

## ВЫЯВЛЕНИЕ ГОЛОЦЕНОВЫХ МЕГАЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ВДОЛЬ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ЗОНЫ СУБДУКЦИИ

*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](mailto:pinegtk@yandex.ru)

<sup>2</sup>*Геологический институт РАН, г. Москва*

### **Введение**

Вдоль побережья Камчатки, Курильских островов и Хоккайдо на протяжении последних более чем 20 лет проводилось изучение отложений цунами. К настоящему времени собрано большое количество данных по интенсивности и повторяемости цунами вдоль всей зоны субдукции, однако разные участки побережий изучены с разной степенью детальности и по разным методикам. К сожалению, в настоящее время невозможно провести надежную корреляцию выявленных отложений цунами между Японским, Курильским и Камчатским сегментами, и на основании протяженности охваченных цунами побережий выделить землетрясения с  $M \sim 9$ . Сильнейшие землетрясения обычно сопровождаются значительными цунами не только в ближней зоне, но и на берегах, расположенных в тысячах километрах от очага. В связи с глобальными последствиями, в последнее время во всем мире особое внимание уделяется вопросу изучения именно мегаземлетрясений. В данной публикации представлен альтернативный подход к выявлению таких событий вдоль зон субдукции, основанный на изучении геологических следов косейсмических деформаций на побережьях. Само наличие крупноамплитудных (первые метры) вертикальных деформаций свидетельствует о мегаземлетрясении, даже при отсутствии межрегиональной корреляции отложений цунами от этого события. В статье впервые приводятся данные по голоценовым мегаземлетрясениям напротив побережья Авачинского залива в голоцене.

### **Косейсмические деформации побережий**

Согласно геодезическим, а в последнее время и GPS данным, сильные межплитные землетрясения вызывают вертикальные косейсмические деформации на побережьях, расположенных даже в нескольких сотнях километров от глубоководных желобов. Наблюдения, проведенные после некоторых крупнейших исторических землетрясений (например, Чилийского 1960,  $M_w=9.5$ ; Аляскинского 1964,  $M_w=9.2$ ; Индонезийских 2004,  $M_w=9.5$  и 2005,  $M_w=8.6$ ; Японского Тохоку 2011,  $M_w=9.1$  и др.), показали, что земная поверхность, над ближайшей к желобу частью очага (на взброшенном крыле), во время субдукционного землетрясения испытывает поднятие. В то же время область, расположенная ближе к вулканической дуге, над более глубокой частью очага, опускается [4]. Амплитуды зарегистрированных на побережьях косейсмических поднятий достигали 4-6 м, амплитуды же опусканий не превышали 1-2 м [4]. Ось Курило-Камчатского желоба протягивается в 100-240 км от линии побережья Камчатки и Курильских островов. Из результатов компьютерного моделирования [2] следует, что лишь самые сильные межплитные землетрясения с широкими очаговыми зонами в 100-200 км способны вызвать заметные косейсмические опускания на побережьях крупных заливов. Таким образом, исследуя косейсмические деформации на побережьях Авачинского, Кроноцкого, Камчатского заливов, можно выявить наиболее сильные «мегаземлетрясения».

После косейсмического опускания на побережье происходит размыв береговых валов и формирование нового вала, перекрывающего более старый вал. Спустя некоторое время (первые годы - десятки лет) на берегу устанавливается новый профиль равновесия, размыв прекращается, и проградация берега возобновляется (при условии достаточного количества наносов). Место приращения древнего и молодого береговых валов соответствует погребенному уступу размыва (buried scarp) [2, 4]. Один из новых методов при поиске погребенных уступов на побережье – георадарные исследования. Погребенные уступы размыва на радарограммах представляют собой круто падающие в сторону моря границы, соответствующие стратиграфическим и угловым несогласиям. Не все погребенные уступы в отложениях морской террасы могут быть связаны с косейсмическими опусканиями побережья. Критерием для выделения именно косейсмических

уступов размыва служат их одновозрастность вдоль большого участка побережья и совпадение по возрасту с отложениями цунами, которое сопровождало землетрясение.

