

УДК 551.24

КОСЕЙСМИЧЕСКИЕ И МЕДЛЕННЫЕ ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ ОСТРОВНОЙ ДУГИ ПО ДАННЫМ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА (ДАЛЬНИЙ ВОСТОК, РОССИЯ)

© 2023 г. Т. К. Пинегина¹, А. И. Кожурин^{1, 2, *}

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, д. 9, бульвар Пийпа, 683023 Петропавловск-Камчатский, Камчатский край, Россия

²Геологический институт РАН, д. 7, Пыжевский пер., 119017 Москва, Россия

*e-mail: anivko@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.08.2023 г.

После доработки 05.10.2023 г.

Принята к публикации 16.10.2023 г.

Изучено геологическое строение позднеголоценовой аккумулятивной морской террасы на побережье Камчатского залива (п-ов Камчатка). Полученные данные о возрасте слагающих террасу береговых валов и их относительного высотного положения позволили выявить два типа вертикальных движений побережья – косейсмические (периодические быстрые) и медленные однонаправленные поднятия и опускания. Крупноамплитудные, до 1–2 м, вертикальные косейсмические движения происходят раз в ~1200–1300 лет, средняя скорость медленных движений составляет от долей миллиметра до ~2 мм в год. Косейсмические движения представляют релаксацию упругих деформаций, накопленных в интерсейсмический интервал сейсмического цикла, не превышают их и не накапливаются. Медленные движения задают общий тренд вертикальных деформаций восточного побережья п-ова Камчатка. Предположено, что опускающиеся центральные части восточных заливов п-ова Камчатка (Авачинского, Кроноцкого и Камчатского) и понижения между восточными полуостровами (Шипунским и Кроноцким) и основным массивом п-ова Камчатка образуют ближайшую к глубоководному желобу зону растяжения островной дуги, вызванной миграцией погруженной части Тихоокеанской плиты в сторону Тихого океана. Под восточными Шипунским и Кроноцким полуостровами эта зона растяжения сменяется зоной поперечного сжатия земной коры Камчатского сегмента Курило–Камчатской островной дуги.

Ключевые слова: островная дуга, субдукция, косейсмические и интерсейсмические деформации, длиннопериодные вертикальные движения, п-ов Камчатка, Камчатский залив, п-ов Кроноцкий, п-ов Шипунский

DOI: 10.31857/S0016853X23060061, **EDN:** GTEODZ

ВВЕДЕНИЕ

Деформация земной коры Центральной Камчатки определяется растяжением, вызываемым отступанием погруженной части Тихоокеанской океанической плиты от островной дуги в сторону океана [20], при этом сильные субдукционные землетрясения имеют типичный для них надвиговый механизм.

Одним из эффектов сильных субдукционных землетрясений (периодических движений по плоскости контакта между островной дугой и океанической плитой) являются косейсмические вертикальные движения (отрицательные или положительные) приближенной к океану части островной дуги, которые выявлены, например, при землетрясениях:

– Чилийское (1960 г., $M_w = 9.5$);

– Аляскинское (1964 г., $M_w = 9.2$);

– Индонезийские (2004 г., $M_w = 9.5$, 2005 г. с $M_w = 8.6$);

– Тохоку (2011 г., $M_w = 9.1$, Япония).

Установлено, что расположенная ближе к глубоководному желобу часть островной дуги испытывает косейсмические поднятия, а ее часть, находящаяся на большем расстоянии от желоба, – косейсмические опускания [23]. В интерсейсмический интервал вертикальные движения вблизи и на удалении от желоба сменяются движениями, противоположными по знаку (рис. 1).

Данные о вертикальных деформациях побережья островной дуги позволяют восстановить положение очага субдукционного землетрясения, оценить параметры очага (размеры вдоль дуги,

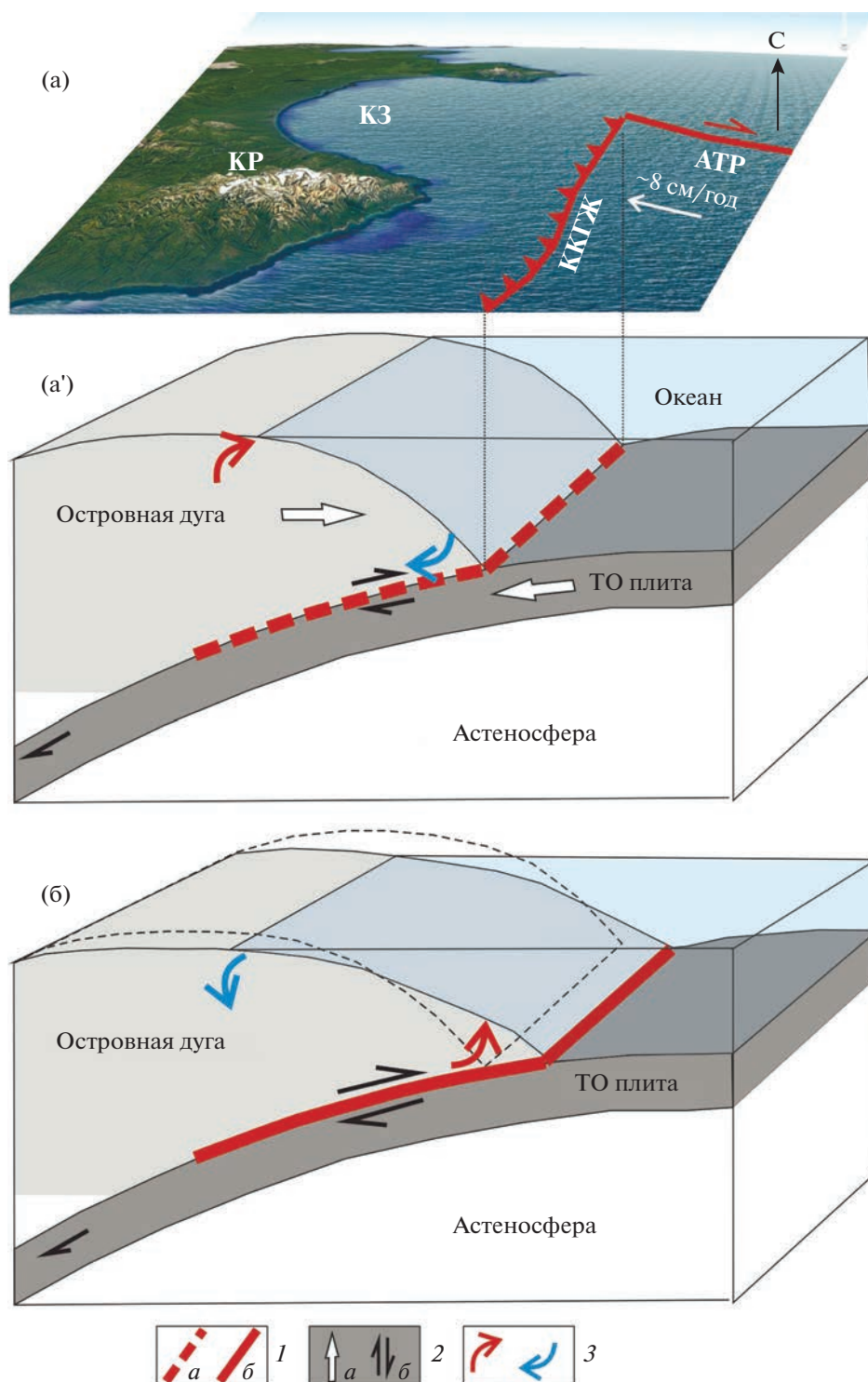


Рис. 1. Схема косейсмических и интерсейсмических деформаций в ходе субдукционного сейсмического цикла (по [23], с изменениями и дополнениями).

(а) – проекция (а') на земную поверхность Камчатки, (а') – интерсейсмический интервал – постепенные поднятие и опускание островной дуги над заблокированной частью ее контакта с погруженной частью океанической плиты; (б) – косейсмический интервал – быстрые опускание и поднятие земной поверхности, противоположные интерсейсмическим движениям.

Обозначено: ККГЖ – Курило-Камчатский глубоководный желоб; АТР – Алеутский трансформный разлом; КР – Кроноцкий полуостров; КЗ – Камчатский залив. 1 – контакт океанической плиты с островной дугой: а – заблокированный в интерсейсмический интервал (на фрагменте (а')), б – во время подвижки; 2 – относительное направление: а – сближение океанической плиты с островной дугой, б – относительные движения на их контакте; 3 – относительные интерсейсмические и косейсмические движения земной поверхности над зоной контакта плит

глубину проникновения плоскости срыва) и, примерно, магнитуду землетрясения [7, 25].

