относительным уровнем моря, существующим на момент их формирования, а характер поперечного профиля морских террас (наличие лестниц, плавное повышение или понижение террас в сторону суши и т.д.) зависит, главным образом, от того, в каком направлении менялся относительный уровень моря, и как - постепенно или импульсами. Та-

ким образом, изучая распространение морских террас вдоль побережья, датируя их, измеряя их высоты и анализируя вариации высот, можно выявить тектоническую составляющую в их формировании. Основным при этом является восстановление положения древних береговых линий на различные моменты времени относительно современной линии берега.

Исследования морских террас на побережье полуострова Камчатский были проведены нами в 2003-2004 гг. Работы включали гипсометрическое профилирование, изучение разрезов морских террас и перекрывающих их отложений.

Гипсометрические профили измерялись от уреза воды примерно перпендикулярно линии берега, вкрест простирания морских террас. Всего были измерены 33 профиля длиной до 1 км, 5 из которых расположены в районе бухты Солдатской, 2 – между бухтой Солдатской и р. Вторая Перевальная, 26 – на отрезке побережья между рекой 2-я Перевальная и мысом Камчатский. Расположение профилей определялось наличием голоценовых морских аккумулятивных террас. Приведение профилей к единому уровню моря обеспечивалось фиксированием времени замеров уреза воды и дальнейшей коррекцией полученных высотных отметок по таблицам приливов.

Вдоль измеренных профилей закладывались геологические шурфы, глубина которых варьировала от примерно одного до нескольких метров. При этом вскрывался почвенно-пирокластический чехол (ППЧ) и верхняя (0.5-1 м) часть слагающих террасы морских отложений, по характеру слоистости соответствующих отложениям активного пляжа.

В шурфах, прежде всего, распознавались и описывались горизонты вулканических пеплов, отбирались их образцы. Определение верхней возрастной границы формирования морских террас проводилось нами с помощью маркирующих горизонтов вулканических пеплов (тефры), залегающих в самом основании ППЧ, непосредственно над морскими отложениями. Точность определения возраста тефры зависит от точности радиоуглеродного датирования вмещающей тефру органики.

При извержении пепел плащом покрывает значительную площадь и образует четкий маркирующий горизонт, который можно проследить на огромных территориях. Практически каждый горизонт тефры обладает уникальным набором свойств, позволяющим его идентифицировать в разрезах (Braitseva et al., 1995, 1997). В наших исследованиях (рис. 2) использовались следующие маркирующие горизонты пеплов (Ponomareva et al., 2007): Ш1964 (вулкан Шивелуч, извержение 1964 г.), Ш1450 (вулкан Шиве-

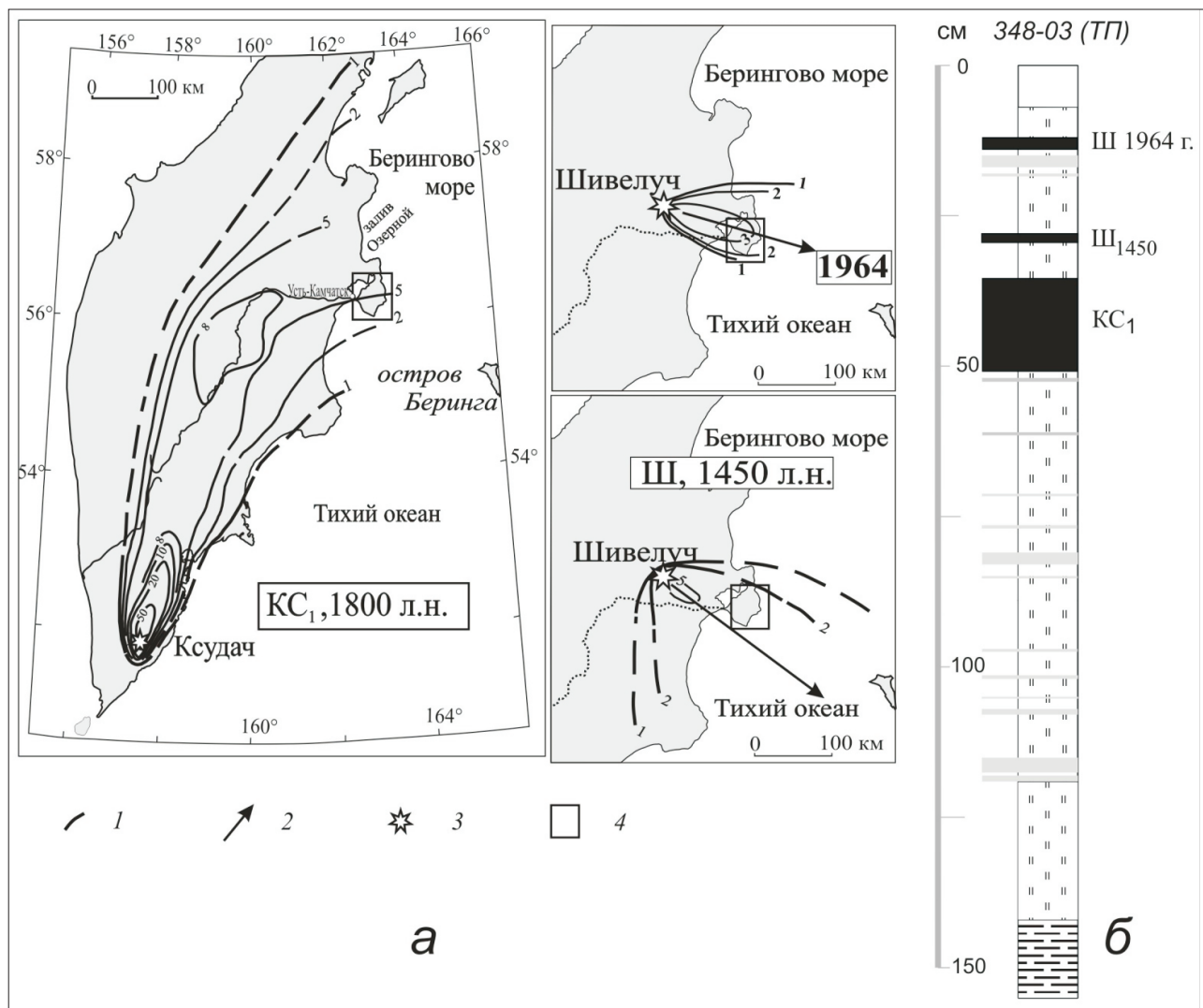


Рис. 2. Маркирующие горизонты тефры, используемые в работе:

а – карты изопакит (Bourgeois et al., 2006): 1 – изопакиты (мощность тефры), см; 2 – оси пеплопадов; 3 – активные вулканы, горизонты тефры которых используются в данной работе; 4 – район работ; *б* – один из опорных разрезов торфяника в бухте Солдатской. Нижние горизонты торфа имеют возраст около 6000 лет и подстилаются лагунными отложениями. Черной заливкой показаны пеплы, используемые в данной статье при расчете скоростей тектонических движений за разные промежутки времени; серой заливкой – прочие пеплы.

луч, извержение 1450 ¹⁴С лет назад или ~ 590 года нашей эры (далее г.н.э.) и КС₁ (вулкан Ксудач, извержение 1800 ¹⁴С лет назад или ~ 250 г.н.э.). Наличие этих горизонтов в районе наших исследований было показано ранее (Певзнер и др., 1997; Bourgeois et al., 2006).

Стандартная методика оценки скорости тектонических движений по морским террасам предполагает определение высотного положения их тыловых швов (например, (Padoja et al., 2006)), маркирующих положение древних береговых линий в определенные моменты времени. Однако, такой подход возможно использовать лишь для древних (сотни тысяч лет) морских террас, а для голоценовых террас он оказывается слишком приблизительным. Методика, которую мы использовали для определения положения голо-

ценовых береговых линий, описывается впервые в данной статье. Она, на наш взгляд, позволяет избежать погрешностей в реконструкциях, связанных с приведением разных профилей к единому уровню относительно уровня моря, с неточностью датировок морских террас, с их возможными периодическими размывами. Таким образом, предлагаемая здесь методика значительно повышает качество расчетов скоростей вертикальных движений.

Для того, чтобы сравнивать абсолютные высоты террас на разных участках, недостаточно привести профили к единому уровню прилива. Это связано с тем, что разные участки побережья, в силу их разной экспозиции, влияния подводного рельефа и т.д., подвергаются волновому воздействию разной интенсивности. В итоге,

высота сформировавшейся террасы изначально не одинакова вдоль берега. Соответственно, на одних участках террасы накопление ППЧ начинается на более низком гипсометрическом уровне, а на других - на более высоком. Так, на побережье полуострова Камчатский, высота верхней границы современного активного пляжа колеблется в пределах ~ 3.5-7.5 м над уровнем моря. Иными словами, *различная высота разновозрастной террасы на разных участках берега может быть обусловлена не только тектоническим фактором, но и разной волновой энергией.*

Из этого следует, что напрямую коррелировать террасы на разных участках берега нельзя. В то же время, можно сравнивать высоты разновозрастных террас в какой-то одной точке берега (вдоль линии одного профиля), допустив, что волновая энергия в одной точке остается, практически неизменной на протяжении нескольких тысяч лет.