### Методика полевых исследований

Во время полевых исследований (рис. 1), перпендикулярно линии побережья измерялись топографические профили, вдоль них закладывались шурфы глубиной до 2.5 м (до чистого морского песка). В шурфах описывались геологические разрезы и идентифицировались вулканические пеплы (тефра) и отложения цунами. Возраст самой нижней по разрезу тефры примерно соответствует времени, когда активный береговой вал переходит в реликтовую стадию, и на нем начинает накапливаться почвенно-пирокластический чехол [2]. На побережье Авачинского залива в почвах залегают горизонты тефры преимущественно от извержений влк. Авачинский, Ксудач, Опала [1,3]. Частота крупных пеплопадов составляет здесь первые десятки – первые сотни лет, поэтому метод тефрохронологии для данного района является достаточно точным для датирования отложений и форм рельефа [1].

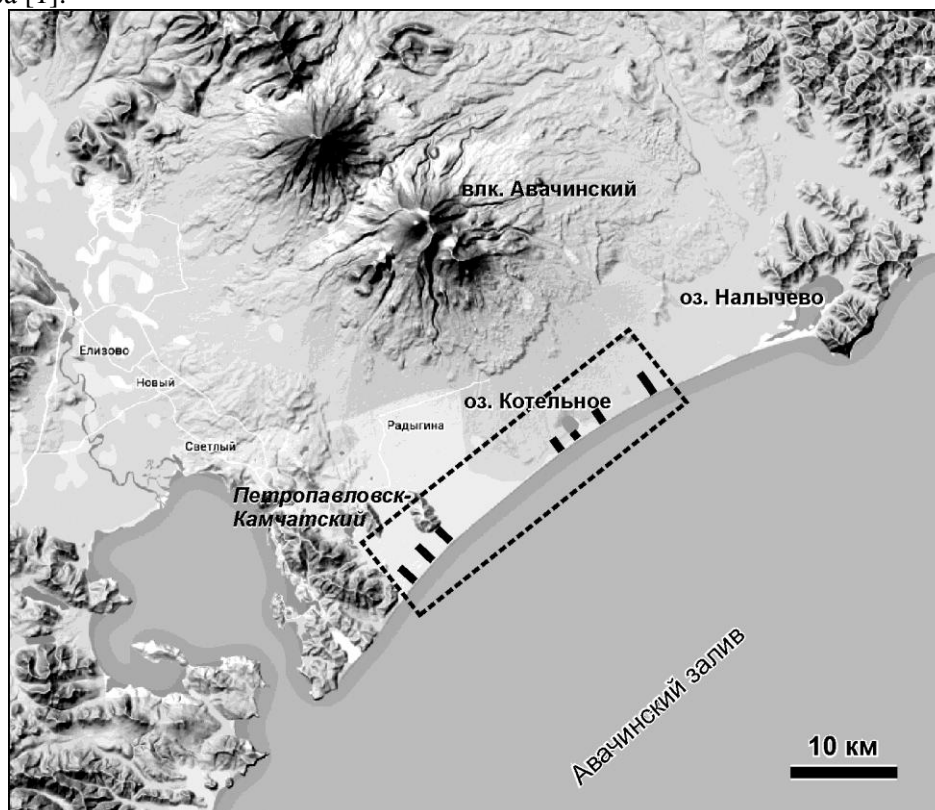


Рис. 1. Участок побережья Авачинского залива (пунктирный прямоугольник), на котором проведено изучение отложений цунами и косейсмических деформаций. Положение измеренных топографических профилей, вдоль которых изучались геологические разрезы, показано черными линиями.

В ходе исследования определялся возраст каждого берегового вала. В тех местах, где соседние береговые валы имели большую разницу в возрасте (более нескольких сотен лет), между шурфами вдоль топографического профиля измерялся георадарный профиль. При этом использовался георадар «Око» фирмы «Логис» и экранированный антенный блок с центральной частотой 250 МГц. На полученных радарограммах намечались участки, где мог находиться погребенный уступ размыва. После этого уступ вскрывался канавой, описывался геологический разрез, и с помощью метода тефрохронологии определялось время образования уступа. В шурфах расположенных от вскрытого уступа вглубь суши определялись горизонты с отложениями цунами, одновозрастными со вскрытым уступом, и, таким образом, подтверждалась его косейсмическая природа [2].