Теоретически, косейсмические движения представляют релаксацию интерсейсмических, итоговая величина движений сейсмического цикла равна нулю, и их результатом не может быть появление со временем выраженных в островной дуге зон опусканий или поднятий. Однако побережья некоторых островных дуг на протяжении среднего-позднего голоцена поднимались или опускались. В области землетрясения Тохоку в 2011 г. ($M_w = 9.1$), на севере Японии, происходили долговременные (на протяжении десятков и сотен тысяч лет) однонаправленные движения земной поверхности [14, 24]. Вклад косейсмических движений в долговременные вертикальные деформации таких побережий не выяснен.

На поднимающихся побережьях обычно существуют морские террасы, из которых древние находятся выше молодых [13, 16]. На опускающихся аккумулятивных побережьях древние береговые валы морских террас располагаются ниже молодых валов. Иногда древние береговые валы погружаются под уровень моря и не видны в рельефе [14, 24].

Соотношение косейсмических и долговременных движений нами было исследовано при изучении побережья Камчатского залива, который расположен напротив северной части Курило-Камчатской зоны субдукции.

Целью статьи является определение вклада косейсмических деформаций в формирование структуры побережья островных дуг.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования были направлены на выявление геологических следов сильнейших голоценовых субдукционных землетрясений и вызванных ими деформаций побережья Камчатского залива (п-ов Камчатка). Для этого нами были измерены топографические профили через береговые валы перпендикулярно береговой линии. Вдоль профилей были заложены шурфы и описаны вскрытые шурфами разрезы перекрывающих голоценовую аккумулятивную морскую террасу почвенно-пирокластических отложений. В разрезах выделялись отложения цунами и следы косейсмических вертикальных деформаций. Возраст береговых валов, слагающих террасу, определялся по возрасту вулканических пеплов в основании почвенно-пирокластических отложений [11].

Тефрохронологическая шкала для района исследований (последовательность тефр, их источников и возраста) составлена на основе ранее проведенных исследований [19, 12, 28, 16] и заверена во время экспедиционных работ. На побережье Камчатского залива обнаружены тефры

исторических извержений вулкана Безымянный (извержение 1955 г.) и вулкана Ксудач (Конус Штюбеля) (извержение 1907 г.). В северной части Камчатского залива обнаружена также тефра извержения вулкана Шивелуч 1964 г.

Доисторические извержения на побережье Камчатского залива представлены горизонтами тефры вулканов (табл. 1):

- Шивелуч (SH#4, SH#6, SH#12, SH#37);
- Ксудач (KC1);
- Гамчен (GA₃₁₀₀);
- Авачинский (AV#39).

Количество горизонтов тефры и их мощность меняются вдоль побережья.

В.В. Пономарева с соавт. [28] и С.П. Крашенинникова с соавт. [21] обозначили вулканические пеплы новыми кодами и привели их средний возраст (средневзвешенное значение) в калиброванных годах до 1950 г. (кал. л.н.) (см. табл. 1).

Геолого-геоморфологические индикаторы косейсмических поднятий и опусканий побережья разные. При косейсмическом поднятии побережья относительный уровень океана снижается, океан отступает от суши, и образуется ступень к приподнятой аккумулятивной (или абразионной) террасе. При опускании побережья уровень океана относительно повышается, он смещается в сторону суши, и часть существовавшей морской террасы размывается – формируется уступ размыва.

Поскольку побережье опустилось, то сформировавшийся после его опускания штормовой береговой вал оказывается выше более древних валов. Этот новый береговой вал перекрывает (погребает) уступ размыва более древней террасы (рис. 2).

Параметры долговременных вертикальных движений побережья (продолжительностью в несколько сейсмических циклов) определялись трендами изменений высот поверхности аккумулятивной морской террасы. Тренд описывался линейной регрессией зависимости высоты береговых валов от их расстояния от береговой линии.

Чтобы избежать влияния возможных различий в волновой энергии для разных участков побережья (от волновой энергии зависят ширина и высота активного пляжа, а также – высота валов над уровнем моря), при построении линий трендов не учитывались точки от уреза воды до вершины первого берегового вала, а со стороны берега исключались замеры высот за пределами морской аккумулятивной террасы.

Для всех профилей допускался один и тот же уровень моря, современный. Превышение древних береговых валов над молодыми валами (линия тренда наклонена в сторону океана) интерпретировалось как показатель постепенного под-

Таблица 1. Основные маркирующие горизонты тефры на побережье Камчатского залива

Вулкан	Код тефры новый*	Код прежний	¹⁴ C возраст (лет до 1950 г.)	Калиброванный возраст (лет ВР)	Средне взвешенный возраст (лет ВР)	Мощность тефры, описание**	Источник
Шивелуч	SH#1	Ш1964, SH1964 AD	—	—14 (1964 г.н.э.)	—	0.5–4 см, “соль с перцем”, с/з-к/з, только в северной части Камчатского залива	[12, 28]
Безымянный	—	B31955, BZ1955 AD	—	—5 (1955 г.н.э.)	—	1 см, светло-коричневый, светло-серый, т/з-м/з, только в южной и центральной части Камчатского залива	[19, 16]
Ксудач (конус Штюбеля)		КШт ₃ , KSht ₃ , KS1907 AD	—	43 (1907 г.н.э.)	—	1–1.5 см, светло-серый, т/з, только в южной и центральной части Камчатского залива	[19, 16, 9]
Шивелуч	SH#4	Ш1, SH1	265 ± 18	311 ± 6	311	0.5–1 см, светлый, т/з, в северной части Камчатского залива (в отдельных шурфах)	[8, 12, 28]
Шивелуч	SH#6	Ш2, SH2	965 ± 16	900	764	1–2 см, светло-коричневый, м/з-т/з	[19, 28, 16]
Шивелуч	SH#12	Ш1450, SH1450	1450	1350, 1311–1408	1356	1–3 см, “соль с перцем”, палево-желтый, м/з	[19, 28, 16]
Ксудач	—	KC1, KS1	1800	1590–1705, 1700, 1720	1651	1–4 (до 8) см, грязный желтовато-коричневый, палевый, т/з	[19, 16]
Гамчен		GA3100	3100	~3300		2–4 см, грязно-розовый, красноватый, т/з	[19]
Авачинский	AV#39	AV1, ПАВ1, AB3500, AV3500	3762 ± 47	3674–3851	3774	1–2 см, серовато-коричневый, желтоватый, т/з	[17, 18, 3, 1, 2, 27, 22, 28, 26, 21]
Шивелуч	SH#37	Ш4800, SH4800	4800	5500, 5600, 5421–5626	5522	1–2 см, “соль с перцем”, м/з	[19, 28]

Примечание. *Новые коды извержений для вулканов Шивелуч и Авачинский даны в работах [28, 21]; ** т/з, м/з, с/з, к/з – тонко-, мелко-, средне- и крупнозернистая размерность частиц тефры.

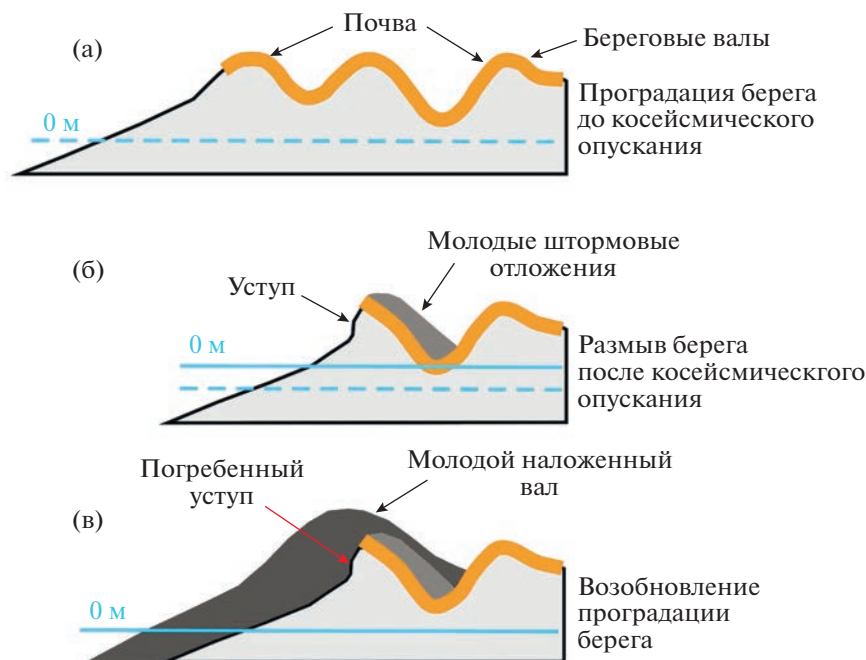


Рис. 2. Реконструкция процесса образования погребенного уступа размыва на морской аккумулятивной террасе в результате косейсмического опускания побережья (по данным [11]).

