

**ПАРАМЕТРЫ ЦУНАМИ И КОСЕЙСМИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ НА ПОБЕРЕЖЬЕ  
АВАЧИНСКОГО ЗАЛИВА (КАМЧАТКА) В ГОЛОЦЕНЕ****Пинегина Т.К.<sup>1</sup>, Базанова Л.И.<sup>1</sup>, Зеленин Е.А.<sup>2</sup>, Кожурин А.И.<sup>1,2</sup>**<sup>1</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, pinegtk@yandex.ru<sup>2</sup>Геологический институт РАН, г. Москва**Введение**

В настоящее время во многих странах мира изучают отложения палеоцунами, по ним восстанавливают интенсивность событий, воздействовавших на побережья на протяжении тысяч лет. Данный подход начал применяться с 90-х годов XX века, а после катастрофы в Индонезии в 2004 г. стал общепринятым. Методика позволяет получить подробную летопись сильных цунами за последние ~2–6 тыс. лет (в зависимости от направления и скорости тектонических движений на побережьях). Нижняя возрастная граница изучаемых палеоцунами обусловлена быстрым подъемом уровня моря в раннем голоцене, закончившемся к его середине [12]. Так, например 10–11 тыс. лет назад уровень моря был ниже современного на 40–50 м.

Обычно голоценовые морские аккумулятивные террасы на восточном побережье Камчатки имеют возраст около 1500–2000 лет [3], поэтому нам редко удавалось получить летопись палеоцунами для более древних событий. Основная задача данного исследования состояла в максимально возможном продлении каталога цунами, что на наш взгляд особенно важно для побережья Авачинского залива, где располагается рекреационная зона г. Петропавловска-Камчатского и прилегающих населенных пунктов.

В настоящей публикации мы впервые приводим сведения по повторяемости цунами на побережье Авачинского залива за последние ~4200 лет. Среди выявленных 33 сейсмических событий, три возникли от т.н. «мегаземлетрясений», сопровождавшихся помимо цунами, косейсмическими опусканиями и кратковременными этапами размыва морской аккумулятивной террасы на побережье Авачинского залива.

**Методика исследований**

На побережье залива, на участке длиной около 70 км, были проведены детальные исследования отложений цунами и косейсмических деформаций (рис. 1). Было измерено 9 топографических профилей, вдоль которых закладывались шурфы, и в них описывались геологические разрезы. В каждом шурфе вдоль измеренных топографических профилей мы идентифицировали отложения цунами, описывали их мощность, гранулометрический состав, слоистость и градиционную сортировку, отбирали образцы и фотодокументировали стенки. Корреляция отложений цунами от шурфа к шурфу и их датирование проводились с помощью тефрохронологического метода [8]. Отложения цунами на изученном участке (рис. 1) представлены горизонтами чистого черного, иногда слоистого разнозернистого морского песка, идентичного пляжевому. Мощность отложений составляет 0.5–20 см, как правило, увеличиваясь по направлению к океану. Так как шурфы вдоль профилей закладывались часто (каждые 20–70 м), то шурф, в котором определен горизонт отложений встречался в последний раз, можно считать находящимся приблизительно на линии максимального заплеска цунами.

Определив положение линии заплеска цунами на измеренном топографическом профиле, мы получали такие параметры как: 1) высота цунами на линии заплеска; 2) максимальная высота цунами между линией заплеска и урезом воды (по максимальной высоте берегового вала, находящегося между двумя этими линиями); 3) горизонтальный заплеск.

При оценках вертикальных и горизонтальных заплесков палеоцунами нами была выполнена реконструкция положения береговой линии, существовавшей на момент цунами. Для этого мы использовали горизонты вулканических пеплов, маркирующих поверхность голоценовых аккумулятивных террас на момент своего выпадения в ходе вулканического извержения [3, 6, 7, 11]. Методика реконструкций береговых линий детально описана в [3].

Необходимо отметить, что реальная «максимальная высота цунами» – на самом деле может быть несколько выше полученной нами оценки, так как мы не знаем высоты столба воды между урезом и линией максимального заплеска. На линии же максимального заплеска высота цунами над земной поверхностью условно приравнивается к нулю.

