ЦУНАМИГЕННЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА ЗАПАДНОМ ОБРАМЛЕНИИ КОМАНДОРСКОЙ КОТЛОВИНЫ БЕРИНГОВА МОРЯ (ПО ДАННЫМ ПАЛЕОЦУНАМИ)

Т.К. Пинегина

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, pinegtk@yandex.ru

Введение

В период с 1998 по 2009 гг. на побережье Берингова моря проводились работы по изучению отложений палеоцунами. За время исследований был изучен участок берега общей протяженностью около 360 км (рис. 1). Во время работ на побережье измерялись топографические профили от уреза воды вкрест простирания береговых валов, вдоль профилей закладывались шурфы. В шурфах описывались отложения цунами и вулканические пеплы, из разрезов отбирались образцы на радиоуглеродный, гранулометрический, минералогический и др. виды анализов. Датирование отложений цунами проводилось преимущественно с помощью метода тефрохронологии (по вулканическим пеплам, изученным и датированным ранее). На всех изученных участках побережья Берингова моря использовались следующие маркирующие горизонты вулканических пеплов: от исторических извержений в. Шивелуч 1964 и 1854 гг., доисторических извержений в. Шивелуч около 1650 г.н.э. (Ш₁), около 600 г. н.э. (Ш₁₄₅₀), и доисторического извержения вулкана Ксудач около 250 г.н.э. (КС₁) [3-4, 6-7].



Рис. 1. Районы исследований на побережье Берингова моря (прямоугольники).

Полученные данные

Временной промежуток 1964–2000 гг. н.э. был описан в 142 шурфах. В этот промежуток в Беринговом море произошло сильное Озерновское землетрясение 1969 г. с $M_W = 7.8$ [2]. Отложения цунами от этого землетрясения были идентифицированы в 83 шурфах. В 1 шурфе в районе р. Столбовой и в 1 шурфе на п-ове Озерном максимальная высота волны цунами составила 10 м, в основном же вертикальные заплески этого цунами не превышали 7-8 м.

Временной промежуток 1854–1964 гг. н.э. был описан в 130 шурфах. В 7 шурфах (только в районе устья р. Столбовой) обнаружено два цунамигенных горизонта, причем они расположены под пеплом катастрофического извержения в. Безымянный 1956 г., т.е. ни одно из двух событий не связано с Чилийским трансокеаническим цунами 1960 г. В 63 шурфах был идентифицирован лишь один цунамигенный горизонт.

Таким образом, в историческое время (считается, что постоянная летопись на Камчатке ведется с 1737 г.) в Беринговом море произошло два не отмеченных в летописях цунами. Распределение высот цунами вдоль берега для одного из них сходно с распределением цунами 1969 г., однако отложения этого цунами не были найдены на юге о-ва Карагинский. Из макросейсмических описаний [1], известно, что 22.02.1861 сильное землетрясение ощущалось на о. Беринга (8-9 баллов) и на о. Медный (5-6 баллов). Возможно, именно с этим землетрясением связан цунамигенный горизонт на Беринговоморском побережье Камчатки.

Источник второго цунами располагался в южной части залива Озерной, т.к. отложения цунами были найдены в устье р. Столбовой и не обнаружены на п-ове Озерном. Можно предположить, что это цунами связано с землетрясением 1945 г. с М ~7.3, произошедшим напротив р. Столбовой [2]. Однако, судя по высоте заплеска в 5-9 м, это маловероятно, если только землетрясение не спровоцировало оползень в районе каньона Покатый.

Временной промежуток ~1650–1854 гг.н.э. был описан в 114 шурфах. В 48 шурфах было идентифицировано по одному горизонту отложений цунами. Отложения этого цунами были обнаружены во всех районах исследований, однако на о-ве Карагинский – лишь на самом юге (п-ов Крашенинникова), что хорошо согласуется с единичной находкой отложений в Укинском заливе. Вероятно, очаг цунамигенного землетрясения располагался к югу от очага 1969 г. В восьми шурфах, заложенных в районе устья р. Столбовой и на п-ове Озерной, было найдено по два цунамигенных горизонта, причем, на п-ове Озерном высота цунами была примерно в 1.5 раза ниже, чем на р. Столбовой.