(а) — береговые валы до косейсмического опускания; (б) — формирование уступа размыва; (в) — появление молодого берегового вала, перекрывающего уступ размыва.

Обозначен (линия синим) уровень моря до (пунктирная) и после (сплошная) опускания суши.

нения побережья. Превышение молодых валов над более древними (линия тренда наклонена в сторону суши) интерпретировалось как свидетельство опускания побережья.

Всего на побережье Камчатского залива были измерены 15 топографических профилей — от правобережья р. Большая Чажма до левобережья р. Андриановка. Дополнительно в анализ был включен ранее измеренный нами топографический профиль в северной части побережья Камчатского залива (рис. 3, профиль 16–16'). Длина профиля составляет >1.5 км, — мы использовали только его часть [12, 16].

Вдоль профилей были заложены более сотни шурфов, описаны вскрытые ими разрезы морских и почвенно-пирокластических отложений.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Выявлено, что побережье Камчатского залива, наиболее удаленное от глубоководного желоба, опускается — древние береговые валы там гипсометрически ниже молодых валов (рис. 4, а).

Часть побережья залива, граничащая с Кроноцким полуостровом, на протяжении среднего—позднего голоцена воздымалась, и древние береговые валы в этой части залива гипсометрически выше молодых (см. рис. 4, б).

Между зонами побережья с разным направлением вертикальных движений есть участки с примерно горизонтальной трендовой линией берега (см. рис. 4, в).

Косейсмические вертикальные деформации

Проявлением косейсмической природы резких вертикальных опусканий суши являются погребенные уступы размыва.

Нами приведен пример одного из профилей на опускающемся в голоцене участке побережья Камчатского залива (рис. 5, профиль 15–15'; см. рис. 3, положение профиля). Максимальный возраст сохранившихся морских аккумулятивных террас на побережье Камчатского залива в районе данного профиля достигает 3800 лет. Более древние разрезы, содержащие в основании тефру SH#37, описывают отложения речных террас или заросших болот, сформировавшихся вне волновой деятельности океана (см. рис. 5, шурфы 274, 275).

Признаками косейсмических опусканий и размыва части морской террасы служат:

— наличие береговых валов разных гипсометрических уровней — 5.5–6 м, 4–5 м и 3 м (от молодых к древним);

— разный (в данном случае, до 1000 лет) возраст соседних береговых валов.

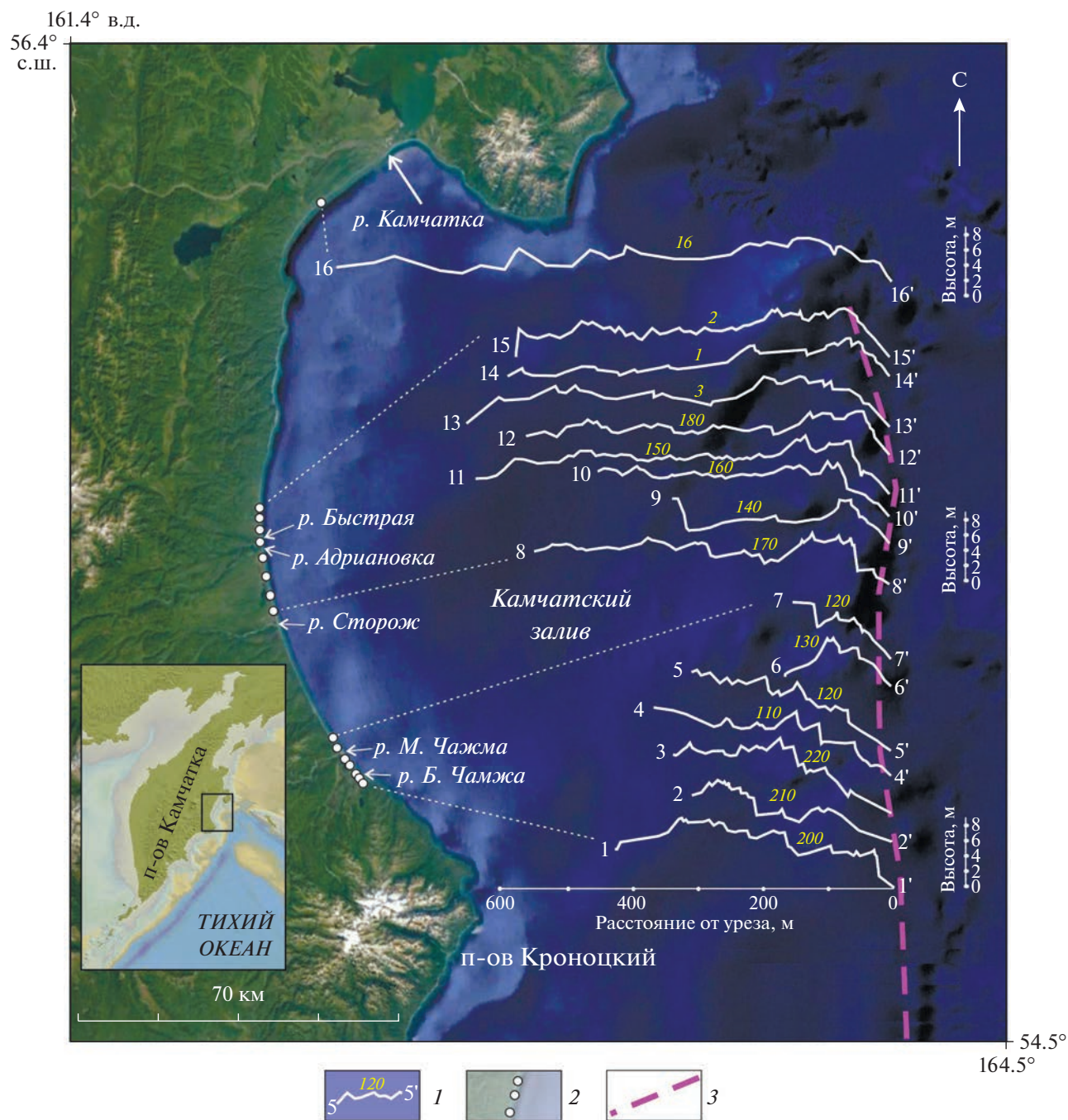


Рис. 3. Измеренные топографические профили 1–1'–16–16' на побережье Камчатского залива (по [29]).

На врезке: показано (прямоугольник) положение района исследования.

1 – профили и их порядковые номера (полевая нумерация профилей – курсивные цифры желтым); 2 – положение профилей; 3 – осевая линия глубоководного желоба

Всего на профиле обнаружены три уступа размыва (см. рис. 5).

• Первый уступ размыва – самый молодой – образовался после 1907 г. (после выпадения тефры $KSht_3$). Он может быть связан с историческим Усть-Камчатским землетрясением 1923 г.

