



УДК 551.248

Т. К. Пинегина

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

Пространственно-временное распределение очагов цунамигенных землетрясений вдоль Тихоокеанского побережья Камчатки за последние ~2000 лет

Вдоль побережья восточной Камчатки и северных Курильских островов выявлены и коррелированы следы палеоцунами за последние ~2000 лет, восстановлены их параметры (высота и дальность заплеска) и повторяемость. На основе соотношений Абе [10] и Вэлса-Копперсмита [24], использующих высоты цунами на берегу, ближайшем к источнику и протяжённость побережий, охваченных максимальными по высоте цунами, были определены магнитуды M_t и M_w цунамигенных палеоземлетрясений.

Введение

Несмотря на то что, на Земле цунами происходят ежегодно, сильные и катастрофические цунами — явление достаточно редкое, и для большинства отдельно взятых побережий каталог этих событий короток. Использование только известных исторических данных недостаточно для получения качественных и количественных оценок цунамиопасности. Однако все сильные цунами оставляют следы на побережьях, изучение которых на восточной Камчатке и северных Курилах позволило получить обширный материал о проявлениях цунами в прошлом и продлить существующий каталог сильнейших цунамигенных землетрясений на ~2000 лет.

Методика исследований

В ходе исследований использовался комплекс как традиционных методов (включающих дешифрирование и интерпретацию материалов дистанционного зондирования, полевые геоморфологические и геологические исследования, детальную топографическую съёмку), так и сравнительно новых методов (таких как георадарное зондирование, тефрохронология и тефростратиграфия, картирование отложений цунами и эрозионных цунамигенных форм рельефа, выявление погребённых уступов размыва, связанных с косейсмическими опусканиями побережий). Подробно методика изучения отложений цунами изложена в работах [6, 13, 15–20]. Поэтому остановимся лишь на основных моментах.

К основным отличительным особенностям тех отложений палеоцунами, которые удаётся идентифицировать, относятся: 1) приуроченность к полосе побережья вне зоны штормовой досягаемости и к различным гипсометрическим уровням, примерно до 30–40 м над уровнем моря; 2) присутствие в отложениях морского песка и окатанной гальки (песчано-галечные отложения более всего характерны для открытых побережий с высокой энер-

гией волн); 3) незначительная мощность отложений (от нескольких миллиметров до нескольких десятков сантиметров); 4) значительно больший (по сравнению со штормами) характерный период повторяемости образования отложений (десятки — сотни лет).

При поиске и идентификации отложений цунами изучались разрезы с хорошо развитой почвой или торфом, т. к. вмещающие отложения не должны содержать штормовые, эоловые или иные прослои сложенные морским песком. Шурфы закладывались на тех участках побережья, которые на момент цунами находились на большом удалении от побережья (сотни метров — первые километры). При выборе мест для закладки шурфов, в первую очередь отмечались участки с наибольшей скоростью накопления рыхлых вмещающих отложений (например, котловины заросших озёр, торфяники на месте заросших лагун. Для оценки высот и дальности заплесков палеоцунами проводилась реконструкция положения древней береговой линии и высоты рельефа побережья на момент события (методика описана в работах [7–8, 22]).

Результаты изучения отложений палеоцунами

Отложения палеоцунами на побережье Камчатского залива. Районы исследований включили: морскую аккумулятивную террасу на правом берегу р. Камчатка (рядом с пос. Усть-Камчатск), побережье в районе впадения рек Быстрая (Кумрочевская), Адриановка, Сторож, Малая Чажба, Большая Чажба. Длина береговой линии Камчатского залива составляет около 150 км, длина побережья охваченного исследованиями — порядка 70 км. В ходе обработки полученных материалов были использованы данные по 16 топографическим профилям и 142 шурфам, шурфы закладывались на высоте от 0 до 17 м и на расстоянии от уреза от 70 до 1750 м.