Для того, чтобы сравнивать высоты террас на разных участках берега, мы предлагаем оригинальную методику. На основании исследований побережий в 1995-2009 гг., мы пришли к следующим выводам:

1. Верхняя высотная граница активной береговой зоны маркируется началом густой растительности. Эту точку мы отмечали на профилях как «*dense vegetation*». Наши наблюдения показали, что несомкнутые группировки пионерных видов могут в течение нескольких лет поселиться в зоне пляжа, активной лишь во время сильнейших штормов (штормов с наименьшей обеспеченностью). В то же время, густая растительность занимает лишь те участки террасы, *которые окончательно вышли из зоны штормовой досягаемости, и на которых может формироваться почвенный чехол.*

2. Если проследить от суши в сторону моря пепловые прослои в разрезах ППЧ, можно наблюдать два случая их выклинивания: постепенное и резкое.

В первом случае пепел выклинивается постепенно, заглубляясь относительно земной поверхности и, затем, мористее, исчезая. Точку профиля, в которой пепел начинает заглубляться, мы назвали «*точкой выклинивания*». Эта точка находилась на границе активной береговой зоны, то есть в точке *dense vegetation* на момент выпадения пепла.

Следовательно, *высота над уровнем моря точки выклинивания пепла на момент его выпадения равнялась современной высоте над уровнем моря точки dense vegetation.*

Мы объясняем постепенное выклинивание пеплов тем, что когда пепел выпадает на поверхность морской аккумулятивной террасы, он перекрывает как ее реликтовые густо заросшие

участки, так и активный береговой вал, включая зону несомкнутой пионерной растительности. Если пепел выпадал на густо заросшие участки реликтовой террасы, впоследствии мы находим его залегающим в почве, поскольку на реликтовой террасе происходит почвообразовательный процесс. В случае, если пепел попадает на участки террасы, сравнительно недавно вышедшие из зоны активного волнового воздействия, где только поселяется пионерная растительность, впоследствии мы находим его залегающим в практически чистом песке, поскольку, как до, так и сразу после выпадения пепла, почвообразовательные процессы здесь почти отсутствуют, но активны эоловые процессы. В нижней части активного пляжа, ежегодно подвергающейся штормам, пепел не сохраняется или сохраняется линзами в перемытом и переотложенном виде. Таким образом, постепенность выклинивания пепла связана с постепенностью перехода от хорошо заросшей реликтовой террасы к активному береговому валу (рис. 3).

На рис. 3 показано, что над пеплом со стороны моря накопилось гораздо больше отложений, чем со стороны суши, за один и тот же промежуток времени. Связано такое интенсивное накопление отложений, по-видимому, в основном с эоловыми процессами. Таким образом, постепенное выклинивание пепла и его заглубление в песок относительно уровня современной земной поверхности является индикационным признаком непрерывности процесса аккумуляции морских отложений, а *точка выклинивания* пепла служит палеоаналогом современной точки *dense vegetation* на совре-

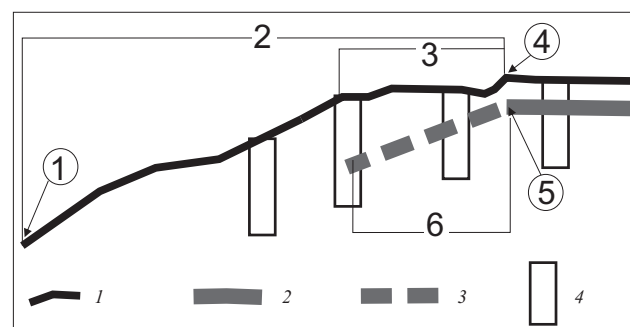


Рис. 3. Схематический топографический профиль. Море находится слева. 1 – современная земная поверхность; 2 – горизонт вулканического пепла, маркирующий земную поверхность на момент его выпадения; 3 – поверхность верхней части активного пляжа на момент выпадения пепла; 4 – геологические шурфы, заложенные вдоль топографического профиля. Цифрами обозначены: 1 – средний уровень моря; 2 – зона активного пляжа; 3 – зона несомкнутой пионерной растительности; 4 – верхняя граница активного пляжа, она же точка «*dense vegetation*»; 5 – точка выклинивания вулканического пепла; 6 – зона выклинивания вулканического пепла.

менном топографическом профиле и маркирует положение границы древней береговой зоны на момент выпадения вулканического пепла. В этом случае, и возраст, и положение границы древней береговой зоны определяются наиболее точно. Вся ширина «зоны выклинивания пепла», то есть расстояние от шурфа, где пепел лежит в почве, до шурфа, где он встречается в последний раз, обычно составляет порядка 40-50 м. (в районе полуострова Камчатский). Ширина зоны выклинивания определяется шириной зоны пионерной растительности на момент выпадения пепла.

Во втором случае слой пепла в ППЧ обрывается резко. Это означает, что тот участок террасы, на котором он плавно заглаблялся, был уничтожен в результате существенного размыва. Отсутствие зоны заглабления пепла - это своего рода геологическое несогласие в строении морской террасы, которое является индикатором размыва (рис. 4).

В результате размыва теряется информация о положении береговой линии на момент выпадения пепла. Можно сказать только, что размыв происходил уже после его выпадения. Следовательно, если нам приходится восстанавливать границу древней береговой зоны по резко выклинивающемуся пеплу, мы точно устанавливаем ее положение по *точке выклинивания* пепла, но возраст — только приблизительно, определяя его интервалом между размытым и перекрывающим его не размытым вулканическим пеплом.

Степень подробности, с которой удается восстановить историю развития морской террасы, определяется частотой выпадения вулканических пеплов. В связи с неравнопромежуточностью тефрохронологической шкалы, для одних временных интервалов восстановленная история оказывается подробнее, чем для других. Как было описано выше, восстановление истории затрудняется и наличием периодов значительного размыва террасы. Однако, некоторые береговые валы с помощью тефрохронологии можно датировать достаточно точно. Это даёт основания для вычисления скоростей тектонических движений.

В случаях, когда на профиле удавалось найти «зону выклинивания пеплов», в которой горизонты пеплов постепенно заглабились и растворились в отложениях пляжа, мы рассчитывали суммарную амплитуду вертикальных движений за время между выпадениями пеплов, как разницу высот *точек выклинивания* пеплов. Для самого молодого участка террас в качестве одной из границ использовалась точка *dense vegetation* на момент наших наблюдений в 2004 г.

В расчетах учитывалась мощность ППЧ, перекрывающего вулканический пепел в настоящее время (табл.). Средняя скорость вертикаль-

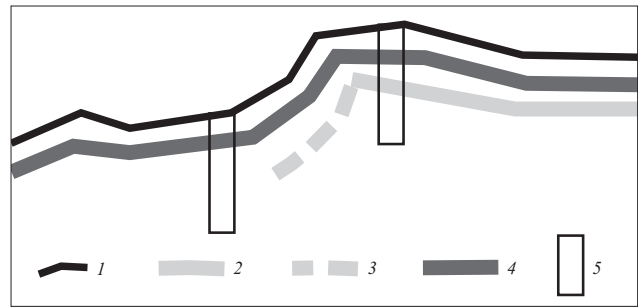


Рис. 4. Фрагмент профиля с реликтовым уступом размыва. Море находится слева. 1 — современная земная поверхность; 2 — горизонт вулканического пепла, выклинивающегося на уступе размыва (3); 4 — горизонт вулканического пепла, маркирующий земную поверхность после окончания размыва и возобновления проградации морской террасы (выдвижения в сторону моря за счет аккумуляции или поднятия); 5 — геологические шурфы, заложенные вдоль топографического профиля. Размыв террасы по времени происходил между выпадением горизонта пепла 2 и горизонта пепла 4.

ных движений на побережье рассчитывалась путём деления полученной амплитуды на время между выпадением вулканических пеплов, или между 2004 г. и временем выпадения пепла. В этих случаях полученные значения скоростей вертикальных движений являются наиболее точными.

Изучая строение морских террас, а также характер залегания вулканических пеплов в местах их выклинивания, мы определяли, размывалась ли терраса или нет в промежутки времени между выпадением вулканических пеплов. В случае значительного размыва террасы (более нескольких десятков метров по горизонтали), в разрезах на профилях отсутствовала зона постепенного заглабления вулканических пеплов. Когда вулканический пепел (пеплы) обрывался резко, нередко молодая часть террасы причленялась к значительно более древней, а в месте причленения наблюдалось несогласие (уступ, либо видимый в рельефе, либо не видимый — погребенный уступ размыва (рис. 4)). Если было очевидно, что имеет место частичный размыв террасы (и, соответственно, перекрывающего ее пепла с мористой стороны), возраст террас не удавалось определить точно. В случае, когда хотя бы одна из границ временного интервала, в пределах которого рассчитывалась скорость тектонических движений, не была определена точно, мы могли рассчитать скорость вертикальных движений лишь приблизительно.