### Полученные результаты

В районе исследования вкост простирания береговых валов было измерено 7 топографических профилей, вдоль них выкопано и описано 80 шурфов. В южной части обследованного участка побережья (в районе Халактырского пляжа), возраст наиболее древнего

берегового вала составил  $\sim 3300$   $^{14}\text{C}$  лет [3]. В северной части, в районе оз. Котельное и р. Правая Котельная сохранились береговые валы с возрастом 3700-3800  $^{14}\text{C}$  лет [1]. После того, как каждый береговой вал был датирован, вдоль профилей наметились участки с сильно различающимися по возрасту соседними береговыми валами. Между ними должны были находиться погребенные уступы размыва. Поэтому здесь было проведено георадарное зондирование (рис. 2). По радарограммам намечался участок, где мог находиться погребенный уступ, и в этом месте выкапывалась канава (рис. 3).

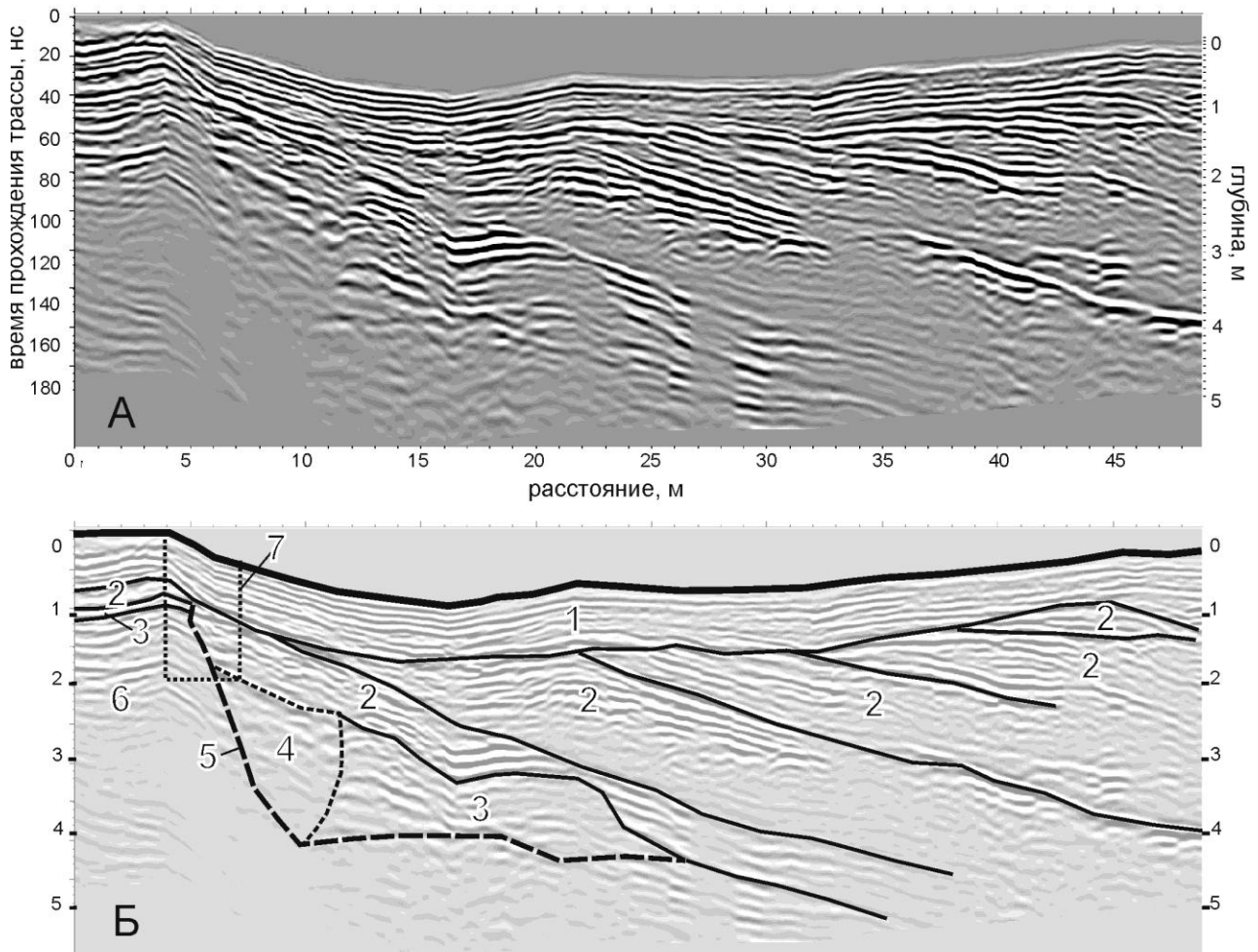


Рис. 2. Георадарный профиль (А) через погребенный уступ размыва, показанный на рис. 3. На (Б) представлена интерпретация радарограммы: 1 – почвенно-пирокластический чехол; 2 – штормовые отложения, образованные на фазе аккумуляции морской террасы после прекращения размыва (черные наклонные линии соответствуют типичной слоистости отложений пляжа); 3 – штормовые отложения, образованные во время размыва морской террасы после косейсмического опускания; 