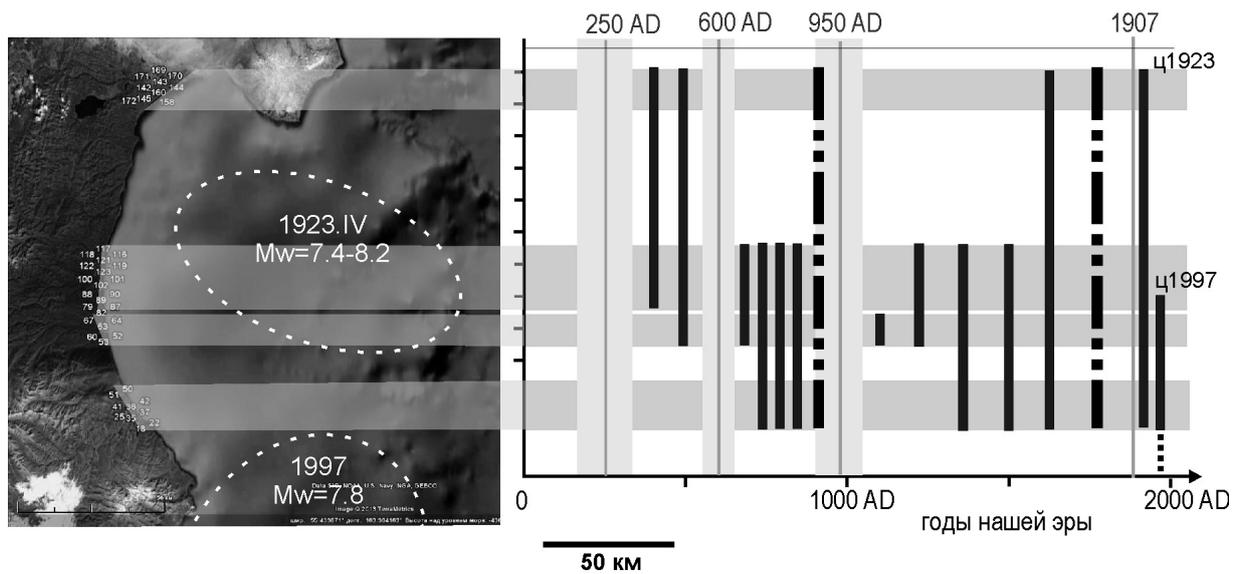


Рис. 1. Реконструкция зон воздействия отдельных цунами на побережье Камчатского залива. События цунами (чёрные столбцы) распределены условно равномерно в промежутках между вулканическими пеплами (тонкие серые линии) [1–2, 5, 11, 14, 23, 25]. Светло-серые полосы соответствуют погрешности в определении возрастов вулканических пеплов. Чёрные столбцы с двойным точечным пунктиром — отложения цунами, сопряженные с землетрясениями, вызвавшими косейсмические опускания побережья. Очаги исторических цунами 1923 и 1997 гг. показаны овалами [3–4]. Зоны с серой заливкой соответствуют районам детальных исследований (с севера на юг): район Усть-Камчатка, устье рек Быстрая и Адриановка, устье р. Сторож, устья рек Малая и Большая Чажмы.

На рис. 1 показано пространственно-временное распределение реконструированных зон воздействий цунами на побережье Камчатского залива для последних ~2000 лет.

Землетрясения, сопровождавшиеся косейсмическими деформациями на побережье (произошедшие около 1000 л. н. и несколько сотен л. н.), по-видимому, имели единые протяжённые очаговые зоны. С севера они ограничивались западным окончанием Алеутской островной дуги, а на юг они могли продолжаться и в Кроноцкий залив. Сравнивая высоты и горизонтальные заплески исторических цунами с параметрами палеоцунами, можно утверждать, что цунами 13 апреля 1923 г. с M до 8,2 по А. А. Гусеву [3] являлось одним из наиболее сильных за последние ~2000 лет. Однако, наличие двух событий, сопровождавшихся крупноамплитудными (до нескольких метров) косейсмическими опусканиями на берегу, может свидетельствовать о возможности возникновения в Камчатском заливе катастрофических землетрясений с $M > 8,2$ с периодом повторяемости примерно раз в тысячу лет. Средняя повторяемость цунами с высотами свыше 3–4 м в Камчатском заливе составляет 125–145 лет. По аналогии с историческими землетрясениями, их магнитуды можно оценить как $M \geq 7,5$.