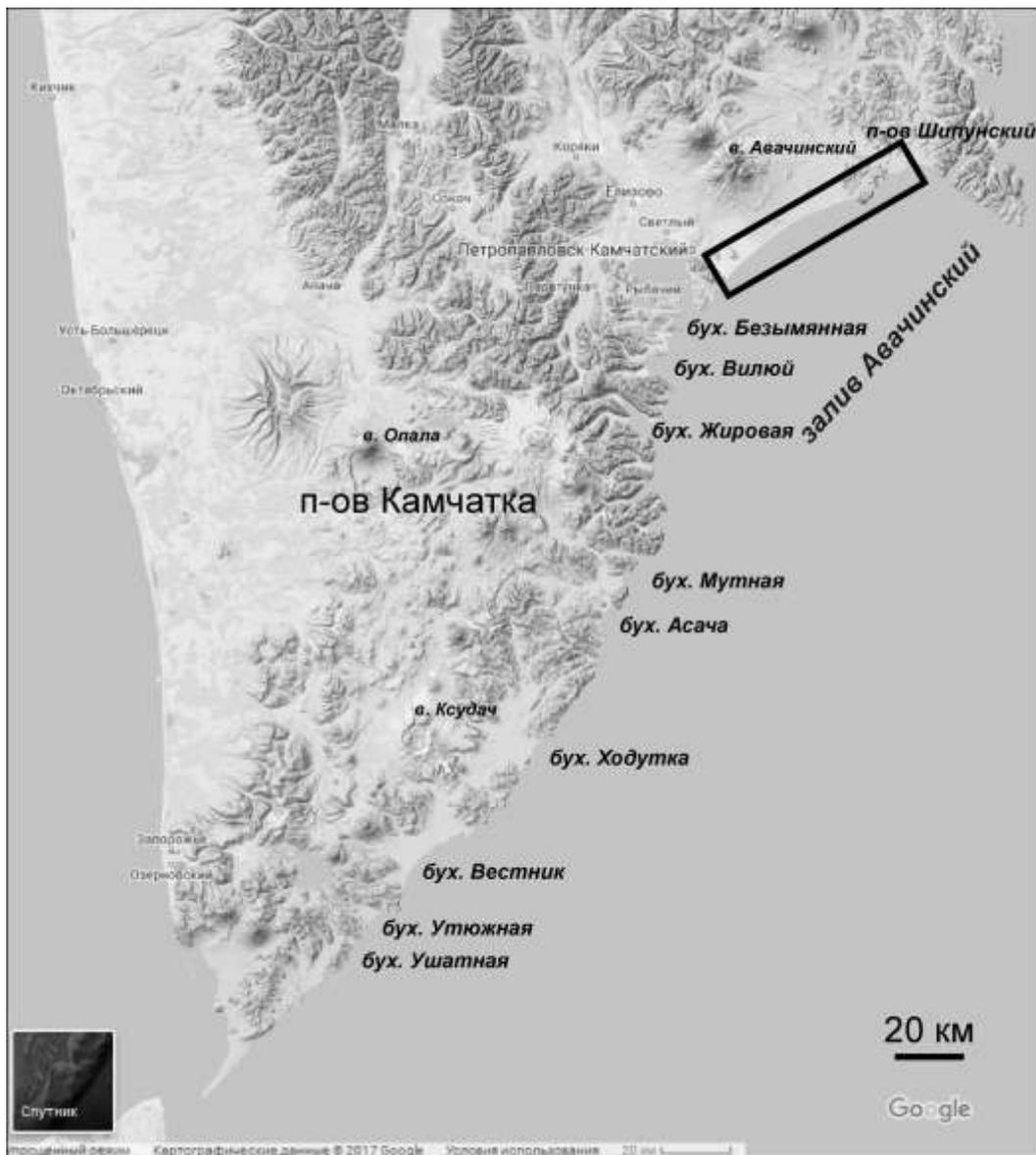


Рис. 1. Район детальных исследований на побережье Авачинского залива (прямоугольник) в 2015–2017 гг. Названиями отмечены бухты к югу от Петропавловска-Камчатского, для которых имеются данные по палеоцунами и косейсмическим деформациям на основе работ проведенных ранее

В ходе исследований мы изучали строение морской аккумулятивной террасы и искали следы косейсмических опусканий, запечатленных в виде погребенных уступов размыва. Подробно о погребенных уступах и методах их идентификации см. в [3; 4].