ПОЛУЧЕННЫЕ ДАННЫЕ И ИХ АНАЛИЗ

Всего было описано более 200 геологических шурфов. Наиболее достоверные и представительные данные по скоростям голоценовых вер-

тикальных движений были получены для трех временных промежутков: 250-2004 гг., 250-590 гг., 590-2004 гг. Это обусловлено, прежде всего, тем, что пеплы возраста ~ 590 и ~ 250 гг. н.э. (Ш₁₄₅₀ и КС₁ соответственно), наиболее яркие, хорошо сохранившиеся, уверенно идентифицируются в разрезах ППЧ полуострова Камчатского. Кроме того, эти вулканические пеплы достаточно точно датированы радиоуглеродным методом (¹⁴C). Более древние участки голоценовых морских террас (с возрастом ~ 5 тысяч лет) в исследуемом районе сохранились лишь в бухте Солдатская и, фрагментарно, в районе мыса Африка.

Вулканический пепел извержения влк. Шивелуч 1964 г. при расчете скоростей тектонических движений не использовался. Однако, анализируя характер залегания и выклинивания этого горизонта на верхней границе активного вала, оказалось возможным идентифицировать процессы, происходившие на каждом отдельно взятом профиле за последние 50 лет (проградация, размыв, и т.д.).

В таблице и на рис. 5б представлены результаты наших расчетов средних скоростей тектонических движений по разным профилям для трех временных интервалов. В случаях, когда участок террасы, сформированный в течение одного из выделенных нами временных промежутков, был полностью размыв, скорость движений для данного промежутка не могла быть определена. По нашему мнению, размыв террас может быть связан с отрицательными вертикальными движениями суши. Скорость опускания удалось рассчитать лишь для одного из профилей, где опущенный участок фрагментарно сохранился. Данные по профилям 12, 15, 17с, 17ю, 18с, 18ю, 19ю (положение профилей показано на рис. 5а) в таблицу не вошли, т.к. по ним не удалось рассчитать скорости ни для одного из выделенных нами временных промежутков. На таких профилях участки молодых голоценовых террас (моложе ~ 590 г.н.э.) примыкают к древним террасам плейстоценового возраста,

Скорости вертикальных движений побережья полуострова Камчатский в голоцене.

| № профилей (с Севера на Юг) | Координаты профиля | | Рассчитанная средняя скорость вертикальных движений (м/1000 лет или мм/год) | | |
|-----------------------------|------------------------|-------------------------|--|--------------------|-----------------------|
| | Широта (град. с.ш.) | Долгота (град. в.д.) | 250 г.н.э.-2004 г. | 590 г.н.э.-2004 г. | 250 г.н.э.-590 г.н.э. |
| Северный | 56.45177 | 163.24921 | 1.9 | | |
| Южный | 56.44438 | 163.24833 | 2.2 | | |
| Лагерный | 56.43522 | 163.25758 | 1.6 | | |
| Черные скалы С | 56.41825 | 163.28912 | 0.5 | | |
| Черные скалы Ю | 56.41127 | 163.29349 | 2.3 | 1.4 | 5.7 |
| Рифы | 56.32710 | 163.35305 | | 2.0 | |
| 3/4 | 56.25153 | 163.33766 | 4.6 | | |
| 2 | 56.24913 | 163.33786 | 4.0 | | |
| 1 | 56.24860 | 163.33796 | | 2.5 | |
| 5 | 56.23052 | 163.34330 | 2.2 | | |
| 6 | 56.22231 | 163.34555 | 6.4 | 5.8 | 12.5 |
| 7 | 56.21445 | 163.34630 | 6.2 | 4.1 | 13.2 |
| 181 | 56.20509 | 163.34962 | 5.2 | 4.4 | 12.5 |
| 8 | 56.19693 | 163.35201 | 6.5 | 3.7 | 19.6 |
| 9 | 56.18995 | 163.35911 | 6.6 | 4.5 | 13.6 |
| 14 | 56.18071 | 163.34413 | | 4.5 | |
| 13 | 56.17326 | 163.32295 | | 3.7 | |
| 11 | 56.16215 | 163.29628 | 4.3 | 3.6 | 5.5 |
| 10 | 56.15418 | 163.28801 | 4.6 | | |
| 16 | 56.13075 | 163.17356 | -1.1 | | |
| 18 | 56.09948 | 163.12281 | 1.8 | | |
| 19 | 56.09386 | 163.11398 | 3.7 | | |
| 20 | 56.03191 | 163.05925 | 1.7 | 1.8 | 1.2 |
| 21 | 56.02541 | 163.05508 | 2.9 | 2.7 | 3.8 |
| 22 | 56.01826 | 163.04913 | 3.5 | 3.5 | 3.4 |
| 23 | 56.01828 | 162.96598 | 10.9 | 4.9 | 35.4 |

Примечание. Жирным шрифтом выделены наиболее точные из полученных значений скоростей вертикальных движений. Пустые графы в таблице соответствуют тем случаям, когда скорость движений не могла быть определена.

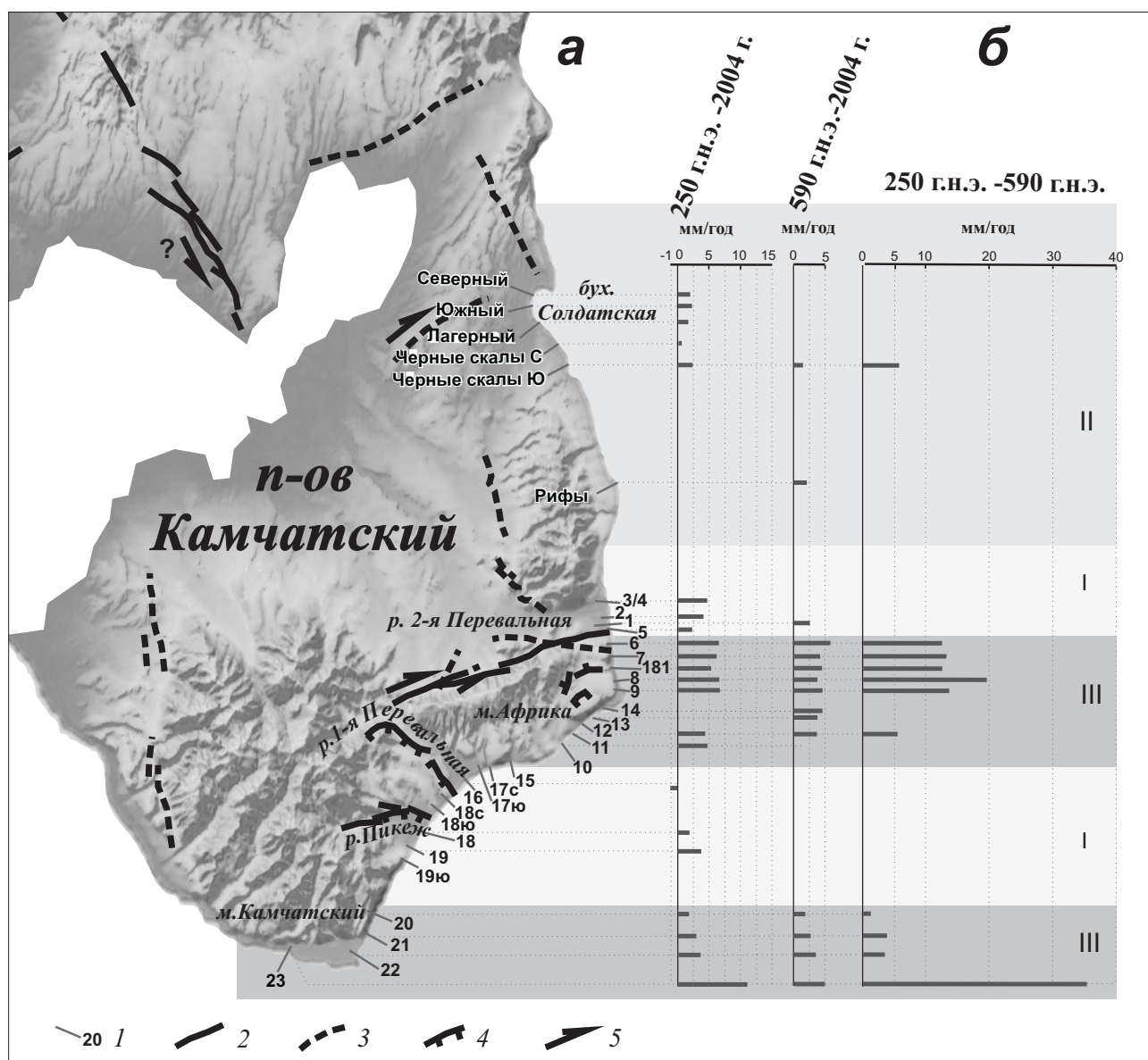


Рис. 5. Схема района работ и фактические данные: *а* – положение гипсометрических профилей на побережье полуострова Камчатский, их номера или названия (1). Черные линии – активные разломы полуострова Камчатский по (Kozhurin, 2007): 2 – достоверные; 3 – предполагаемые; 4 – сбросы, штрихи на относительно опущенном крыле; 5 – направление сдвиговых перемещений; *б* – средняя скорость рассчитанных по голоценовым морским террасам вертикальных движений (мм/год) для трех временных промежутков. Заливкой разной интенсивности и римскими цифрами показаны участки побережья: I – с преобладающим опусканием; II – с преобладающим поднятием при небольших скоростях; III – с высокой скоростью поднятий. Топография Камчатского полуострова отрисована на основе Global digital elevation model (DEM) GTOPO30.