• Второй уступ размыва – древний – образовался между выпадениями тефр $SH\#4$ и $SH\#6$, т.е. между 311 и 764 гг. до 1950 г. Поскольку шурфы 278 и 277 отличаются по возрасту на более чем тысячу лет, после землетрясения, сопровождавшегося косейсмическим опусканием, размыв терра-

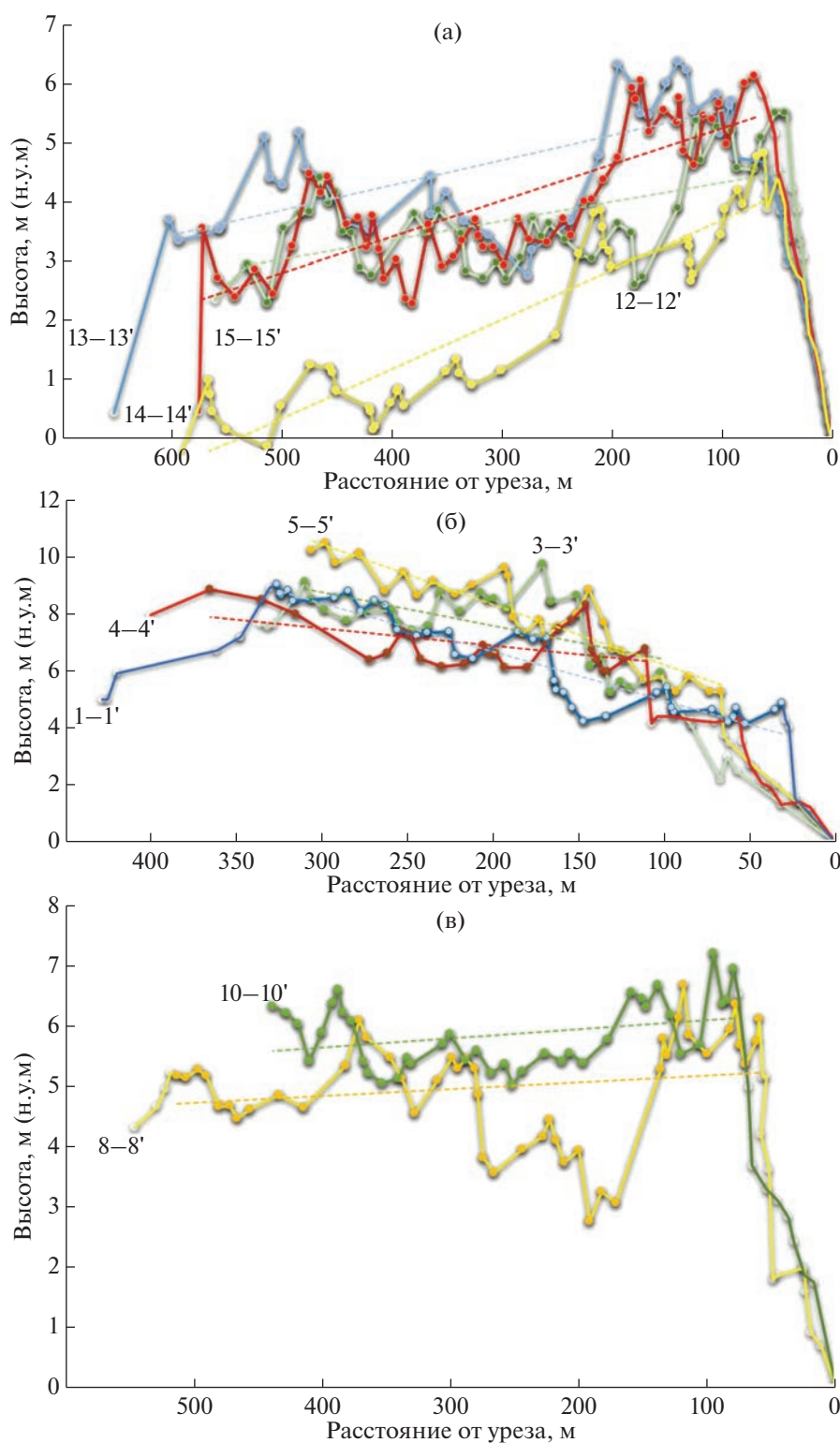


Рис. 4. Топографические профили побережья Камчатского залива.

Направление движения: (а) — опускание; (б) — воздымание; (в) — относительная стабильность.

Линии (пунктирные), аппроксимирующие наклон террасы (цвет линии соответствует цвету профиля); номера топографических профилей (арабские цифры).

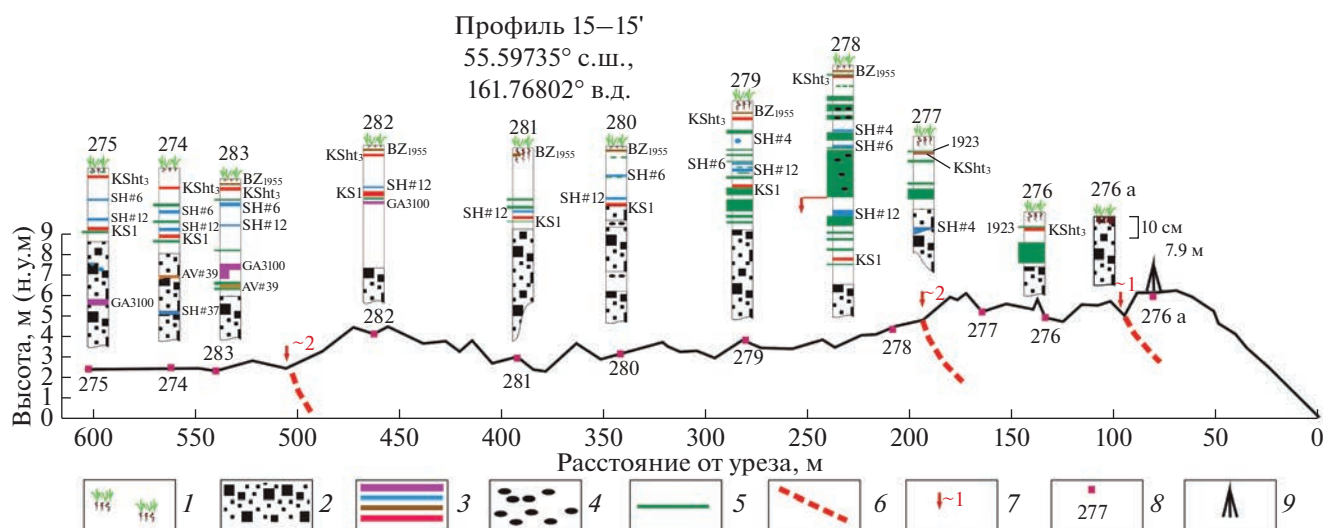


Рис. 5. Геологические разрезы вдоль профиля 15–15'.

Положение профиля 15–15' – см. рис. 3.

1 – дернина; 2 – песок (штормовые отложения); 3 – тефра и ее код (см. табл. 1); 4 – галька; 5 – отложения цунами (включая цунами 1923 г.); 6 – погребенные уступы размыва; 7 – косейсмическое опускание и его оценочная амплитуда (м); 8 – положение шурфа на профиле и его номер; 9 – триангуляционный пункт (высота (м) в Балтийской системе координат)

сы был значительным. При обычной, не нарушаемой косейсмикой, эволюции побережья (при условии достаточного количества материала, выносимого в океан реками), береговые валы формируются за десятки (до сотни) лет. Разница в тысячу лет в возрасте двух соседних (наблюдаемых сейчас) валов – отклонение. Такая разница в возрасте означает, что между ними были валы, которые были размыты. Об этом свидетельствует образовавшаяся в земной поверхности ступень высотой ~2 м над погребенным уступом.

• Третий уступ размыва – самый древний – образовался между выпадением тефры GA3100 и AV#39, т.е. во временном интервале между 3300 и 3774 лет назад (до 1950 г.). Амплитуда опускания этого события составила ≥ 2 –2.5 м.

Таким образом, за последние ~3850 лет в районе Камчатского залива произошли три сильных субдукционных землетрясения, сопровождавшихся косейсмическими опусканиями, т.е. одно событие в каждые ~1200–1300 лет. Такая повторяемость сейсмотектонических событий сопоставима с повторяемостью событий на юге Камчатки (900–1200 лет) [25].

Аналогичное строение имеют участки морской террасы в районе профилей 8–8', 10–10', 11–11', 12–12', 13–13', 14–14' и 16–16' (рис. 6; см. рис. 3, положение профилей). В разрезах вдоль этих профилей выявлены размытые террасы, связанных с косейсмическими опусканиями в тех же временных интервалах, что и на профиле 15–15' (см. рис. 6, см. рис. 3).

Наклон морской аккумулятивной террасы и направление движения

Общий наклон поверхности аккумулятивной террасы аппроксимирует линия, связывающая ее высотные отметки. Наклон линии определяет ниже или выше расположены древние береговые валы молодых валов. Относительное высотное положение береговых валов и их возраст могут быть использованы для оценки средней скорости вертикальных движений за интервал времени между формированием наиболее древнего и наиболее молодого из валов.

Нами выявлены три варианта положения аппроксимирующей линии (см. рис. 4, а–в):

- линия наклонена по направлению к суше;
- линия наклонена по направлению к океану;
- линия занимает почти горизонтальное положение.

Нами приведены зависимости, выявленные линейной регрессией, высоты вала (y , м) от его расстояния от линии берега (x , м), и величины R^2 , описывающие точность линейной аппроксимации (см. рис. 6).