4 – съехавшие и оторванные с бровки уступа куски почвенно-пирокластического чехла в матриксе штормовых отложений; 5 – погребенный уступ размыва; 6 – не размытая часть древней морской террасы; 7 – контур канавы, показанной на рис. 3.

Всего было обнаружено и изучено три погребенных уступа размыва (рис. 4). С помощью метода тефрохронологии [1, 3] мы определили, что уступ №1 образовался 1150 – 1250  $^{14}\text{C}$  лет назад, уступ №2 – 2400—2500  $^{14}\text{C}$  лет назад, уступ №3 – 3300—3500  $^{14}\text{C}$  лет назад. В шурфах на морской аккумулятивной террасе были найдены отложения цунами, одновозрастные с уступами размыва. Таким образом, события цунами подтверждают косейсмическую природу выявленных уступов.

### Закключение

Изучение геологических следов вертикальных косейсмических деформаций на побережьях расположенных вдоль зон субдукций позволяет выделить наиболее сильные землетрясения на фоне других цунамигенных землетрясений.

Впервые на побережье Авачинского залива были выявлены следы трех таких землетрясений, сопровождаемых и цунами и косейсмическими опусканиями (амплитуда опусканий составила  $\sim 1 \pm 0.5$  м). Землетрясения произошли  $1200 \pm 50$ ,  $2450 \pm 50$  и  $3400 \pm 100$   $^{14}\text{C}$  лет назад (в среднем раз в  $\sim 1000$ - $1200$  лет). Отметим, что со времени последнего события прошло около 1200 лет.