либо, в ряде случаев, морские отложения перекрыты аллювиальными, что не позволило использовать такие профили для расчетов.

Анализируя полевые данные, таблицу и рис. 5б, можно отметить следующие особенности:

1. Средняя скорость тектонических движений на побережье полуострова Камчатский в позднем голоцене сильно варьировала, т.е., в последние примерно две тысячи лет движения на побережье были дифференцированными. Наиболее быстро в указанные периоды воздымались мыс Камчатский (до 10.9 мм/год) и мыс Африка

(до 6.6 мм/год). На других участках побережья средние скорости поднятий в эти же периоды времени были ниже (от 0.5 до 4.6 мм/год), а некоторые участки за последние примерно 2000 лет испытали суммарное опускание.

2. Поднятие на мысах Африка и Камчатский происходило во все проанализированные временные промежутки. Для всех остальных участков обследованного побережья направления движений менялись во времени (рис. 5б).

3. В целом, восточное побережье полуострова можно разделить на 5 участков, различающихся

ся скоростью и направлением вертикальных движений (рис. 5а): мыс Камчатский с высокой скоростью поднятий; побережье между профилями 10 и 20 (включая приустьевые части долин рек Пикеж и 1-я Перевальная) с преобладающим опусканием; мыс Африка и прилегающие к нему участки с высокой скоростью поднятия; участок от р. 2-я Перевальная до мыса Рифы с общим (суммарным) опусканием побережья; мыс Рифы – бухта Солдатская с общим (суммарным) поднятием при небольших средних скоростях.

4. Наиболее быстрые поднятия, а также наибольшие градиенты изменения скорости поднятия вдоль береговой линии имели место на протяжении короткого, около 340 лет, временного интервала между выпадением пеплов КС₁ и Ш₁₄₅₀. Вместе с тем, некоторые участки, в целом (за 2000 лет) медленно поднимающиеся, в этот промежуток времени испытали суммарное опускание.

5. Несмотря на довольно высокие скорости поднятий в позднем голоцене в районе мысов Африка и Камчатский, среднеголоценовые морские террасы, сформированные в промежутке ~ 5-2 тыс. лет назад, здесь практически не сохранились, за исключением небольшого фрагмента на мысе Африка.

Говоря о промежутке 5-2 тыс. лет назад, мы имеем в виду тот факт, что уровень моря стабилизировался около 5-6 тыс. лет назад, и в стабильных тектонических условиях, либо на фоне относительного поднятия суши, на побережьях мира, как правило, представлены голоценовые террасы, сформированные на протяжении примерно последних 5-6 тыс. лет. Вероятнее всего, большой участок побережья полуострова Камчатский в интервале 2-5 тыс. лет назад был уничтожен в результате опускания и размыва. Возможно, это опускание произошло

субсинхронно во всей юго-восточной части полуострова. Лишь в бухте Солдатской, несмотря на невысокие скорости вертикальных поднятий, участок террасы с возрастом 2-5 тыс. лет (древнее вулканического пепла КС₁) сохранился практически везде.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ. СРАВНЕНИЕ С ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Из полученных нами данных, описанных в предыдущем разделе, видно, что наибольшие скорости и градиенты скоростей вертикальных тектонических движений, для всего обследованного участка берега, характерны для наименьшего проанализированного нами временного промежутка в 340 лет.

Из исторических и инструментально зафиксированных данных хорошо известно, что побережья могут испытывать площадные (не разрывные) косейсмические деформации при сильных землетрясениях, происходящих вблизи побережий, либо на суше (Atwater, 1987; Hamilton, Shennan, 2005; Merritts, 1996; Nelson et al., 1996; Okada, 1985; Scholz, 1974; Zong et al., 2003). Вдоль побережья Камчатки нами по геологическим данным также было выявлено несколько косейсмических деформаций, сопровождавших сейсмические события, в том числе и исторические (Пинегина, 2004; Pinegina et al., 2007, 2009).

Побережье полуострова Камчатский во многих местах представляет собой «лестницы» из морских плейстоценовых и голоценовых террас. «Ступени» голоценовых террас иногда разделены уступами высотой от 0.5 до нескольких метров, иногда уступы перекрыты отложениями либо сnivelированы (рис. 6). Само наличие таких лестниц указывает на резкие (импульсные) из-

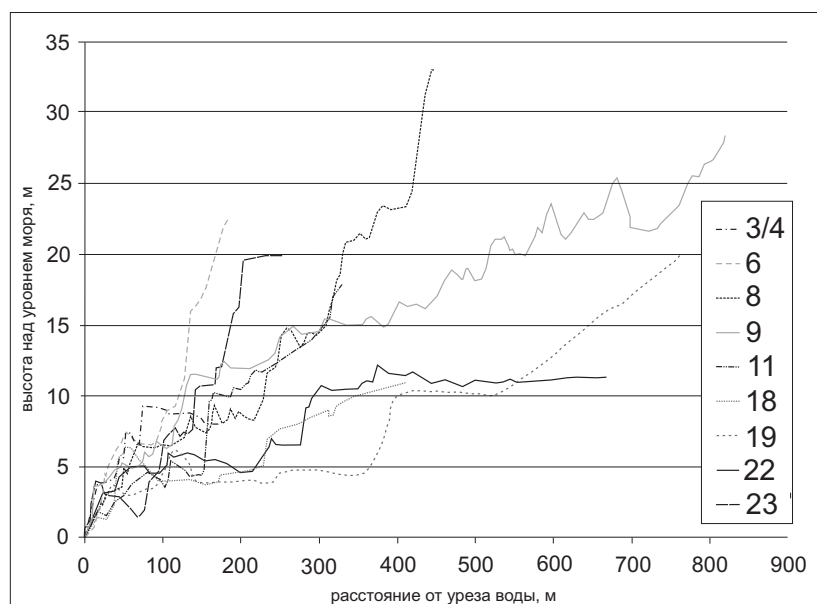


Рис. 6. Гипсометрические профили, измеренные в разных частях Камчатского полуострова. Положение профилей показано на рис. 5а.

менения относительного уровня моря в голоцене (Carver et al., 1994). Кроме того, анализируя береговые гипсометрические профили, измеренные в разных частях полуострова, можно увидеть не только лестницы террас, но и места перегибов – точки, в которых террасы изменяют наклон в сторону суши, либо в сторону моря. Такие перегибы также свидетельствуют о смене направления в изменении относительного уровня моря. Таким образом, сама морфология аккумулятивных голоценовых морских террас полуострова Камчатский указывает на неоднократные крупноамплитудные изменения относительного уровня моря за последние несколько тысяч лет.

Выяснив, что для побережья полуострова характерны дифференцированные и неоднородные во времени вертикальные движения, мы предположили, что, по крайней мере, часть этих движений может обуславливаться косейсмическими деформациями (как было показано для полуострова Мендосино (США), находящегося в сходной геодинамической обстановке (Carver et al., 1994; Merritts, 1996)). Однако в районе полуострова Камчатский, расположенного в условиях со сложной геодинамической обстановкой, характер вероятных деформаций, происходящих в результате землетрясений и в межсейсмический интервал, не однозначен и трудно поддается моделированию. Для того чтобы понять, что происходит на побережье полуострова при сильных «местных» землетрясениях, мы провели анализ имеющихся инструментальных сейсмологических и геодезических данных. Кроме того, так как полученные нами результаты характеризуют процессы деформации полуострова, пусть и в его узкой прибрежной зоне, представляется целесообразным сопоставить их с независимыми данными о голоценовой тектонике. Для этого мы проанализировали распространение активных разломов полуострова, обратив особое внимание на те из них, которые находятся в его прибрежной зоне.

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Камчатская и Алеутская сейсмофокальные зоны резко отличаются по характеру землетрясений. В соответствии с движением Тихоокеанской плиты, в Камчатской зоне субдукции фиксируются взбросовые и надвиговые подвижки, а на западном (Командорском) сегменте Алеутской зоны преобладают правосторонние сдвиги (Global Centroid...). Правосторонние сдвиги наблюдаются на обоих бортах Командорского блока, что отражает его автономное, более медленное, по сравнению с Тихим океаном,

скольжение вдоль трансформной границы на северо-запад (рис. 7). Сейсмичность области сочленения – района полуострова Камчатский – не может быть отнесена ни к одной из двух примыкающих зон, и имеет определенные отличия от каждой из них.