При наилучшей аппроксимации R^2 стремится к 1. Величина R^2 для всех профилей невелика, тем не менее, аппроксимирующие линии отражают общий наклон поверхности аккумулятивной террасы (см. рис. 6).

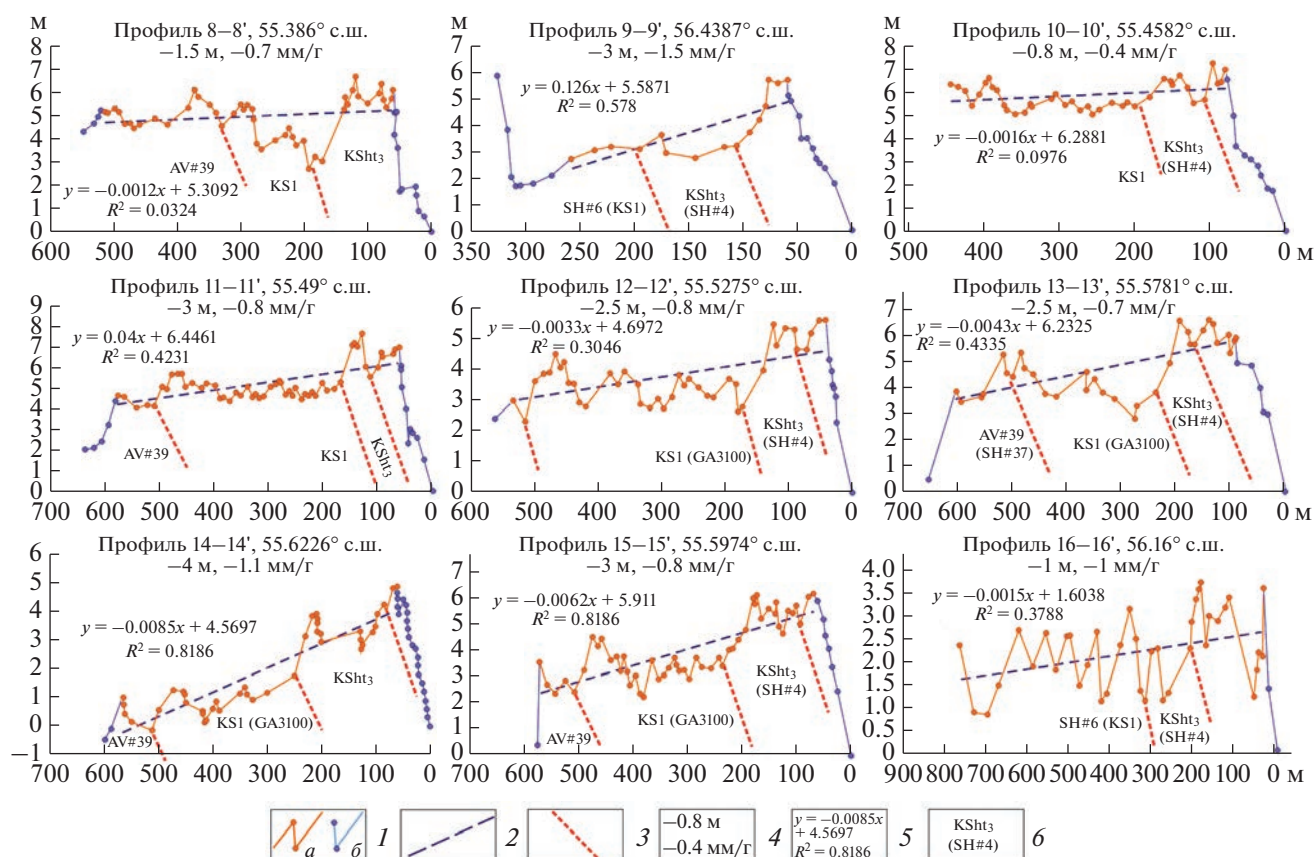


Рис. 6. Профили 8–8'–16–16' через опускающееся побережье Камчатского залива.

Положение профилей – см. рис. 3.

1 – части профилей при построении аппроксимирующих линий: а – учитываемые, б – не учитываемые; 2 – аппроксимирующие линии; 3 – погребенные уступы размыва; 4 – величина и средняя скорость опускания побережья за последние несколько тысяч лет; 5 – параметры зависимости высоты береговых валов от расстояния от береговой линии; 6 – код тефры (код тефры (в скобках), точнее определяющей время косейсмического опускания (см. табл. 1))

Трендовые линии профилей в южной части Камчатского залива наклонены в сторону океана (см. рис. 4, б).

Показано геологическое строение воздымающейся морской аккумулятивной террасы в южной части залива (рис. 7, профиль 1–1'; рис. 8).

В центральной части Камчатского залива трендовые линии профилей 12–12', 13–13', 14–14' и 15–15' наклонены в сторону суши (см. рис. 4, а). Между группами профилей с разным направлением наклона трендовой линии находятся профили с ее примерно горизонтальным положением (см. рис. 4, в, профили 8–8', 10–10').

Важно отметить, что в опускающихся и воздымающихся частях залива уступы размыва, возникшие при косейсмических опусканиях побережья, совпадают по возрасту.

Соотношение возраста и относительных высот древних и молодых береговых валов показывает, что средняя скорость вертикальных движе-

ний участков побережья составляет (см. рис. 6, см. рис. 8):

– опускание $-0.4...-1.5$ мм/г,

– воздымание $+1.1-2.25$ мм/г.

Опускающееся побережье центральной части Камчатского залива находится на расстоянии ~ 130 км от желоба (см. рис. 6). Воздымающееся побережье Камчатского залива, в северо-западной части Кроноцкого полуострова находится на расстоянии ~ 110 км от Курило-Камчатского глубоководного желоба (см. рис. 3, см. рис. 8).

Возможно, смена направления движений от центральной части залива к его периферии связана с самим существованием Кроноцкого полуострова – относительно низкоплотного корового массива, затрудняющего процесс поддвига Тихоокеанской плиты под Камчатку.

Трендовые нисходящие движения в центральной части залива сменяются трендовыми восходящими на его периферии, в районе перехода к Кроноцкому полуострову. Можно предполо-

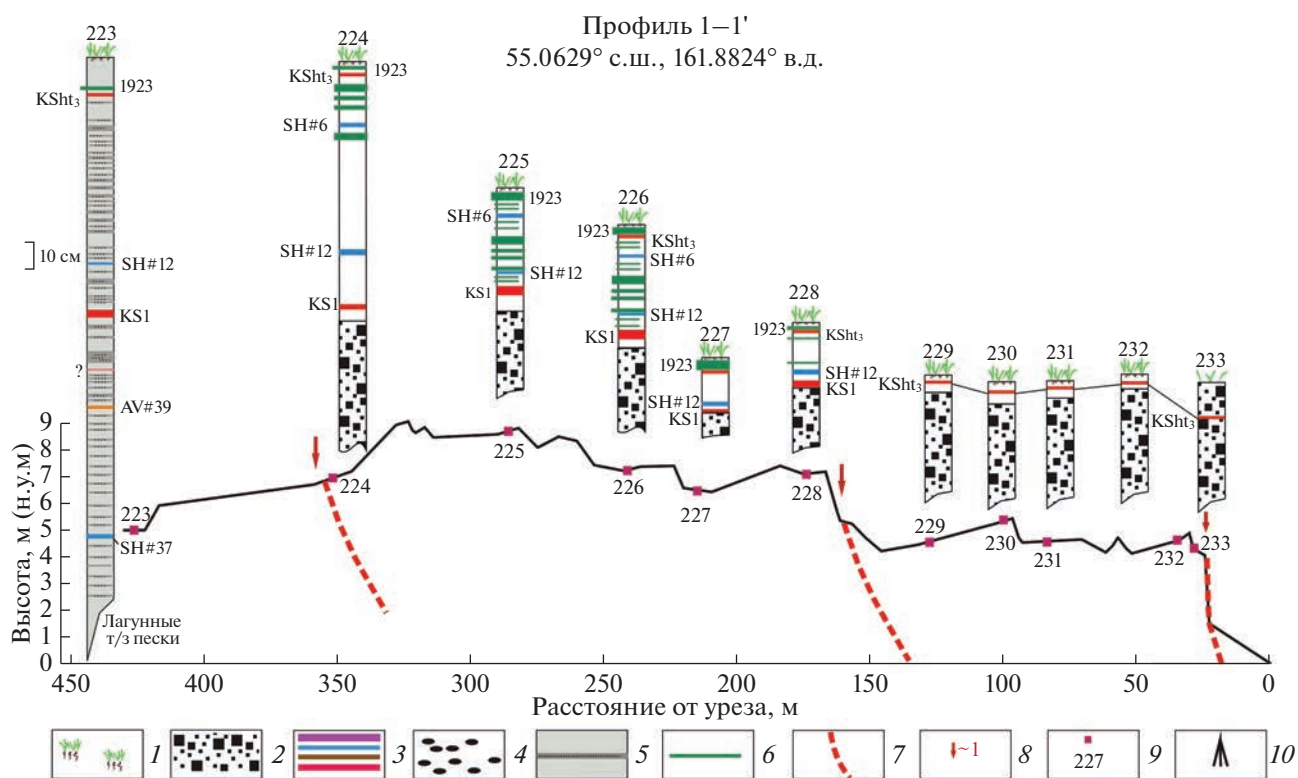


Рис. 7. Геологические разрезы вдоль профиля 1–1'.