Временной промежуток ~600–1650 гг.н.э. был описан в 95 шурфах. В 29 шурфах в этом промежутке был выделен один горизонт отложений цунами. Два цунамигенных горизонта были выявлены во всех изученных районах в 16 шурфах. При этом, максимальные высоты волн распределены по разному – одно событие проявилось сильнее на п-ове Озерной (8.5 м) и на Столбовой (9.5 м), с меньшими высотами в Уке и на о. Карагинском (4 и 6 м соответственно). Характер распределения высот очень похож на распределение высот цунами 1969 г. Второе же событие проявилось очень сильно повсеместно – в т.ч. с заплеском 7 м на о-ве Карагинский и 9 м в Уке. Вероятно, очаг землетрясения располагался напротив южной части пролива Литке.

В 13 шурфах во всех районах, кроме Уки, обнаружены отложения трех цунами. Высота этих шурфов на юге о-ва Карагинский составила 4-5 м, на п-ове Озерной и на р. Столбовая – 7 м, в каждом районе также есть по одному шурфу с максимальным заплеском 8.5-9.5 м. На максимальной высоте шурфы, в которых было обнаружено по три горизонта цунами, находятся на побережье залива Озерной.

В 3 шурфах на п-ове Озерной, на высоте не более 5.5 м над уровнем моря, в этот временной промежуток было выделено четыре горизонта отложений цунами.

Временной промежуток ~250–600 гг. н.э. описан в 88 шурфах. По 1 горизонту цунами было выявлено в 24 шурфах в устье р. Столбовой (максимальный заплеск более 9 м), на п-ове Озерном (8.5 м) и на о. Карагинском (до 5.5 м). Судя по распределению высот исторического цунами 1969 г., очаг цунамигенного землетрясения мог находиться несколько к югу от п-ова Озерной.

Ниже приведен график распределения количества цунамигенных горизонтов для всего исследованного промежутка времени (250–2000 гг. н.э.) в зависимости от горизонтального заплеска цунами (рис. 2).



Рис. 2. График, показывающий зависимость количества палеоцунами (штук) от величины горизонтального заплеска (м) (по данным за последние ~2000 лет).

Если рассматривать все районы вместе, то количество горизонтов отложений цунами закономерно уменьшается с увеличением расстояния вглубь берега. Эта же зависимость справедлива и для всех районов по отдельности, кроме о-ва Карагинский, где количество шурфов недостаточно для выявления какой-либо закономерности в их распределении. Кроме того, на графике видно, что подавляющее количество шурфов, где были обнаружены отложения цунами, расположены на расстоянии до 300 м от уреза воды, и лишь в единичных случаях горизонтальный заплеск цунами составлял 300-450 м – как правило, по долинам рек.

На рис. 3. представлен график распределения количества цунамигенных горизонтов для всего исследованного промежутка времени (250-2000 гг. н.э.) в зависимости от вертикального заплеска цунами. Распределение точек в левой части графика отображает лишь тот факт, что высоты большинства шурфов превышали 3-4 м, так как закладывались они выше уровня штормовой досягаемости в Беринговом море. На более низких высотах находились шурфы, заложенные либо в торфяниках за береговыми валами, либо на низких речных террасах. Поэтому, если принимать во внимание лишь шурфы с высотами более 3-4 м, то, как и следовало ожидать, наблюдается уменьшение количества цунами с увеличением высоты шурфов над уровнем моря. Эта зависимость видна и для отдельных районов, с разницей лишь в значениях количества цунамигенных горизонтов и высот шурфов. Максимальные высоты цунами (за последние ~2000 лет) на побережье Берингова моря не превышали 10 м.



Рис. 3. График, показывающий зависимость количества палеоцунами (штук) от величины вертикального заплеска (м) (по данным за последние ~2000 лет).

На рис. 4 показано пространственно-временное распределение реконструированных событий цунами в Беринговом море для последних ~2000 лет. На рисунке также показаны данные по 17 топографическим профилям и 52 шурфам на полуострове Камчатский (фактические данные для п-ва Камчатский подробно представлены в работах [4, 10] и в данной статье не излагаются). Нет какихлибо оснований считать, что цунами на п-ове Камчатский и в Берингии были от единых источников. Возможно, они были от разных событий, сближенных во времени. В связи с этим, на рис. 4 линии, протягивающиеся к п-ову Камчатский, показаны пунктиром.