### **Полученные результаты и обсуждение**

В ходе проведенных экспедиционных исследований на морской аккумулятивной террасе на побережье Авачинского залива было заложено, описано и опробовано более 100 геологических шурфов; пробурены или вскрыты шурфами опорные торфяные разрезы, отобраны образцы тефры, отложений цунами и органики. На основе полученных данных была создана детальная тефростратиграфическая и геохронологическая шкала, выполнена реконструкция положения древних береговых линий, идентифицированы отложения цунами и следы косейсмических опусканий, сделаны оценки их повторяемости и параметров.

В опорных разрезах торфяников было выявлено 42 прослоя тефры, главную часть из них составляет тефра Авачинского вулкана (39 прослоев). Кроме тефры Авачинского вулкана в разрезах торфяников и почвенно-пирокластических чехлов присутствуют три горизонта транзитных пеплов крупнейших эксплозивных извержений удаленных вулканов. Это пеплы вулкана Ксудач и Опала (кратер Бараний Амфитеатр), прослеженные от источников и датированные радиоуглеродным методом [8].

Вдоль 9 топографических профилей измеренных на берегу Авачинского залива, мы выявили отложения пяти исторических цунами (1737, 1792, 1841, 1923 и 1952 гг.) [5]. Всего на побережье Авачинского залива нами были обнаружены отложения 33 цунами, 28 из них относятся к доисторическим, 32 события произошли после выпадения тефры АВ 3800 (~2250 г. до н.э.), а отложения самого древнего из выявленных здесь цунами залегают под этой тефрой, т.е. должны быть близки ей по возрасту (рис. 2). Более древняя летопись цунами здесь не сохранилась, в связи с отсутствием морской террасы соответствующего возраста. Это может быть связано с рядом факторов, среди которых основными являются повышение относительного уровня моря в среднем голоцене, и общее, хоть и незначительное, погружение центральной части побережья Авачинского залива на фоне периодически происходящих косейсмических опусканий.

Исторические землетрясения, сопровождавшиеся значительными цунами в Авачинском заливе, включали разные события, как по пространственному положению очагов (от южной части Кроноцкого залива до южной Камчатки), так и по магнитуде (в пределах  $M_w$  8–9) [5]. Величина горизонтальных заплесков всех исторических цунами по всем профилям составляет от 180 до 480 м, величины вертикальных заплесков находятся в пределах 3.5–6.3 м. Любопытен факт, что проявления цунами 1952 и 1737 гг. (имевших катастрофический характер на южной Камчатке и северных Курильских островах) на побережье Авачинского залива не отличаются от «рядовых» событий с  $M \sim 8$ –8.5. По полученным данным оказалось, что параметры палеоцунами сопоставимы с параметрами сильнейших исторических цунами, т.е. за последние тысячелетия в данном районе не случалось событий, значительно превышающих по своей интенсивности исторические. Средняя повторяемость цунами для последних ~4200 лет составила 118 лет.

В ходе исследований нами были выявлены следы трех косейсмических опусканий (произошедших в интервале 1100–1250, 2400–2450, 3300–3500 радиоуглеродных ( $^{14}\text{C}$ ), лет назад), запечатленных в строении морских аккумулятивных террас в виде погребенных уступов размыва (рис. 2). Они прослежены вдоль побережья Авачинского залива на протяжении около 70 км, для каждого уступа оценены величины амплитуды опускания, которые колебались в пределах от 0.3 до 1.3 м. Период времени между отдельными косейсмическими опусканиями составил ~1000–1200 лет (рис. 2).

Косейсмические опускания оказались сопоставимы по возрасту (одновозрастны?) с выявленными нами ранее [3] к югу от Петропавловска-Камчатского. Их амплитуды возрастают напротив южного сегмента зоны субдукции (на участке бухта Мутная – бухта Ушатная) до нескольких метров. Мы предположили, что выявленные на побережье Авачинского залива косейсмические деформации связаны с сильнейшими субдукционными землетрясениями ( $M_w \sim 9$ ) с широкими очаговыми зонами напротив южной Камчатки.