1 – дернина; 2 – песок (штормовые отложения); 3 – тefра и ее код (см. табл. 1); 4 – галька; 5 – торф с прослоями песков различного генезиса (цунами, паводки, пр.); 6 – отложения цунами (включая цунами 1923 г.); 7 – погребенные уступы размыва; 8 – косейсмическое опускание и его оценочная амплитуда (м); 9 – положение шурфа на профиле и его номер; 10 – триангуляционный пункт (высота (м) в Балтийской системе координат)

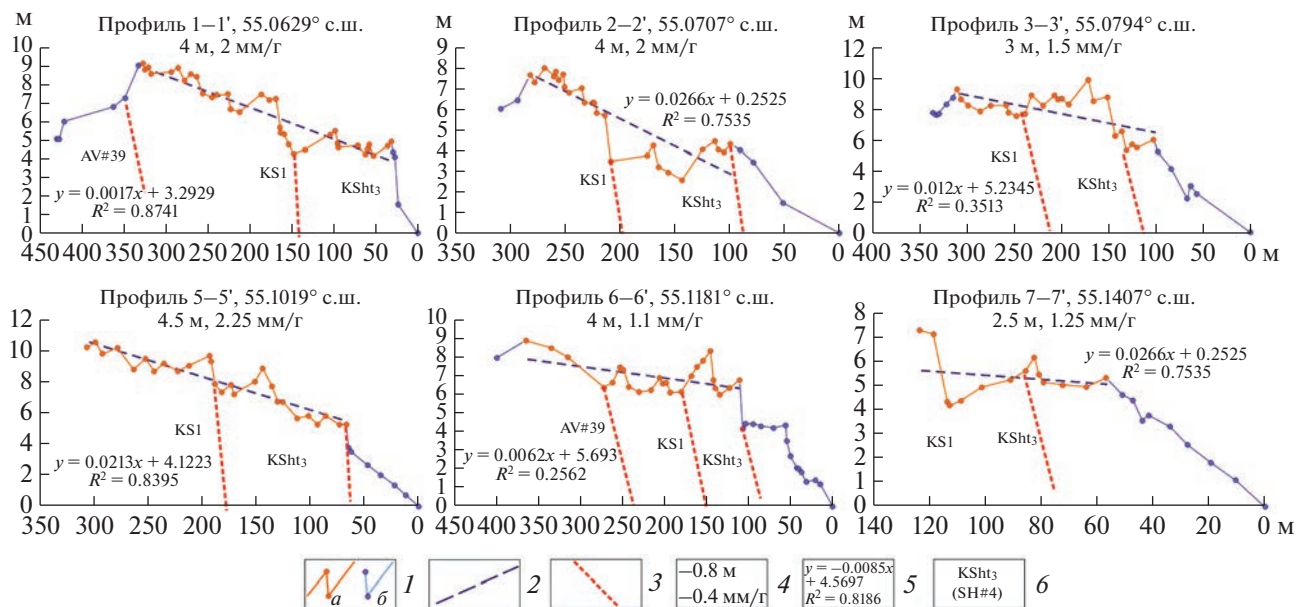


Рис. 8. Профили 1–1'–7–7' через воздымающиеся участки морской аккумулятивной террасы.

Положение профилей – см. рис. 3.

1 – части профилей при построении аппроксимирующих линий: а – учитываемые, б – не учитываемые; 2 – аппроксимирующие линии; 3 – погребенные уступы размыва; 4 – величина и средняя скорость поднятия побережья за последние несколько тысяч лет; 5 – параметры зависимости высоты береговых валов от расстояния от береговой линии; 6 – код тefры (см. табл. 1)

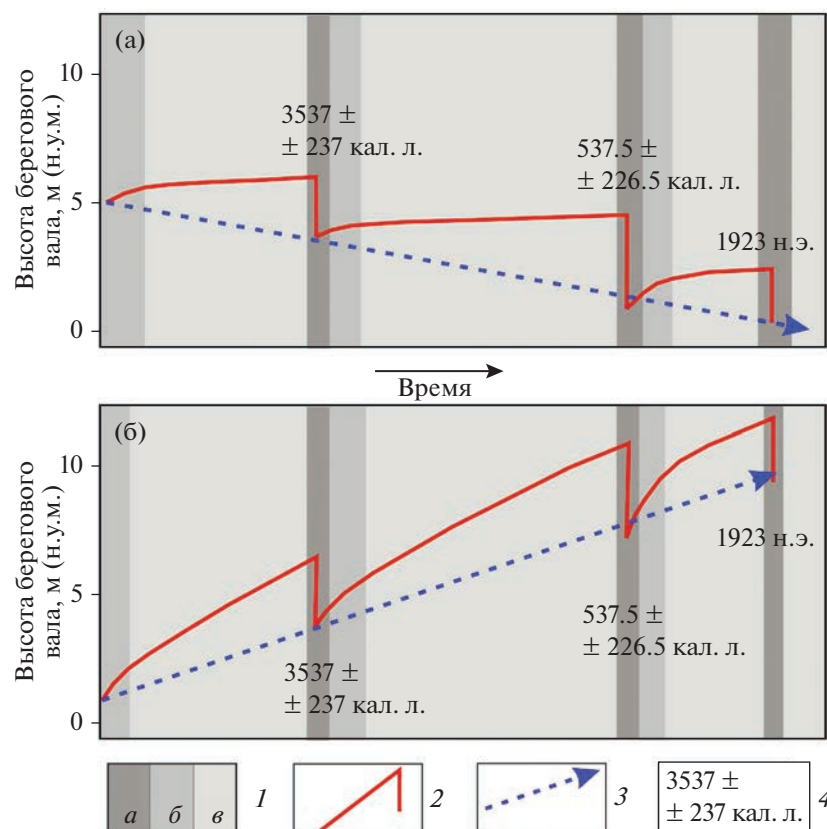


Рис. 9. Схема сейсмических циклов и косейсмических опусканий побережья Камчатского залива во время сильных субдукционных землетрясений (по данным [15], с изменениями). Части Камчатского залива: (а) — центральная, (б) — южная.
 1 — вертикальные движения в пределах цикла: а — косейсмическое, б — быстрое постсейсмическое, в — медленное интерсейсмическое; 2 — высота древнейшего берегового вала на протяжении нескольких сейсмических циклов; 3 — тренд вертикальных движений побережья; 4 — средневзвешенное значение возраста установленных событий (калиброванных лет до 1950 г.)

жить, что смена знака вертикальных движений связана с изостатическим воздыманием относительно низкоплотного корового массива Кроноцкого полуострова.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Соотношение косейсмических и медленных движений в деформации побережья

Опускание центральной части побережья Камчатского залива не объясняется накоплением части косейсмических опусканий, а воздымание его периферической части — накоплением части косейсмических поднятий. Однако мы установили, что воздымающиеся и опускающиеся участки побережья испытывали одни и те же — одного возраста — косейсмические опускания. Это означает, что долговременные опускания или поднятия побережья с косейсмическими движениями не связаны. По аналогии с платформенными областями, медленные движения, описываемые трендовой составляющей профилей, можно определить как эпейрогенические, а интерсейсмические

и косейсмические движения — как их осложняющие (рис. 9).

Можно предположить, что зона опускания центральной части Камчатского залива продолжается на юг понижением между Кроноцким полуостровом и основным массивом п-ва Камчатка (рис. 10).