Отложения палеоцунами на побережье Кроноцкого залива. Отложения цунами на побережье Кроноцкого залива изучены в меньшей степени, чем в других районах. Исследования были проведены лишь в районе устья р. Жупановой (южная часть

Кроноцкого залива) в 1995–1996 гг. Во время исследований не проводились инструментальные измерения топографических профилей, отсутствовала географическая (GPS) привязка шурфов. Тем не менее, разрезы, заложенные в торфяниках, сохранили достаточно полную летопись древних цунами [6, 21].

Основная часть шурфов располагалась на низкой морской террасе высотой около 5 м и на расстоянии до 500–700 м от современного уреза воды. Средний период повторяемости цунами с высотами >3 –5 м составляет в Кроноцком заливе около 105 лет (по данным за последние ~2000 лет). За период исторических наблюдений здесь произошло пять событий — в 1737, предположительно в 1841(?), феврале 1923¹, 1952 и 1960 гг. [3–4].

Отложения палеоцунами на побережье Авачинского залива. Районы исследований включили бухты Жировая, Большой Виллюй, Безымянная и Халактырский пляж. Условная географическая граница между Авачинским заливом и южной Камчаткой проводится обычно по мысу Поворотный. При анализе данных по Авачинскому заливу, было решено включить дополнительно данные по отложениям цунами в бухтах Асача и Мутная, находящихся в 10–20 км к югу от мыса Поворотный. Длина береговой линии Авачинского залива (включая бухты Асача и Мутная) составляет около 150 км, длина побережья охваченного исследованиями — порядка

¹В 1923 г. на Камчатке произошло два сильных цунамигенных землетрясения — 3 февраля в Кроноцком заливе, $M_w = 8,5$; 13 апреля — на севере Камчатского залива, $M_w = 7,4 - 8,2$ [3].

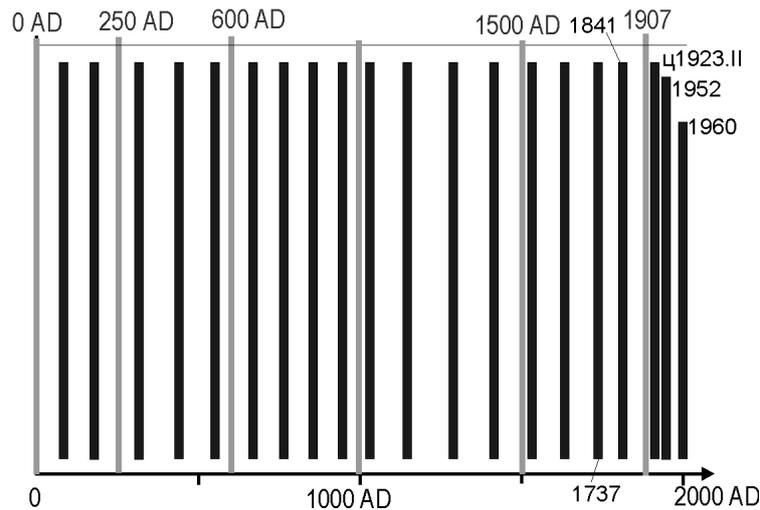


Рис. 2. Повторяемость цунами (чёрные столбцы) в Кроноцком заливе. События распределены равномерно в промежутках между вулканическими пеплами (серые линии) [1–2, 5, 11, 14, 23, 25].