На южной Камчатке и северных Курильских островах по имеющимся геологическим и историческим данным, цунами 1737 и 1952 гг. имели вертикальные заплески свыше 15–20 м и горизонтальные заплески свыше 1000 м [1, 2, 3, 10]. Кроме того, данные по палеоцунами для южной Камчатки [3] также свидетельствуют, что величины их вертикальных и горизонтальных заплесков для многих событий значительно превышали выявленные на берегу Авачинского залива и были сопоставимы либо превышали заплески 1952 и 1737 гг. Отмеченные особенности в распределении высот цунами вдоль побережья и амплитуд косейсмических деформаций позволили сделать предположение о том, что отрезок зоны субдукции напротив южной Камчатки способен генерировать более сильные землетрясения и цунами по сравнению с ее северным сегментом.

Вероятно, обнаруженные нами различия в параметрах цунами и амплитудах косейсмических опусканий связаны с вариациями параметров зоны субдукции вдоль Камчатки. Причиной вариации может быть предполагаемое [9] увеличение сцепления (coupling) между Тихоокеанской и Охотской плитами вдоль зоны субдукции в южном направлении.

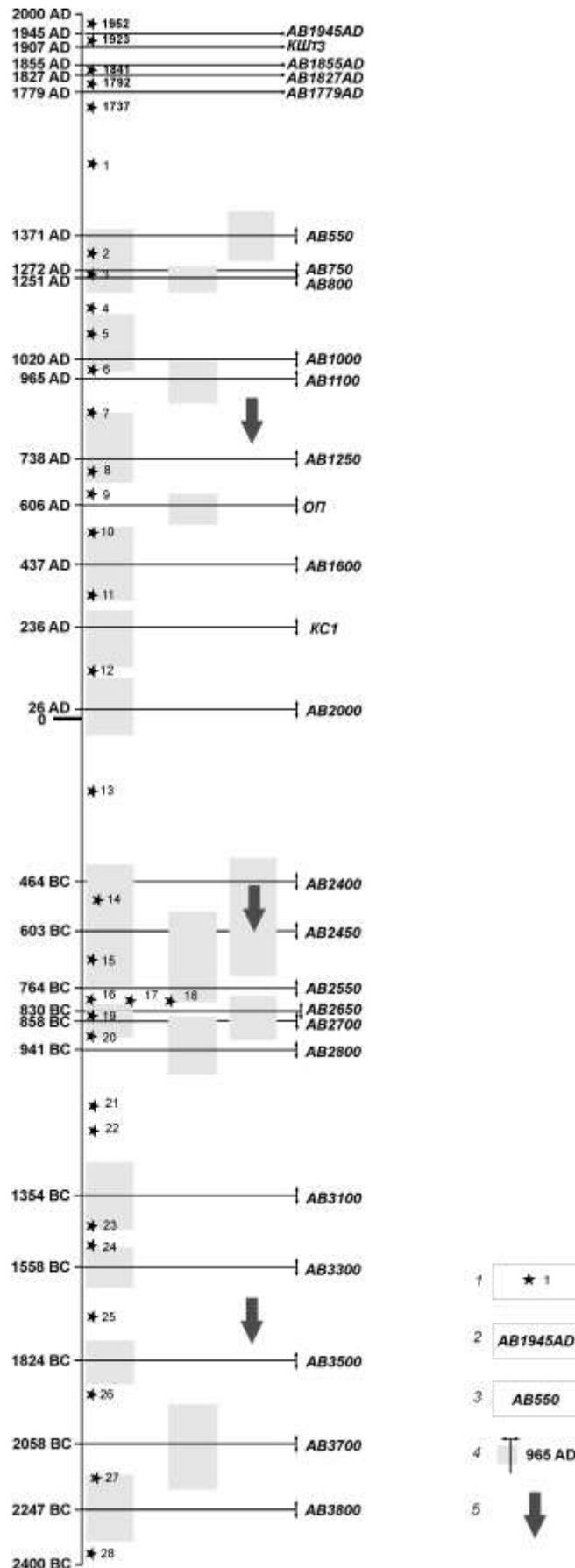


Рис. 2. Геохронологическая шкала для побережья Авачинского залива: 1 – отложения цунами и их порядковый номер (для палеоцунами); для исторических цунами указан год нашей эры (AD), например, 1737; 2 – индекс тефры исторических извержений; 3 – индекс тефры доисторических извержений; 4 – калиброванный календарный возраст извержения, лет (BC – до н.э., AD – н.э.) и погрешность его определения; 5 – косейсмические опускания