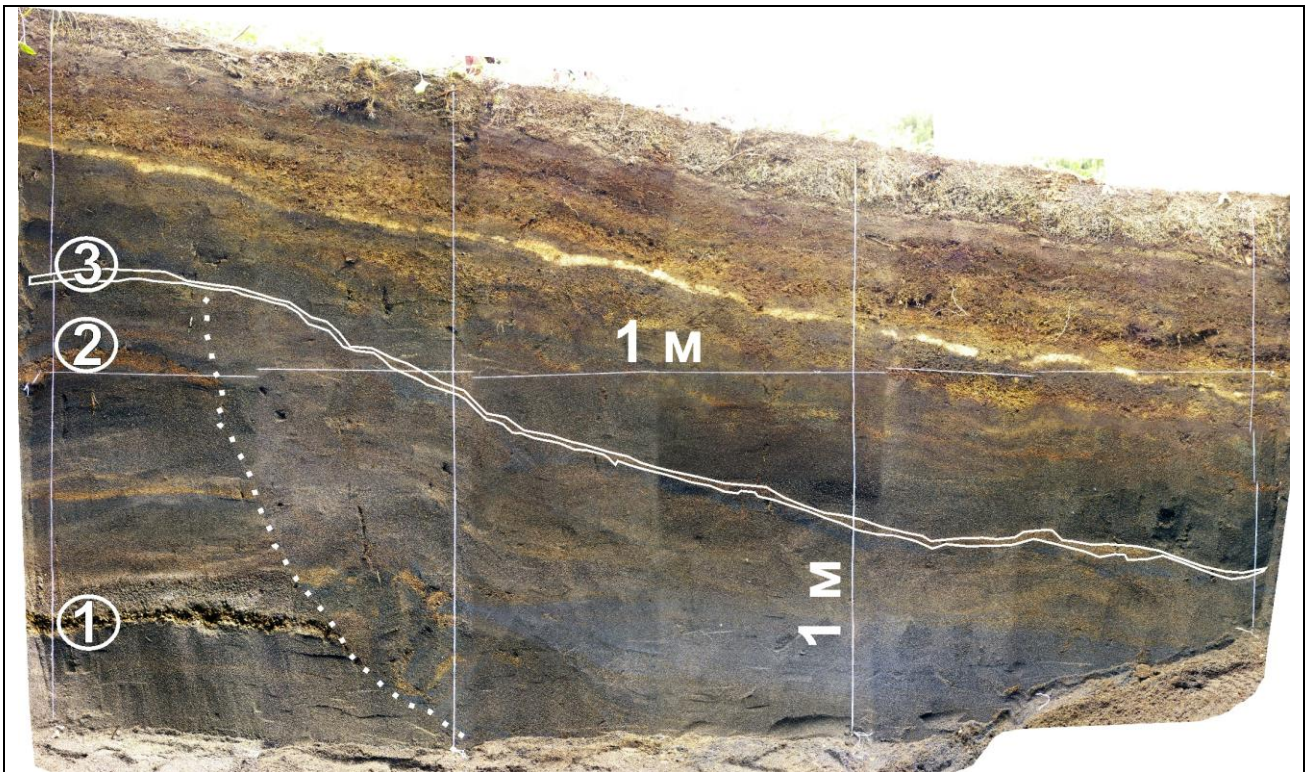


Рис.3. Вскрытый в стенке канавы погребенный уступ размыва №2 (точечный пунктир). Канавка заложена перпендикулярно простиранию берегового вала, море находится справа. Цифрам 1, 2, 3 соответствуют горизонты тефры возраста  $2650$   $^{14}\text{C}$ ,  $2500$   $^{14}\text{C}$ ,  $2400$   $^{14}\text{C}$  лет. Белой линией обведен горизонт тефры 3, перекрывающей уступ. Возраст уступа  $2450 \pm 50$   $^{14}\text{C}$  лет.

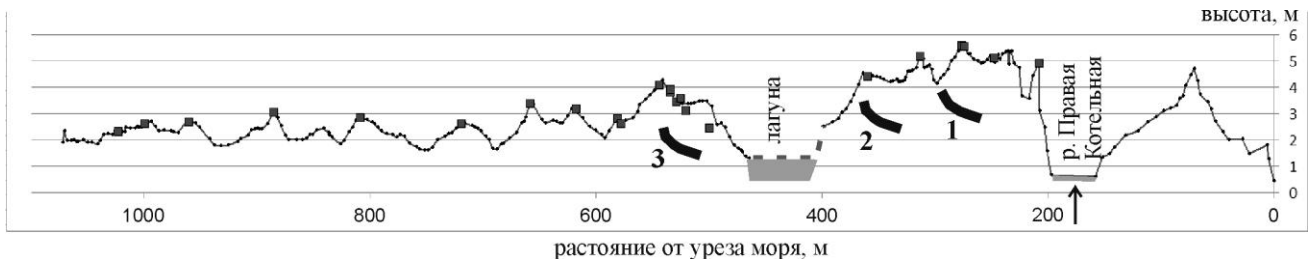


Рис. 4. Один из измеренных через морскую террасу топографических профилей. Высота указана относительно пункта государственной геодезической сети (уровень моря на момент замера составил  $+0.5$  м). Положение шурфов на профиле показано серыми квадратиками. Положение выявленных погребенных уступов (1-3) показано жирными черными линиями.

Работа проведена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 15-05-02651 - а

#### Список литературы

1. Базанова Л.И., Брайцева О.А., Мелекесцев И.В. и др. Катастрофические извержения Авачинского вулкана (Камчатка) в голоцене // Вулканология и сейсмология. 2004. № 6. С.15-20.
2. Пинегина Т.К. Пространственно-временное распределение очагов цунамигенных землетрясений тихоокеанского и беринговоморского побережий Камчатки по отложениям палеоцунами: Автореферат докт. дис. Москва, 2014. 43 с.
3. Пинегина Т.К., Буржуа Д., Базанова Л.И. и др. Отложения цунами и анализ цунамиопасности на Халатырском пляже в районе Петропавловска-Камчатского // Локальные цунами: предупреждение и уменьшение риска. Москва: Янус-К, 2002. С. 142-151.
4. MacCalpin J.P. Paleoseismology. International Geophysics series. 2009. V. 95. P. 612.