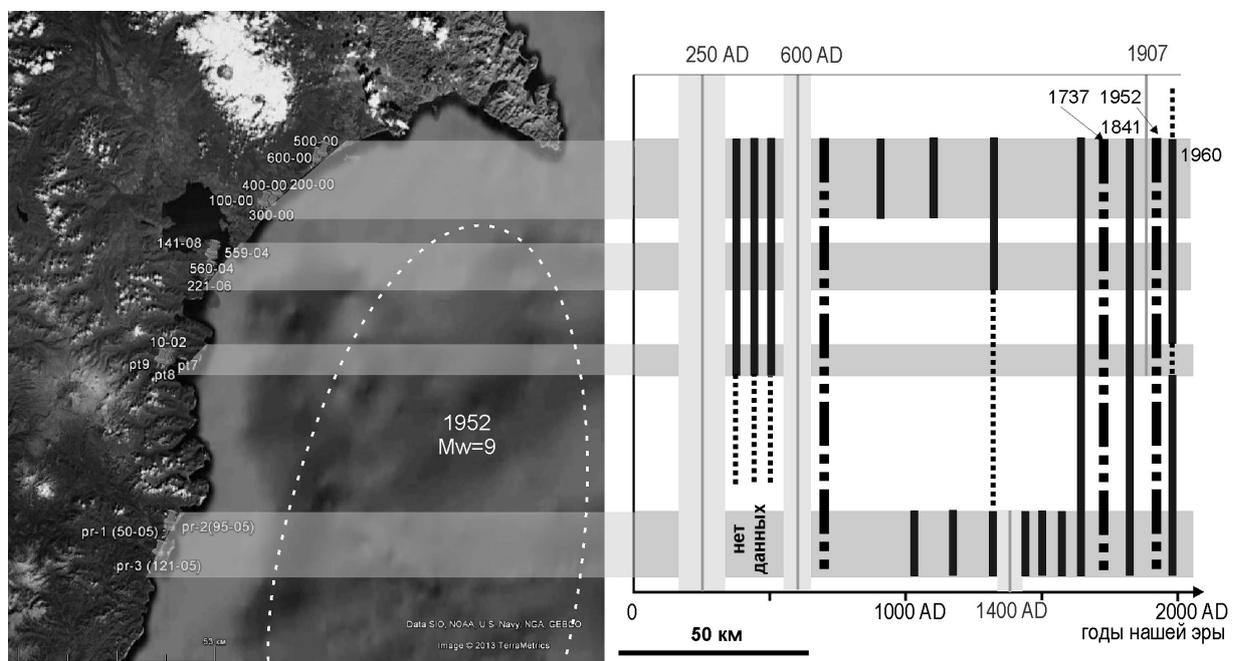


Рис. 3. Реконструкция зон воздействия отдельных цунами на побережье Авачинского залива. События цунами (чёрные столбцы) распределены условно равномерно в промежутках между вулканическими пеплами (серые линии) [1–2, 5, 11, 14, 23, 25]. Светло-серые полосы соответствуют погрешности в определениях возрастов вулканических пеплов. Чёрные столбцы с двойным точечным пунктиром — события цунами, сопровождавшиеся косейсмическими опусканиями побережья. Очаг исторического цунами 1952 г. показан овалом [3]. Зоны с серой заливкой соответствуют районам детальных исследований (с севера на юг): Халактырский пляж, бухты Виллой-Безымянная, бухта Жировая, бухты Асача-Мутная.

50 км. В ходе обработки полученных материалов были использованы данные по 11 топографическим профилям и 92 шурфам.

На сводном рис. 3 показаны зоны воздействия отдельных цунами на побережье Авачинского залива и к югу — до бухт Мутная и Асача. Доисторическое землетрясение, произошедшее вскоре после 600 г.н.э. и сопровождавшееся косейсмическими деформациями на побережье, по-видимому, имело единый протяженный очаг (уходящий на юг Камчатки)

с магнитудой $M \sim 9$ (по аналогии с землетрясениями 1737 и 1952 гг.). Средняя повторяемость всех выявленных цунами в Авачинском заливе цунами составляет 103 года. Некоторые из этих цунами, вероятно, могли быть трансокеаническими, подобно Чилийскому цунами 1960 г. Средняя повторяемость сильных (с заплесками выше 5 м на открытом побережье и выше 2 м в бухтах) цунами составляет 140–150 лет и примерно 130 лет в бухтах Асача и Мутная. Средняя повторяемость цунами, сходных