В районе полуострова Камчатский регистрируются в основном мелкофокусные землетрясения в слое глубиной до 50 км, в то время как непосредственно юго-западнее в Камчатском заливе и дальше вдоль простирающегося Камчатского желоба, на расстоянии около 100 км от него, главное поле гипоцентров субдукционных землетрясений опущено на 20–30 км ниже. Часть мелкофокусных и отдельные промежуточные землетрясения глубиной до 120 км в районе полуострова Камчатский, как и восточнее, под Командорскими о-вами, по-видимому, связаны с горизонтальным движением на северо-запад наклоненного на северо-восток Тихоокеанского «слаба», погружившегося под Алеутскую дугу значительно восточнее. Судя по механизму, к подобному типу может относиться сильнейшее землетрясение 15 декабря 1971 г. $M_s = 7.8$ (рис. 7) и его афтершоки. Какие либо следы зоны субдукции, падающей на северо-запад, в распределении сейсмичности района полуострова Камчатский отсутствуют.

В Камчатском проливе и юго-восточнее землетрясения концентрируются вдоль трансформных разломов Беринга, Пикеж и Стеллера (Селиверстов, 1998; Gorbatov et al., 1997), ограничивающих с севера и юга Командорский блок. Западнее, при переходе к шельфу полуострова Камчатский, эта закономерность нарушается, и эпицентры землетрясений занимают всю фронтальную часть Командорского блока между ограничивающими его разломами, а также южную часть полуострова.

Среди механизмов землетрясений района полуострова Камчатский (рис. 7) преобладают взбросы с субгоризонтальной осью сжатия, ориентированной СЗ-ЮВ (Global Centroid...). Это относится и к среднему тензору, построенному по всем решениям в этой области (исключая землетрясение 1971 г.). Как следствие, приближенно можно считать что, в направлении СЗ-ЮВ проходит и главная ось тектонического сжатия района.

Таким образом, в среднем механизмы землетрясений области сочленения дуг близки к камчатским, но существенно отличаются от командорских. Однако, несмотря на небольшой размер имеющейся выборки (7 землетрясений), для этого района характерно большее разнообразие тензоров, чем для прилегающих зон. Так, в очаговой подвижке сильного землетрясения вблизи мыса Африка 28 декабря 1984 г. с $M_w = 6.7$,

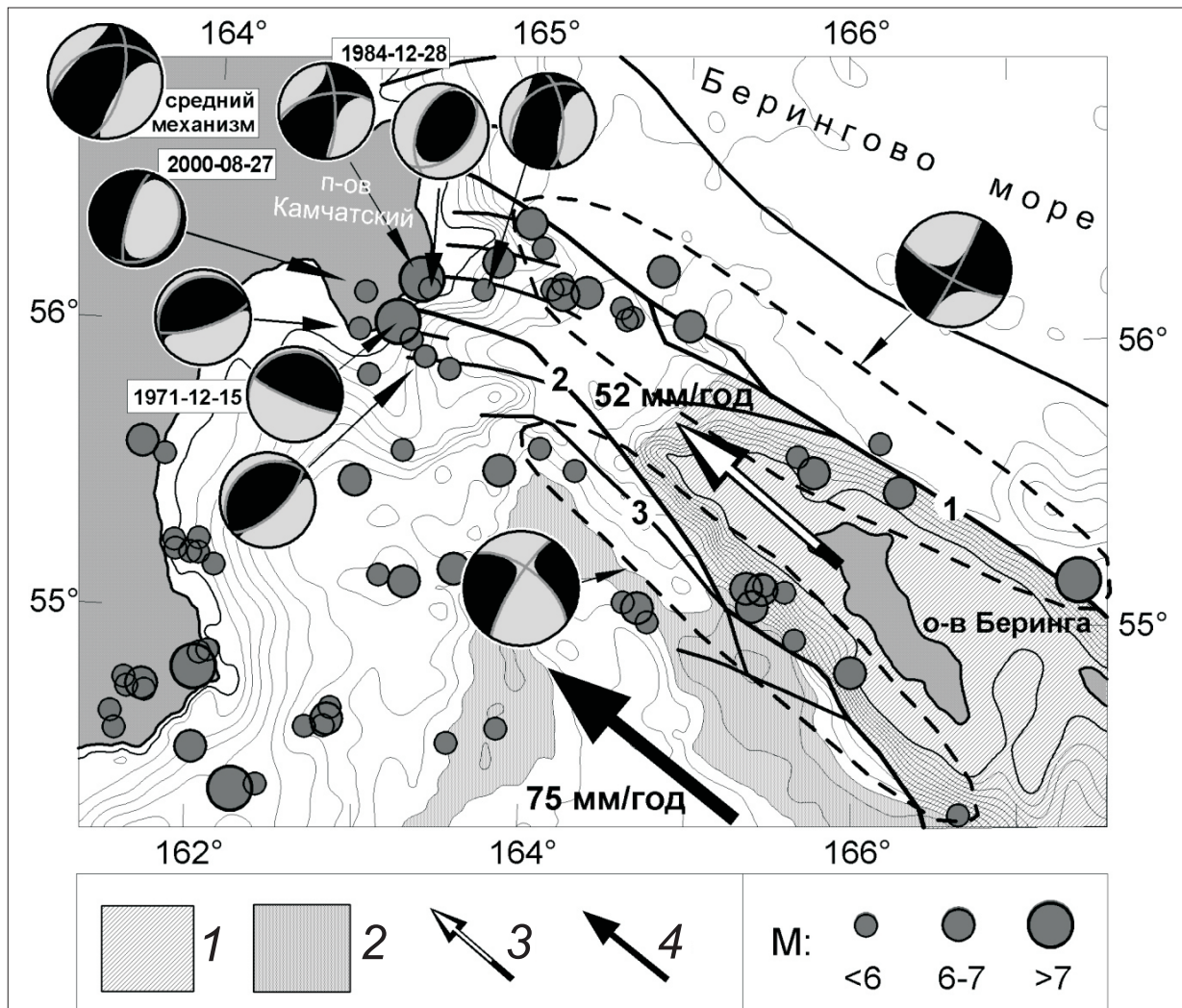


Рис. 7. Сейсмичность Курило-Камчатско-Алеутского сочленения. Приведены эпицентры с землетрясениями с $M \geq 5.5$ (в районе мыса Камчатский добавлено три землетрясения с $M=5.1-5.3$, имеющие надежные определения механизмов) (USGS). Тензоры сейсмического момента приведены по (Global Centroid...). В левом верхнем углу рисунка – средний механизм для полуострова Камчатский. Для северной и южной границ Командорского блока приведены средние механизмы землетрясений, вычисленные по областям, окруженным пунктирными линиями. 1 – Командорский блок; 2 – глубоководные желоба; 3 – вектор движения Командорского блока; 4 – вектор движения Тихоокеанской плиты. Векторы посчитаны по данным GPS относительно среднего вращения пунктов Западной Камчатки (Global Strain Rate Map; Титков и др., 2009). Разломы, ограничивающие Командорский блок показаны согласно (Селиверстов, 1998, 2009). Цифрами обозначены разломы: 1– Беринга, 2– Пикеж, 3– Стеллера.

судя по механизму, преобладала правосторонняя компонента. Возможно, это землетрясение произошло на одном из замыканий разлома Беринга. Другим примером значительного отклонения от среднего по району механизма, является землетрясение 27 августа 2000 г., $M_w = 5.1$, эпицентр которого определен на суше в южной части полуострова Камчатский. Механизм этого землетрясения, сброс с субгоризонтальной осью растяжения ориентированной ЗСЗ-ВЮВ, почти противоположен среднему.

Главные характеристики сейсмичности района полуострова Камчатский – распределение землетрясений в 50-км приповерхностном слое и СЗ-ЮВ ориентация оси тектонического сжа-

тия – подтверждают представление о сближении Командорского блока с Камчаткой. Параллельно, разнообразие наблюдаемых механизмов землетрясений указывает на современную раздробленность территории и значительные и разнонаправленные относительные перемещения, в том числе косейсмические, составляющих ее блоков.

В общем, можно думать, что неоднородность механизмов сейсмических событий определяется включением в них как событий взаимодействия блока полуострова, как целого, с Командорским блоком, так и событий, связанных с деформацией самого полуострова. Как следствие, естественно предполагать, что описанные выше разнонаправленные движения побережья

полуострова, в значительной степени могут быть следствием сейсмических событий.