Далее к югу продолжением зоны относительного погружения может быть опускающаяся в среднем-позднем голоцене центральная часть Кроноцкого залива [10]. Еще южнее — северная и центральная часть Авачинского залива, где на фоне горизонтальных, либо слабонаклонных в сторону суши, трендов поверхности голоценовой морской аккумулятивной террасы происходили косейсмические опускания [25] (см. рис. 10).

Мы предполагаем, что восточная, океаническая, граница зоны погружения проходит по западным окончаниям восточных полуостровов п-ова Камчатка.

Выделенная зона опусканий представляет наиболее близкую к желобу структуру растяжения. Зона параллельна восточному сбросовому ограничению

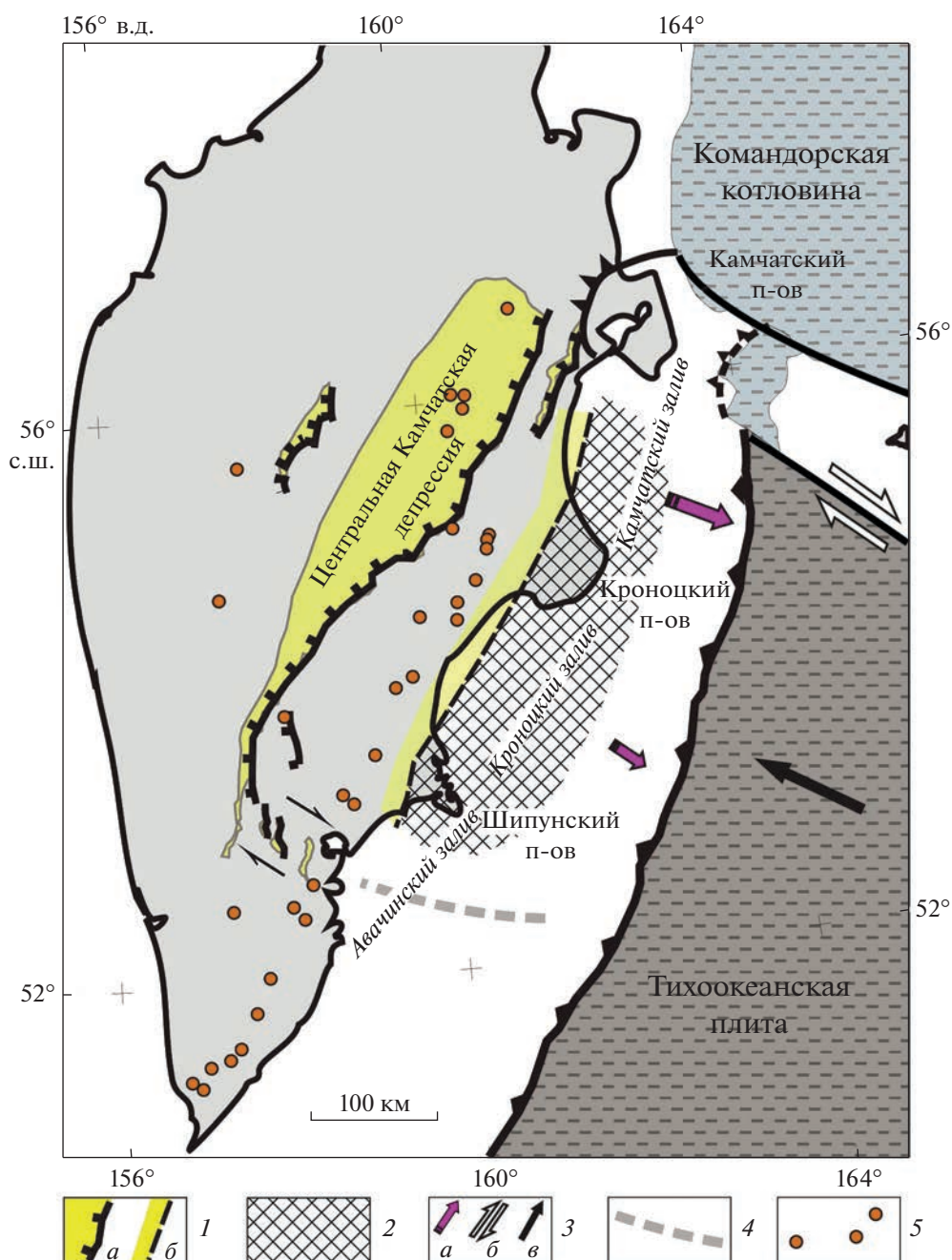


Рис. 10. Схема положения структур растяжения на Камчатке, связанных с отступанием Тихоокеанской плиты в сторону океана (по [6], с изменениями).

1 — структуры растяжения и их восточные ограничения: а — Центральной Камчатской депрессии, б — зоны тыловых частей восточных полуостровов и центральных частей восточных заливов; 2 — область поперечного дуге сжатия земной коры; 3 — движения: а — восточной части п-ова Камчатка относительно Западной Камчатки, б — по Алеутскому трансформному разлому, в — Тихоокеанской плиты относительно п-ова Камчатка; 4 — южное ограничение области поперечного растяжения структур п-ова Камчатка; 5 — средне-позднечетвертичные вулканические центры

Центральной Камчатской депрессии — основной структуре растяжения Камчатки — и, возможно, сформировалась также в среднем плейстоцене.

Мы считаем, что она подобна Срединно-Курильскому прогибу Курильских островов. В такой схеме, под восточными полуостровами п-ова Кам-

чатка происходит замещение поперечного растяжения земной коры островной дуги на ее поперечное сокращение, а под западными краями полуостровов происходит смена коровой сейсмичности Камчатки на субдукционную [4, 5], инициируемую поддвигом океанической плиты под Камчатку.

ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования авторы пришли к следующим выводам.

1. Северная часть Камчатского сегмента Курило-Камчатской дуги в районе Камчатского залива испытывает два типа движений:

– быстрые возвратные (косейсмические) как результат релаксации накопленных в интерсейсмический интервал упругих деформаций;

– медленные однонаправленные (эпейрогенетические).

Косейсмические движения представляют кратковременные флуктуации на фоне эпейрогенетических движений, не накапливаются и не приводят к появлению остаточных деформаций на протяжении сейсмических циклов.

2. Зона погружения центральной части Камчатского залива представляет результат медленных однонаправленных движений. Зона погружения продолжается на юг понижениями между поднятиями Кроноцкого и Шипунского полуостровов и основной частью п-ва Камчатка и далее — до центральной части Авачинского залива.

3. Формирование выявленной зоны опусканий, обрамленной с востока поднятиями Кроноцкого и Шипунского полуостровов, связано, как и образование Центральной Камчатской депрессии, — с откатыванием (roll-back) погруженной части Тихоокеанской плиты в сторону океана. Поперечное растяжение земной коры Камчатского сегмента Курило-Камчатской островной дуги сменяется ее поперечным сжатием под восточными полуостровами Камчатки и побережьями разделяющих их заливов.

Благодарности. Авторы благодарны рецензентам А.А. Пейве (ГИН РАН, г. Москва, Россия), А.Н. Диденко (ИТиГ ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия), а также анонимному рецензенту за полезные комментарии. Особую благодарность авторы выражают редактору М.Н. Шуплецову (ГИН РАН, г. Москва, Россия) за тщательное редактирование.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-27-00069.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базанова Л.И., Брайцева О.А., Дирксен О.В., Сулерджицкий Л.Д., Данхара Т. Пеплопады крупнейших голоценовых извержений на траверсе Усть-Большерецк-Петропавловск-Камчатский: источники, хронология, частота // Вулканология и сейсмология. 2005. № 6. С. 30–46.
2. Базанова Л.И., Брайцева О.А., Пузанков М.Ю., Сулерджицкий Л.Д. Катастрофические плинианские извержения начальной фазы формирования Молодого конуса вулкана Авачинский (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2003. № 5. С. 20–40.