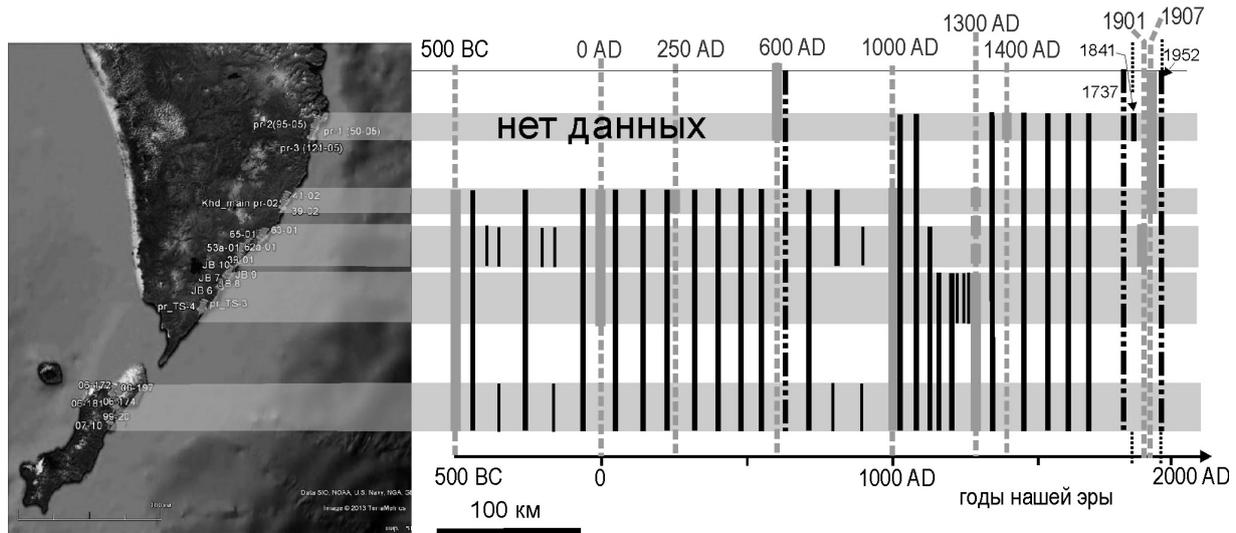


Рис. 4. Реконструкция зон воздействия отдельных цунами на побережье южной Камчатки и северных Курил. События цунами (чёрные) распределены условно равномерно в промежутках между вулканическими пеплами (серые линии) [1–2, 5, 11, 14, 23, 25]. Тонкие чёрные столбцы показывают события цунами, идентифицированные лишь в одной-двух бухтах. Чёрные столбцы с двойными пунктирными точками — отложения цунами от землетрясений сопровождавшихся косейсмическими опусканиями побережий. Сплошные серые линии показаны для районов, где определённый вулканический пепел присутствует в разрезах, пунктирные серые линии — для районов, где пеплы отсутствуют. Зоны с серой заливкой соответствуют районам детальных исследований (с севера на юг): бухты Мутная-Асача, бухты Ходутка-Кузачин, бухта Вестник, Бухты Утужная-Ушатная-Три Сестры, о-ва Парамушир и Шумшу. AD — года нашей эры (н.э.), BC — года до нашей эры (до н.э.).

по проявлениям с историческим событием 1841 г., составляет около 300 лет. По ретроспективной оценке M_{t1979} для удалённого источника [9] по волне на Гавайях, магнитуда этого землетрясения была около 8,0 – 8,3. Магнитуда же землетрясения оценённая в данной работе (M_{t1999} для близкого источника [10]) находилась в интервале 7,5 – 8,0.

Отложения палеоцунами на побережье южной Камчатки и северных Курильских островов. Протяжённость береговой линии, в пределах которой расположены районы исследований, превышает 300 км, протяжённость обследованного побережья составляет около 120 км. В работе использованы данные по 23 измеренным топографическим профилям и 132 шурфам. Основная проблема в обобщении полученных для района данных состоит в отсутствии единых маркирующих горизонтов пеплов: часть пеплов от вулканов, расположенных на юге Камчатки, имела оси пеплопадов, направленные на юг, а часть — на север [1–2, 5, 11, 14, 23, 25]. Тем не менее, некоторые маркирующие горизонты пеплов в разных районах оказались близки по возрасту, что всё в дало возможность скоррелировать отложения цунами (с меньшей надёжностью, чем для северных районов восточной Камчатки) и проанализировать все данные вместе.