СОВРЕМЕННЫЕ ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ НА П-ОВЕ КАМЧАТСКИЙ ПО ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

В 1970 годы на Камчатке начались работы по созданию мультисистемного геодезического мониторинга современных движений земной коры (МГМСДЗК) (Кириенко, Золотарская, 1989). За время инструментальных наблюдений на Камчатке накопилось несколько случаев регистрации горизонтальных или вертикальных движений земной поверхности, связанных с землетрясениями. В районе Камчатского полуострова такие движения были зафиксированы при двух землетрясениях – 15.12.1971 г. с $M_s = 7.8$, и 28.12.1984 г. с $M_w = 6.7$. Параметры движений земной поверхности описываются ниже. Здесь же только подчеркнем, что знание амплитуд и закономерностей распределения в пространстве инструментально регистрируемых движений (косейсмических, постсейсмических и интерсейсмических) может помочь при интерпретации древних деформаций, выявленных геолого-геоморфологическими методами.

Землетрясение 1971 г.

Инструментальный эпицентр землетрясения располагался примерно в 100-150 км к юго-востоку от полуострова Камчатский. Механизм землетрясения – косо́й взброс (Гусев, 1975; Cormier, 1975; Okal, Talandier, 1986). Рассчитанная по сейсмологическим данным величина подвижки по плоскости разрыва составила около 8 м. Повторным нивелированием на побережье полуострова были обнаружены деформации земной поверхности, связанные с этим землетрясением. Относительные максимальные изменения отметок реперов, расположенных на побережье, достигли 80 мм (Левин и др., 2006).

В 1972-1973 гг. повторные измерения относительных превышений вдоль нивелирных линий мыс Камчатский - Усть-Камчатск (вдоль южного берега полуострова) и р. Пикеж - залив Озерной (восточное и северное побережья) показали, что земная поверхность за время после землетрясения наклонилась на северо-запад (Кириенко, Золотарская, 1989). Для палеосейсмологических интерпретаций важно, что землетрясение, произошедшее в акватории Камчатского залива, сопровождалось вертикальными косейсмическими деформациями на суше.

Землетрясение 1984 г.

Механизм мелкофокусного землетрясения, произошедшего 28.12.1984 г. в районе мыса Африка, был определен одними авторами как сдвиг с небольшой взбросовой компонентой

(Федотов и др., 1985), а по другим данным (СМТ) как взбросо-сдвиг. В районе мыса Африка относительные вертикальные изменения отметок геодезических реперов достигали 80 мм (Левин и др., 2002, 2006). С нашей точки зрения, представляет интерес то, что при значительной (либо преобладающей) сдвиговой компоненте, на побережье были зафиксированы значительные вертикальные деформации, сопоставимые по амплитуде с 1971 г.

В целом, анализ имеющихся сейсмологических и геодезических данных показывает, что полуостров Камчатский развивается в условиях преобладающего сжатия, ориентированного в СЗ-ЮВ направлении, при этом вертикальные движения в его пределах по знаку неоднородны и дифференцированы в пространстве и во времени (рис. 8).

Вышесказанное позволяет предположить, что выявленные нами резко дифференцированные вертикальные деформации побережья полуострова Камчатский можно интерпретировать как суммарный результат косейсмических движений за последние примерно 2000 лет.

Судя по более высоким скоростям движений, полученным нами для самого короткого из проанализированных промежутков времени (между 250 и 590 гг. н.э.), в окрестностях полуострова Камчатский могли произойти сильные землетрясения с сопутствующими деформациями побережья, гораздо более значительными, чем в 1971 г. Говоря о вероятности именно нескольких событий, мы приняли во внимание тот факт, что, если даже все вертикальные косейсмические деформации считать остаточными, то за 340 лет мыс Африка поднялся более чем на 6.5 м, а мыс Камчатский – почти на 12 м. На наш взгляд, вероятность того, что такие крупноамплитудные поднятия произошли за одно событие, намного меньше, чем вероятность нескольких сближенных по времени событий. Иными словами, промежуток в 340 лет является достаточно продолжительным, чтобы включить в себя несколько крупных сейсмических событий, и достаточно коротким, чтобы деформации от многих сейсмических событий, постсейсмические и интерсейсмические движения наложались и «осреднили» эффект от нескольких сильных землетрясений.

Необходимо отметить, что средние скорости вертикальных движений, полученные по инструментальным данным (от долей мм/год до 90 мм/год), очень хорошо согласуются со средними скоростями, полученными по нашим данным (от долей мм до 35 мм/год). Такая согласованность подтверждает правдоподобность наших подсчетов с помощью впервые предложенной и описанной выше методики.

В настоящее время у нас нет однозначного ответа на вопрос, с чем может быть связано крупноамплитудное опускание побережья Камчатского полуострова в промежутке 2-5 тыс. лет назад. Возможно, оно было следствием неординарного сейсмического события с периодом повторяемости более чем 2 тыс. лет. Вероятно, такие неординарные события могут объяснить тот факт, что средние скорости поднятия Камчатского полуострова, полученные по плейстоценовым морским террасам (125000 лет и древнее) (Pedoja et al., 2006), в десятки раз ниже скоростей, полученных нами по голоценовым террасам.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ С АКТИВНЫМИ РАЗЛОМАМИ КАМЧАТСКОГО ПОЛУОСТРОВА

В целом, распределение активных разломов на полуострове Камчатский, включая его юго-восточную часть, известно (Kozhurin, 2004, 2007). Среди них интерес, с точки зрения деформаций прибрежной зоны, представляют те, которые выходят на побережье (рис. 5а):

1. Разлом восток-северо-восточного простирания между верховьем р. 1-я Перевальная и устьем р. 2-я Перевальная. Весьма вероятно, что этот разлом продолжается и в Камчатском

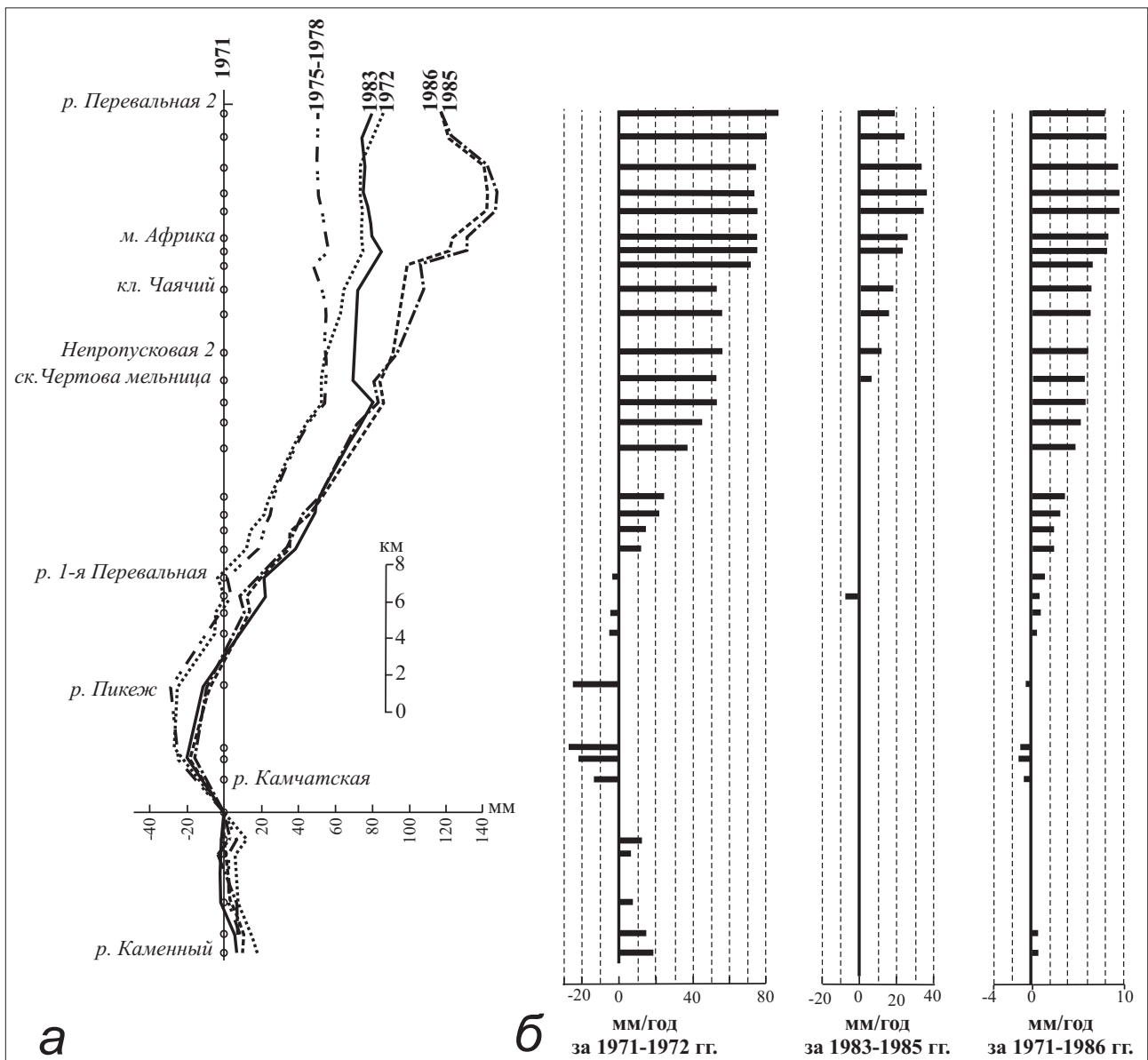


Рис. 8. Вертикальные смещения на Усть-Камчатском полигоне по (Кириенко, Золотарская, 1989): *а* – графики вертикальных смещений реперов на Усть-Камчатском геодинатическом полигоне (ГДП) за период 1971-1986 гг. В качестве начального репера (с нулевыми деформациями) на графике выбран репер на мысе Камчатский. Ошибка определения разностей отметок реперов между всеми сравниваемыми годами измерений в любом месте нивелирного профиля не превосходит ± 8 мм. *б* – среднегодовые скорости (мм/год) вертикальных движений Усть-Камчатского ГДП, рассчитанные для временных интервалов: 1971-1972 гг.; 1983-1985 гг.; 1971-1986 гг.