Следует подчеркнуть, что временная последовательность землетрясений внутри отдельных промежутков времени между пеплами неизвестна, т.е. принимается, что любое событие внутри временного промежутка могло произойти в любое время с равной долей вероятности. Это связано с тем, что в настоящее время нет методов, способных дать точную возрастную привязку и корреляцию событий цунами на разных побережьях (ошибки радиоуглеродного датирования составляют несколько десятков - несколько сотен лет). Имеются лишь данные о количестве цунамигенных

горизонтов для разных районов внутри временного промежутка между двумя соседними вулканическими пеплами. Кроме того, необходимо учитывать и вероятность сегментации очагов цунамигенных землетрясений. Иными словами, отложения единичного цунами, выделенного в разных районах, на самом деле могут объединять несколько цунами от сейсмических событий, сближенных во времени. Однако, т.к. высота цунами зависит от магнитуды землетрясения, очаги с малой протяженностью и небольшой магнитудой, как правило, не могут генерировать цунами, достаточно большие для того, что бы они смогли оставить геологические следы на берегу. Поэтому, на взгляд автора, высока вероятность того, что выделенный вдоль побережья отдельный горизонт отложений представляет геологические следы одного сейсмического события.



Рис. 4. Реконструкция зон воздействия отдельных цунами на Камчатское побережье Берингова моря. Очаги исторических цунами 1969 и 1971 гг. показаны овалами. Полупрозрачные зоны с серой заливкой соответствуют участкам детальных исследований (с севера на юг): на о. Карагинский, в Укинском заливе, на пове Озерном, в устье р. Столбовой, на пове Камчатском. События цунами (черные столбцы) распределены условно равномерно в промежутках между вулканическими пеплами (серые линии).

Очаговые зоны цунами, как правило, меньше (короче) зон воздействия волн цунами на побережье, восстановленных по геологическим данным. Это хорошо иллюстрируется на примере цунами 1969 г. По протяженности облака афтершоков первых нескольких дней, длина очага землетрясения не превысила 150 км, а длина побережья, охваченная цунами с высотой <5 м, составила 230-250 км. С размерами очага землетрясения хорошо согласуется длина побережья испытавшего максимальные заплески с высотами ≥7-8 м.

Очаг цунами 1971 г. (рис. 4) находился не в Берингом море [2]. Высокие заплески этого цунами (ц1971 на рис. 4) были выявлены лишь в южной части п-ова Камчатский [9] – там, где цунами 1969 г. уже не оставило геологических следов на побережье. Очевидно, что все очаги палеоземлетрясений в Беринговом море ограничены с юга западным окончанием Алеутской дуги и в Камчатский залив не продолжаются.

Заключение

По палеосейсмологическим данным, за последние ~2000 лет в Беринговом море произошло 10 цунамигенных землетрясений с магнитудами Мt в интервале 7.0 – 8.1 (таблица 1). Минимальная повторяемость сильных (свыше 3 м) цунами для побережья залива Озерной, п-ова Озерной и Укинского залива составила 70 лет, для пролива Литке – 280 лет (таблица 2).

Основная особенность проявлений цунами в Беринговом море – относительно короткие горизонтальные заплески на суше (первые сотни метров) и высоты в пределах 10 м.

Цунами на беринговоморском побережье Камчатки представляют реальную угрозу для населения, т.к. большинство поселков расположено на узких косах в устьях рек, на высоте 4-5 м над уровнем моря.

Таблица 1. Рассчитанные магнитуды цунамигенных землетрясений Мt и Мw для Камчатского побережья Берингова моря.