На сводном рис. 4 показаны зоны воздействия отдельных цунами на побережье южной Камчатки и северных Курил для последних ~2500 лет (для бухт Асача и Мутная — для последних ~1400 лет). Доисторическое землетрясение, произошедшее

вскоре после 600 г.н.э. и сопровождавшееся косейсмическими деформациями на побережье, по-видимому, имело единый протяженный очаг (от юга Камчатки до Авачинского залива) с магнитудой порядка 9 (по аналогии с землетрясениями 1737 и 1952 гг. [3–4]).

Средняя повторяемость всех цунами на юге Камчатки и на северных Курилах для последних ~2500 лет составляет 73–80 лет. Средняя повторяемость землетрясений, сопровождавшихся косейсмическими деформациями побережий, составляет около 470 лет (так же, как и для Авачинского залива). Временные промежутки между отдельными событиями варьируют от ~215 до 1100 лет.

Обращает на себя внимание большая (по сравнению с северными районами) интенсивность цунами, происходящих на юге Камчатки и на Северных Курилах. Величина горизонтальных заплесков составляет здесь от многих сотен метров до нескольких километров. Реконструированные вертикальные заплески многих цунами превышали 12–15 м. Этот факт свидетельствует о том, что строение цунамигенерирующих зон Камчатской зоны субдукции неоднородно: южный сегмент Камчатской зоны субдукции способен генерировать цунами большей интенсивности, чем северный сегмент. Это может быть связано как с разной шириной очаговых зон (и соответственно, с разной длиной волн цунами), так и с существованием на юге Камчатки зоны с большими (разовыми) смещениями в очагах (high slip regions) [17].