проливе. По кинематике это правый сдвиг с незначительной вертикальной компонентой (относительно приподнято южное крыло). Рассчитанная средняя скорость горизонтальных движений по разлому составляет 4.1-4.8 мм/год, возможный период повторяемости подвижек по разлому - около 500 лет.

2. Два коротких разлома северо-западного и запад-северо-западного простирания со сбросовой кинематикой в долине р. 1-я Перевальная и в долине р. Пикеж. Эти разломы также выходят на побережье и могут продолжаться и под водой. Разломы интерпретированы как сбросы с относительно опущенными южными крыльями. В движениях по разлому в долине р. 1-я Перевальная, возможно, присутствует очень незначительная (подчиненная) левосдвиговая компонента.

3. Предположительно активный разлом северо-северо-западного простирания с приподнятым восточным крылом в северной части бух. Солдатская.

Сопоставляя активные разломы, выходящие на побережье, с участками побережья с разной скоростью движений, можно видеть, что разлом ВСВ простирания, протянувшийся от верховья р. 1-я Перевальная к устью р. 2-я Перевальная, очень хорошо совпадает с северной границей быстро воздымающегося участка мыса Африка. Два коротких разлома СЗ и ЗСЗ простирания со сбросовой кинематикой в долине р. 1-я Перевальная и в долине р. Пикеж приурочены к опускающемуся участку побережья, отделяющему друг от друга воздымающиеся мысы Африка и Камчатский. Вероятно, такое «совпадение» границ участков побережья с разными параметрами вертикальных движений и линий активных разломов не случайно. Можно думать, что какая-то часть косейсмических деформаций в последние 2000 лет могла реализовываться (и, скорее всего, реализовывалась) и в подвижках по данным разломам. Таким образом, побережье полуострова Камчатский испытывало влияние не только неразрывных «площадных» косейсмических деформаций, но и разрывных.

ВЫВОДЫ

1. Вертикальные движения побережья полуострова Камчатский в голоцене носили дифференцированный характер. Средние скорости поднятий за последние ~ 2000 лет для разных участков побережья варьировали от -1.1 до +10.9 мм/год. Наибольшие пространственные градиенты изменения скорости характерны для самого короткого из проанализированных нами временных промежутков, продолжительностью примерно 340 лет.

2. Значения средних скоростей (от долей мм

до нескольких десятков мм/год) и направления вертикальных движений в разные промежутки времени для одних и тех же участков побережья также варьировали. Наиболее интенсивные вертикальные движения в голоцене происходили в районе мыса Африка и мыса Камчатский.

3. Анализ полученных данных, их сравнение с инструментальными сейсмологическими и геодезическими данными позволяют предполагать, что выявленные при изучении морских террас деформации побережья в значительной степени являются косейсмическими. Очаги землетрясений, связанных с косейсмическими деформациями, по-видимому, могут располагаться как на суше, так и под водой (на подводных продолжениях разломов суши, либо на разломах, не выходящих на сушу).

4. В целом, участки с суммарными положительными вертикальными движениями в голоцене приурочены к побережьям, окаймляющим поднятия мысов Камчатский и Африка. Это означает, что голоценовые движения наследуют движения за более продолжительные интервалы времени (плейстоценовые) и являются реализацией общей более долговременной тенденции.

5. Выявлена уверенная пространственная корреляция границ участков побережья, и самих участков с разными параметрами движений, с линиями и распространением активных разломов (линия — для сдвига между реками 1-я и 2-я Перевальная, распространение — для сбросов в долине р. Пикеж и 1-й Перевальной). Характер этой связи до конца не ясен, но можно утверждать, что и вертикальные движения побережья, и распределение и кинематика разломов — следствие некоторого общего процесса деформирования блока полуострова Камчатский в голоцене. Причины деформирования (коллизонное взаимодействие Алеутской и Камчатской островных дуг, или же неравномерный в плане почти подвиг Алеут под полуостров Камчатский с дифференцированным вращением последнего (Kozhurin 2007)), находится за рамками данной статьи и не рассматривается.

Работа проводилась при финансовой поддержке грантов РФФИ № 06-05-64025, 09-05-00125.

Список литературы

- Гусев А.А. Землетрясения в СССР в 1971 г. М.: Наука, 1975. С. 172-183.
 Каплин П.А., Леонтьев О.К., Лукьянова С.А., Никифоров Л.Г. Берега. М.: Мысль, 1991. 479 с.
 Кириенко А.П., Золотарская С.Б. Некоторые закономерности деформаций земной поверхности Восточной Камчатки в период 1966-1983 гг. // Вулканология и сейсмология. 1989. № 2. С. 80-93.

- Ландер А.В., Букчин Б.Г., Дроздин Д.В., Кирюшин А.В.* Тектоническая позиция и очаговые параметры Хаилинского (Корякского) землетрясения 8 марта 1991 года: существует ли плита Берингия? // Вычислительная сейсмология выпуск № 26. «Геодинамика и прогноз землетрясений». М.: Наука, 1994. С. 104-122.
- Левин В.Е., Гордеев Е.И., Бахтияров В.Ф., Касыхара М.* Предварительные результаты GPS мониторинга на Камчатке и Командорских островах // Вулканология и сейсмология. 2002. № 1. С. 3-12.
- Левин В.Е., Ландер А.В., Титков Н.Н.* Командорская микроплита по сейсмологическим и GPS данным // Всероссийское совещание «Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия». Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2009. Т. 2. С. 34-37.
- Левин В.Е., Магуськин М.А., Бахтияров В.Ф. и др.* Мультисистемный геодезический мониторинг современных движений земной коры на Камчатке и Командорских островах // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 54-68.
- Певзнер М.М., Пономарева В.В., Мелекесцев И.В.* Черный Яр - реперный разрез голоценовых маркирующих пеплов северо-восточного побережья Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1997. № 4. С. 3-18.
- Пинегина Т.К.* Голоценовая сеймотектоника Берингоморского побережья Камчатки по результатам палеосейсмологических исследований (предварительное сообщение) // Материалы ежегодной конференции посвященной Дню Вулканолога. Петропавловск-Камчатский: «Наука – для Камчатки», 2004. С. 68-75.
- Селиванов А.О.* Изменение уровня мирового океана в плейстоцене – голоцене и развитие морских берегов. М.: Ин-т водных проблем РАН, 1996. 268 с.
- Селиверстов Н.И.* Строение дна прикамчатских акваторий и геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. М.: Научный мир, 1998. 164 с.
- Селиверстов Н.И.* Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: Издательство КамГУ им. Витуса Беринга, 2009. 191 с.
- Титков Н.Н., Ландер А.В., Левин В.Е.* Современные движения Камчатского региона по GNNS данным // Тезисы докладов на Второй региональной научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2009. С. 45.
- Федотов С.А., Гусев А.А., Чернышева Г.В., Шумилина Л.С.* Сейсмофокальная зона Камчатки (геометрия, размещение очагов и связь с вулканизмом) // Вулканология и сейсмология. 1985. № 4. С. 91-107.
- Шаниро М.Н., Ландер А.В.* Формирование современной зоны субдукции на Камчатке // Очерки геофизических исследований: К 75-летию Объединенного института физики Земли им. О.Ю. Шмидта. М.: ОИФЗ РАН, 2003. С. 338-344.
- Apel E.V., Burgmann R., Steblov G. et al.* Independent active microplate tectonics of northeast Asia from GPS velocities and block modeling // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. № 11. L11303. doi:10.1029/2006GL026077.
- Atwater B.F.* Evidence for great Holocene earthquakes along the outer coast of Washington state // Science. 1987. V. 236. P. 942-944.
- Bourgeois J., Pinegina T.K., Ponomareva V.V., Zaretskaia N.E.* Holocene tsunamis in the southwestern Bering Sea, Russian Far East and their tectonic implications // The Geol. Soc. Amer. Bull. 2006. V. 11 (3/4). P. 449-463.
- Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D.* The ages of calderas, large explosive craters and active volcanoes in the Kuril-Kamchatka region, Russia // Bull. Volcanol. 1995. V. 57/6. P. 383-402.
- Braitseva O.A., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D. et al.* Holocene key-marker tephra layers in Kamchatka, Russia // Quaternary Res. 1997. V. 47. P. 125-139.
- Carver G., Jayko A.S., Valentine D.W., Li W.H.* Coastal uplift associated with the 1992 Cape Mendocino earthquake, northern California // Geology. 1994. V. 22. P. 195-198.
- Cormier V.F.* Tectonics near the junction of the Aleutian and Kuril-Kamchatka arcs and a mechanism for middle Tertiary magmatism in the Kamchatka basin // Geol. Soc. Am. Bull. 1975. V. 86. P. 443-453.
- Douglas B.C., Kearney M.S., Leatherman S.P.* Sea Level Rise: History and Consequences. San Diego: Academic Press, 2001. 232 p.
- Freitag R., Gaedicke C., Baranov B., Tsukanov N.* Collisional processes at the junction of the Aleutian-Kamchatka arcs: new evidence from fission track analysis and field observations // Terra Nova. 2001. V. 13. P. 433-442.
- Gaedicke C., Baranov B., Seliverstov N. et al.* Structure of an active arc-continent collision area: the Aleutian-Kamchatka junction // Tectonophysics. 2000. V. 325. P. 63-85.
- Geist E.L., Scholl D.W.* Large-scale deformation related to the collision of the Aleutian Arc with Kamchatka // Tectonics. 1994. V. 13. P. 538-560.
- Global Centroid Moment Tensor Catalog (<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>).