## Выводы

1. На побережье Авачинского залива выявлены отложения 33 цунами, пять из которых зафиксированы в исторических летописях (1737, 1792, 1841, 1923, 1952 гг.), а 27 произошли в интервале между ~2250 г. до нашей эры и 1737 г. нашей эры. Для выявленных событий восстановлены вертикальные и горизонтальные заплески с учетом положения палеобереговых линий.

2. Выявлены и прослежены вдоль ~70-километрового участка побережья геологические следы косейсмических опусканий, произошедших 1100–1250, 2400–2450, 3300–3500 <sup>14</sup>C, л.н.

3. Проведено сопоставление параметров цунами и амплитуд косейсмических опусканий на побережье Авачинского залива и вдоль южной Камчатки, сделан вывод о большем сейсмо- и цунамигенерирующем потенциале южного отрезка Камчатской зоны субдукции, вероятно связанного с увеличением сцепления (coupling) между Тихоокеанской и Охотской плитами в южном направлении.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 15-05-02651-а «Изучение голоценовых косейсмических деформаций побережья Авачинского залива (Камчатка) с целью оценки повторяемости субдукционных мегаземлетрясений ( $M \sim 9$ )», руководитель – Т. К. Пинегина.

## Список литературы

1. Заякин Ю.Я., Лучинина А.А. Каталог цунами на Камчатке. Обнинск: ВНИИГМИМЦД, 1987. 50 с.
2. Крашенинников С.П. Описание земли Камчатки: Том первый. Императорская Академия наук, 1786. 250 с.
3. Пинегина Т.К. Пространственно-временное распределение очагов цунамигенных землетрясений тихоокеанского и беринговоморского побережий Камчатки по отложениям палеоцунами: Автореферат докт. дис. Москва, 2014. 43 с.
4. Пинегина Т.К., Базанова Л.И., Зеленин Е.А., Кожурин А.И. Выявление голоценовых мегаземлетрясений вдоль Курило-Камчатской зоны субдукции // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Пятой научно-технической конференции. Обнинск: ГС РАН. 2015. С. 373–377.
5. Пинегина Т.К., Базанова Л.И. Новые данные о параметрах исторических цунами на побережье Авачинского залива (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Серия: науки о Земле. 2016. № 3. С. 5–17.
6. Пинегина Т.К., Кожурин А.И., Пономарева В.В. Оценка сейсмической и цунамиопасности для поселка Усть-Камчатск (Камчатка) по данным палеосейсмологических исследований // Вестник КРАУНЦ. Серия: науки о Земле. 2012. № 1. С. 138–159.
7. 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 // Вестник КРАУНЦ. Серия: науки о Земле. 2010. № 1. С. 224–231.
8. Braitseva O.A., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D., Bailey J. Holocene key-marker tephra layers in Kamchatka, Russia // Quaternary Research. 1997. V. 47. P. 125–139.
9. Burgmann R., Kogan M.G., Steblov G.M., Hilley G., Levin V.E., Apel E. Interseismic coupling and asperity distribution along the Kamchatka subduction zone // Journal Of Geophysical Research. 2005. V. 110. № B07405.
10. MacInnes B.T., Weiss R., Bourgeois J., Pinegina T.K. Slip distribution of the 1952 Kamchatka Great Earthquake based on near-field tsunami deposits and historical records // BSSA. 2010. V. 100. P. 1695–1709.
11. Pinegina T.K., Bourgeois J., Kravchunovskaya E.A., Lander A.V., Arcos M.E.M., Pedoja K., MacInnes B.T. A nexus of plate interaction: Segmented vertical movement of Kamchatsky Peninsula (Kamchatka) based on Holocene aggradational marine terraces // The Geological Society of America Bulletin. 2013 V. 125. №9/10. P. 1554–1568.
12. Woodroff S.A., Horton B.P. Holocene sea-level changes in the Indo-Pacific // Journal of Asian Earth sciences. 2005. V. 25 (1). P. 29–43.