	Столбовая	Озерной	Ука	Карагинский	Протяженность			
					побережья	Mt*	Mw**	Инструмента
					испытавшего			льная
					воздействие			магнитуда
	Hm	Hm	Hm	Hm	цунами			
1964-2000 гг.								
землетрясение 1								
(1969 г.)	7-9.5	7-10	2.5-4	4-4.5	230-250	7.9	7.7-8.2	7.8-8.0
1854-1964 гг.								
землетрясение 2								
(1945 г.?)	7-9.5	0	0	0	<100	7.3	7.2-7.6	7.3
землетрясение 3								
(1861 г.?)	7-9.5	7.5-10	4	0	200	7.9	7.6-7.9	
1650-1854 гг.								
землетрясение 4	6-8	4.5-5.5	0	0	150-180	7.5	7.4-7.8	
землетрясение 5	7-9.5	5.5-7	1	4	230-250	7.8	7.7-8.2	
600-1650 гг.								
землетрясение 6	0	5.5-5.8	0	0	60-80	7.0	7.0-7.4	
землетрясение 7	7-9	7-8.5	0	4-5	230-250	7.8	7.7-8.2	
землетрясение 8	7-9	7-8.5	4	5-6.3	230-250	8.0	7.7-8.2	
землетрясение 9	8-9	7-8.5	8.5	6-7	230-250	8.1	7.7-8.2	
250-600 гг.								
землетрясение								
10	7-9	7-8.5	0	5-5.5	230-250	7.8	7.7-8.2	

* по Абе [5], Mt = 2log Hm + 6.6, где Hm - значение местной средней максимальной высоты волн в метрах. На основании сравнения Mt для 1969 г. с инструментальной магнитудой, коэффициент в формуле Абе для Берингова моря понижен с 6.6 до 6.3 (Mt = 2log Hm + 6.3).

** На основе корреляционных зависимостей Вэлса-Копперсмита [11], учитывающих лишь протяженности очаговой зоны землетрясения, которая примерно соответствует длине ближайшего к очагу побережья, испытавшего наиболее сильное воздействие цунами [8].

	Таблица 2	2. Средн	ие периоды	повторяемо	ости цунам	игенных	землетрясений	в Беринговом
море,	рассчитанны	ле для вр	ременных пр	омежутков м	ежду изве	стными ву	лканическими п	еплами.

Беригово море	250-2000 гг.н.э. (средняя	1650-2000 гг.н.э.	600-1650 гг.н.э.	250-600 гг.н.э.
(без п-ва	повторяемость цунами за	(повторяемость за	(повторяемость за	(повторяемость за
Камчатский)	~1750 лет)	~350 лет)	~1050 лет)	~350 лет)
	175	70	262	350
п-ов				
Камчатский	146	70	350	88

Список литературы

1. Годзиковская А.А. Каталог макросейсмических описаний землетрясений Камчатки за доинструментальный период наблюдений (XVIII-XIX вв.). Обнинск: ГС РАН, 2009. 140 с.

2. Гусев А.А. Сильные землетрясения Камчатки: расположение очагов в инструментальный период // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 39-42.

3. Пинегина Т.К., Кожурин А.И., Пономарева В.В. Оценка сейсмической и цунамиопасности для поселка Усть-Камчатск (Камчатка) по данным палеосейсмологических исследований // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. №1, выпуск 19. С. 138-159. 4. 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. Науки о Земле. 2010. № 1, выпуск № 15. С. 231-247.

5. Abe K. // J. Seismol. Soc. Japan. 1999. V. 52. P. 369-377.

6. 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 // GSA bulletin. 2006. V.118. N 3-4. P. 449-463.

7. Dirksen V., Dirksen O., Diekmann B. Holocene vegetation dynamics and climate change in Kamchatka Peninsula, Russian Far East // Review of Palaeobotany and Palynology. 2013. V. 190. P. 48–65.

8. Geist E., Dmowska R. Local tsunamis and distributed slip at the source // Pure appl. geophys. 1999. V. 154. P. 485–512.

9. Martin M. E., Weiss R., Bourgeois J., Pinegina T. K., Houston H., Titov V. V. Combining constraints from tsunami modeling and sedimentology to untangle the 1969 Ozernoi and 1971 Kamchatskii tsunamis // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. L01610.

10. 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. doi: 10.1130/B30793.1.

11. Wells D.L., Coppersmith K. J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // Bulletin of the Seismological Society of America. 1994. Vol. 84. No. 4. P. 974-1002.