- Global digital elevation model (DEM) GTOPO30 (<http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/>).
- Global Strain Rate Map Project (<http://gsrm.unavco.org/intro/>).
- Gorbatov A., Kostoglodov V., Suares G., Gordeev E.* Seismicity and structure of the Kamchatka subduction zone // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. P. 17883-17898
- Hamilton S.L., Shennan I.* Late Holocene great earthquakes and relative sea-level change at Kenai, southern Alaska // *J. of Quaternary Science.* 2005. V. 20. P. 95-111.
- Kozhurin A.I.* Active faulting at the Eurasian, North American and Pacific plates junction // *Tectonophysics.* 2004. V. 380. P. 273-285.
- Kozhurin A.I.* Active Faulting in the Kamchatsky Peninsula, Kamchatka-Aleutian Junction. // *American Geophysical Union Geophysical Monograph Series «Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region».* Eds: Eichelberger J., Gordeev E., Kasahara M. et al. 2007. V. 172. P. 263-282.
- Kravchunovskaya E., Pinegina T., Bourgeois J.* Active-Margin Coastal Morphology as a Reflection of Holocene Seismotectonic Evolution: An Example From Eastern Kamchatka, Southwestern Bering Sea // Abstract H41C-0315. *Eos Trans. AGU. Fall Meet. Suppl.* 2004. V. 85(47).
- Lander A.V., Shapiro M.N.* The Origen of the Modern Kamchatka Subduction Zone // *American Geophysical Union Geophysical Monograph Series «Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region».* Eds: Eichelberger J., Gordeev E., Kasahara M. et al. 2007. V. 172. P. 56-64.
- Mackey K.G., Fujita K., Gunbina L. et al.* Seismicity of the Bering Strait region: evidence for a Bering block // *Geology.* 1997. V. 25. P. 979-982.
- Martin M.E., Bourgeois J., Pinegina T., Kravchunovskaya E.* Geomorphology of Beach Ridges and Holocene Terraces on Kamchatka: A Complex Interplay of Tectonics, Volcanism and Coastal Processes // Abstract H51C-1145. *Eos Trans. AGU. Fall Meet. Suppl.* 2004. V. 85(47).
- Merritts D.J.* The Mendocino triple junction: Active faults, episodic coastal emergence, and rapid uplift // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 6051-6070.
- Nelson A.R., Shennan I., Long A.J.* Identifying coseismic subsidence in tidal-wetland stratigraphic sequences at the Cascadia subduction zone of western North America // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 6115-6135.
- Okada Y.* Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // *Bull. Seis. Soc. Am.* 1985. V. 75(4). P. 1135-1154.
- Okal E.A., Talandier J.* T-wave duration, magnitudes and seismic moment of an earthquake-application to tsunami warning // *J. Phys. Earth.* 1986. V. 34. P. 19-42.
- Pedoja K., Bourgeois J., Pinegina T., Higman B.* Does Kamchatka belong to North America? An extruding Okhotsk block suggested by coastal neotectonics of the Ozernoi Peninsula, Kamchatka, Russia // *Geology.* 2006. V. 34(5). P. 353-356.
- Pinegina T., Bourgeois J.* Reconstruction of Holocene Seismic Events Along Kamchatka's Pacific Coast // Abstract T13C-1381. *Eos Trans. AGU. Fall Meet. Suppl.* 2004. V. 85(47).
- Pinegina T., Bourgeois J., Bazanova L. et al.* Millennial-scale record of Holocene tsunamis on the Kronotskiy Bay coast, Kamchatka, Russia // *Quaternary Research.* 2003. V. 59. P. 36-47.
- Pinegina T.K., Kravchunovskaya E.A., Ponomareva V.V. et al.* Ground-penetrating radar for detection of geological evidences of intraplate and subduction-type earthquakes in Kamchatka, Russia // Abstract N: AVH2-A-00125, poster P0031. 2nd Alexander von Humboldt International Conference on the Role of Geophysics in Natural Disaster Prevention, Lima, Peru. 2007.
- Pinegina T., Bourgeois J.* Strong subduction-zone earthquakes and tsunamis along Southern Kamchatka and the North Kuril Islands during the Late Holocene // Abstract on 6th Biennial Workshop on Subduction Processes emphasizing the Kurile - Kamchatka - Aleutian Arcs. Fairbanks, Alaska. 2009. P. 205-206.
- Ponomareva V.V., Kyle P.R., Pevzner M.M. et al.* Holocene eruptive history of Shiveluch volcano. Kamchatka Peninsula // *American Geophysical Union Geophysical Monograph Series «Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region».* Eds: Eichelberger J., Gordeev E., Kasahara M. et al. 2007. V. 172. P. 263-282.
- Scholz C.H.* Post-Earthquake Dilatancy Recovery // *Geology.* 1974. V. 2. P. 551-554.
- USGS National Earthquake Information Centre (<http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic.html>).
- Watson F.F., Fujita K.* Tectonic evolution of Kamchatka and the Sea of Okhotsk and implications for the Pacific Basin // *Tectonostratigraphic terranes of the Circum-Pacific Region: Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Earth Science Series.* Editor Howell D.G. 1985. V. 1. P. 333-348.
- Zonenshain L.P., Kuzmin M.L., Natapov L.N.* Geology of the USSR: A Plate-Tectonic Synthesis // B.M. PAGE (Editor), *Geodynamics Series*, 21. American Geophysical Union, Washington, D.C. 1990. 242 p.
- Zong Y., Shennan I., Combellick R.A. et al.* Microfossil evidence for land movements associated with the AD 1964 Alaska earthquake // *Holocene.* 2003. V. 13. P. 7-20.

**HOLOCENE VERTICAL MOVEMENT OF KAMCHATSKY PENINSULA COAST
(КАМЧАТКА) BASED ON STUDIES OF MARINE TERRACES**

**Т.К. Pinegina¹, Е.А. Kravchunovskaya¹, А.В. Lander²,
А.И. Kozhurin³, J. Bourgeois⁴, Е.М. Martin⁴**

¹*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006*

²*International Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics RAS, Moscow, 117997*

³*Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017*

⁴*University of Washington, USA, WA 98195-1310*

The article provides new data on rates and direction of vertical movement of the coast of Kamchatsky Peninsula collected from geological and geomorphologic studies of the Holocene marine aggradational terraces. For the first time we suggest an innovative method for reconstruction of ancient shorelines and estimation of parameters of vertical tectonic movements (for time intervals ranging from several hundreds to several thousands years). The authors revealed that tectonic movements of the coast of Kamchatsky Peninsula during the Holocene were very irregular and resulted in the reversal point of direction of vertical movements for the same part of the coast. Average vertical movement rates (range from -1.1 to +10.9 mm/yr) for last ~2000 years almost coincide with instrumentally registered vertical movement rates for the period of few decades. The article shows that tectonic movements along the coast of Kamchatsky Peninsula are sharply differentiated, and certain correlation is revealed between areas with different parameters of movements and distribution of known active faults. The article demonstrates that average vertical movements rates were the highest for the shortest observed time period, which is ~340 years long. It is concluded that Holocene vertical movements of the peninsula were most likely of coseismic nature.

Keywords: Holocene marine aggradational terraces, rates and directions of vertical movements.