3. Брайцева О.А., Базанова Л.И., Мелекесцев И.В., Сулерджицкий Л.Д. Крупнейшие голоценовые извержения вулкана Авачинский на Камчатке (этап 7250–3700 14С лет назад) // Вулканология и сейсмология. 1998. № 1. С. 3–24.
4. Гордеев Е.И., Гусев А.А., Левина В.И., Леонов В.Л., Чебров В.Н. Мелкофокусные землетрясения п-ва Камчатка // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 28–38.
5. Гордеев Е.И., Гусев А.А., Левина В.И., Леонов В.Л., Чебров В.Н. Сеймотектоника полуострова Камчатка // Вестн. СВНЦ ДВО РАН. 2005. № 1. С. 24–32.
6. Кожурин А.И., Пономарева В.В., Пинегина Т.К. Деформация островной дуги, расположенной над краем погружающейся плиты: пример Камчатки. — В кн.: *Тектоника и геодинамика складчатых поясов и платформ фанерозоя*. — Мат-лы XLIII Тектонического совещания, 2–5 февраля, г. Москва. — М.: ГЕОС, 2010. Т. 1. С. 319–323.
7. Ландер А.В., Пинегина Т.К. Моделирование очагов сильнейших палеоземлетрясений Южной Камчатки. — В кн.: *Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России*. — Отв. ред. Д.В. Чебров — Тр. 6-ой научно-техн. конф. 1–7 октября 2017, г. Петропавловск-Камчатский. — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 221–225.
8. 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.
9. Пинегина Т.К., Базанова Л.И. Новые данные о параметрах исторических цунами на побережье Авачинского залива (Камчатка) // Вестн. КРАУНЦ. Сер.: Науки о Земле. 2016. Вып. 31. № 3. С. 5–17.
10. Пинегина Т.К. Вероятная сегментация Камчатской зоны субдукции по палеосейсмологическим данным. — В кн.: *Вулканизм и связанные с ним процессы*. — Мат-лы XXIV ежегодной научн. конф., посвященной Дню вулканолога, 29–30 марта 2021 г., г. Петропавловск-Камчатский. — ИВиС ДВО РАН, 2021. С. 102–104.
11. Пинегина Т.К. Пространственно-временное распределение очагов цунамигенных землетрясений тихоокеанского и берингоморского побережий Камчатки по отложениям палеоцунами. — Автореф. дис. ... д. г.-м.-н. — М.: ИО РАН, 2014. 43 с.
12. Пинегина Т.К., Кожурин А.И., Пономарева В.В. Оценка сейсмической и цунамиопасности для поселка Усть-Камчатск (Камчатка) по данным палеосейсмологических исследований // Вестн. КРАУНЦ. Сер.: Науки о Земле. 2012. Вып. 19. № 1. С. 138–159.
13. Пинегина Т.К., Кравчуновская Е.А., Ландер А.В., Кожурин А.И., Буржуа Дж., Мартин Е.М. Голоценовые вертикальные движения побережья полуострова Камчатский (Камчатка) по данным изучения морских террас // Вестн. КРАУНЦ. Сер.: Науки о Земле. 2010. Вып. 15. № 1. С. 100–116.
14. Atwater B.F., Furukawa R., Hemphill-Haley E., Ikeda Y. et al. Seventeenth-century uplift in eastern Hokkaido, Japan // *The Holocene*. 2004. Vol. 14. № 4. P. 487–501.
15. Bourgeois J. A movement in four parts? // *Nature*. 2006. Vol. 440. P. 430–431.

16. *Bourgeois J., Pinegina T.K.* The 1997 Kronotsky earthquake and tsunami and their predecessors, Kamchatka, Russia // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2018. Vol. 18. № 1. P. 335–350.
17. *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. Vol. 57. № 6. P. 383–402.
18. *Braitseva O.A., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D., Melekestsev I.V., Bailey J.* Holocene key-marker tephra layers in Kamchatka, Russia // *Quaternary Research*. 1997. Vol. 47. P. 125–139.
19. *Kozhurin A., 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., Tengono-ciang A., Uy H.* Trenching studies of active faults in Kamchatka, Eastern Russia: Palaeoseismic, tectonic and hazard implications // *Tectonophysics*. 2006. Vol. 417. № 3–4. P. 285–304.
20. *Kozhurin A., Zelenin E.* An extending island arc: The case of Kamchatka // *Tectonophysics*. 2017. Vol. 706. P. 91–102.
21. *Krashenninnikov S.P., Bazanova L.I., Ponomareva V.V., Portnyagin M.V.* Detailed tephrochronology and composition of major Holocene eruptions from Avachinsky, Kozelsky, and Koryaksky volcanoes in Kamchatka // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2020. Vol. 408. P. 107088.
22. *Kyle P.R., Ponomareva V.V., Rourke Schluep R.* Geochemical characterization of marker tephra layers from major Holocene eruptions in Kamchatka, Russia // *Int. Geol. Rev.* 2011. Vol. 53. № 9. P. 1059–1097.
23. *Leonard L.J., Currie C.A., Mazzotti S., Hyndman R.D.* Rupture area and displacement of past Cascadia great earthquakes from coastal coseismic subsidence // *GSA Bull.* 2010. Vol. 122. № 11–12. P. 1951–1968.
24. *Nishimura T.* Pre-, co-, and post-seismic deformation of the 2011 Tohoku-Oki earthquake and its implication to a paradox in short-term and long-term deformation // *Journal of Disaster Research*. 2014. Vol. 9. № 3. P. 294–302.
25. *Pinegina T.K., Bourgeois J., Bazanova L.I., Zelenin E.A., Krashenninnikov S.P., Portnyagin M.V.* Coseismic coastal subsidence associated with unusually wide rupture of prehistoric earthquakes on the Kamchatka subduction zone: A record in buried erosional scarps and tsunami deposits // *Quaternary Sci. Rev.* 2020. Vol. 233. L. 106171.
26. *Pinegina T.K., Bazanova L.I., Zelenin E.A., et al.* Holocene Tsunamis in Avachinsky Bay, Kamchatka, Russia // *Pure and Applied Geophys.* 2018. Vol. 175. P. 1485–1506.
27. *Ponomareva V.V., Churikova T.G., Melekestsev I.V., Braitseva O.A., Pevzner M.M., Sulerzhitsky L.D.* Late Pleistocene–Holocene volcanism on the Kamchatka peninsula, Northwest Pacific region. — In: *Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region*. — Ed. by J. Eichelberger, E. Gordeev, M. Kasahara, P. Izbekov, J. Lees, (Geophys. Monograph Ser. AGU, Washington, D.C., USA. 2007. Vol. 173), P. 169–202.
28. *Ponomareva V.V., Portnyagin M.V., Pendea I.F., Zelenin E.A., Bourgeois J., Pinegina T.K., Kozhurin A.I.* A full Holocene tephrochronology for the Kamchatsky Peninsula region: applications from Kamchatka to North America // *Quaternary Sci. Rev.* 2017. Vol. 168. P. 101–122.
29. GEBCO, https://www.gebco.net/data_and_products/gebco_web_services/web_map_service/ (Accessed date August 28, 2023).

Coseismic and Tectonic Time-Scale Deformations of an Island Arc Based on Studies of East Coast of Kamchatka Peninsula (Far East, Russia)

T. K. Pinegina^a, A. I. Kozhurin^{a, b, *}

^a*Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences,
bld. 9, Piipa Boulevard, 683023 Petropavlovsk-Kamchatsky, Kamchatka Region, Russia*

^b*Institute of Geology, Russian Academy of Sciences, bld. 7, Pyzhevsky lane 7, 119017 Moscow, Russia*

*e-mail: anivko@vandex.ru

Geologic structure of the late Holocene accumulative marine terrace on the coast of Kamchatka Bay (Kamchatka Peninsula) has been studied. The ages and relative hypsometric position of beach ridges composing the terrace allowed us to identify two types of vertical movements of the coast: periodic fast (coseismic) and slow time-scale uplift or subsidence. Large-amplitude vertical coseismic movements (up to 1–2 meters) occur on average once in about 1200–1300 years, and slow movements occur at an average rate from a fraction of a millimeter to about 2 mm per year. Coseismic motions represent relaxation of elastic deformations accumulated during the interseismic interval of the seismic cycle, neither exceed them nor accumulate. Slow motions set the general trend of vertical deformations of the coast. It is assumed that the subsiding central parts of the eastern bays of Kamchatka Peninsula (Avachinsky, Kronotsky and Kamchatsky) and depressions between the eastern peninsulas (Kronotsky, Shipunsky) and the main massif of Kamchatka form an arc-parallel extension zone, which is nearest to the deep-water trench, and that extension is caused by the migration of the subducted part of the Pacific plate toward the Pacific Ocean. Under the eastern Shipunsky and Kronotsky peninsulas, the arc-normal extension of the earth's crust of the Kamchatka segment of the Kuril–Kamchatka island arc is replaced by a zone of transverse compression.

Keywords: island arc, subduction, coseismic and interseismic deformations, long-scale vertical movements, Kamchatka Peninsula, Kamchatsky Bay, Kronotsky Peninsula, Shipunsky Peninsula