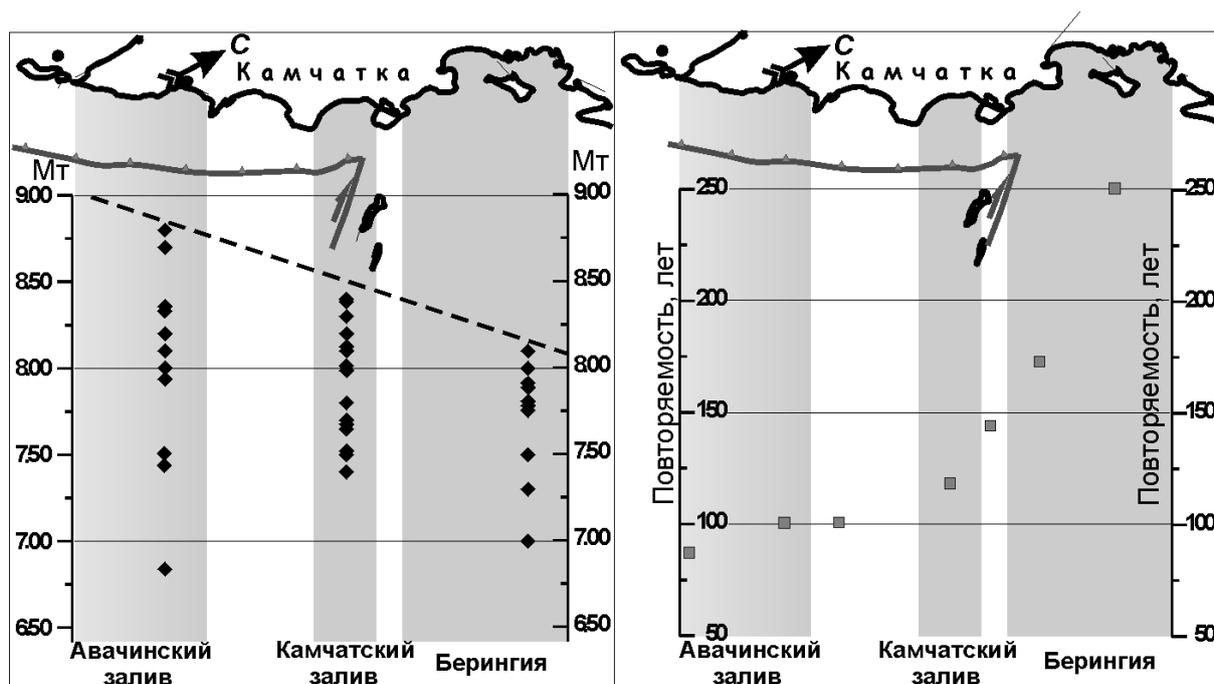


Рис. 5. Вариации магнитуд M_t и повторяемости цунамигенных землетрясений вдоль восточного побережья Камчатки, восстановленные по данным палеоцунами. Черные точки – оцененные по палеоцунами магнитуды M_t (рисунок слева); серые точки – средняя повторяемость цунамигенных землетрясений (лет) за последние ~2000 лет (рисунок справа).

Определение параметров цунамигенных палеоземлетрясений

Определяя величину M_t (M_{t1999}), необходимо иметь данные по высоте заплесков на берегу, ближайшем к источнику. При этом использовалось соотношение Абе [10]:

$$M_t = 2 \log Hm + 6,6, \quad (1)$$

где Hm – значение местной средней максимальной высоты волн в метрах.

Анализ исторического каталога цунами на Дальнем Востоке России [3] убедительно показывает, что подавляющее число сильных и катастрофических цунами в регионе связано с сильными местными землетрясениями, т. е. землетрясениями, приуроченными к Курило-Камчатской сейсмофокальной зоне. Следовательно, решая задачу о цунамигенерирующих зонах, можно заранее предполагать что: 1) очаг землетрясения расположен в пределах какого-либо сегмента сейсмофокальной зоны, 2) механизм землетрясения субдукционный. Главная задача сводится, таким образом, к определению собственно положения очага. Эту задачу можно решить, определив участок побережья с наибольшей интенсивностью цунами. При таком подходе, цунами от удалённых очагов, в принципе, могут внести небольшой процент ошибок, но за неимением лучшего приходится использовать описанный подход.

Ещё один подход при оценке магнитуд цунамигенных землетрясений – использование только лишь протяжённости очаговой зоны землетрясения, которая, как уже указывалась выше, примерно со-

ответствует длине ближайшего к очагу побережья, испытавшего наиболее сильное воздействие цунами. Существует около 30 эмпирических корреляционных зависимостей для оценок магнитуд по длине очагов (полученных преимущественно для коровых разломов). В палеосейсмологии чаще всего используются зависимости Вэлса-Копперсмита [24]. Для взрывов она имеет вид:

$$M_w = 4,49 + 1,49 \log(RLD), \quad (2)$$

где RLD – протяжённости очаговой зоны землетрясения, км.

Оценки магнитуды двумя способами (M_t , M_w), в случае полноты геологических данных о протяжённости охваченного цунами побережья, неплохо согласуются друг с другом и не показывают систематических различий. На рис. 5 представлены рассчитанные магнитуды M_t и средняя повторяемость землетрясений.

Выводы

Из полученных данных следует важный вывод о том, что предельные магнитуды цунамигенных землетрясений увеличиваются в направлении с севера на юг, в сторону выделяемой рядом исследователей области больших подвижек (high slip region) [12, 17]. Наличие этой области объясняется увеличением сцепления (coupling) между Тихоокеанской и Охотской (Евразийской) плитами в южном направлении [12]. Можно также предположить, что уменьшение периода повторяемости цунамигенных землетрясений с севера на юг

связано либо с вариациями в сцеплении плит, либо с увеличением скорости поддвига, либо с двумя этими факторами одновременно.

Исследования выполнены при поддержке грантов РФФИ №12-05-00712-а, ДВО-СО РАН №12-П-0-08-003, ДВО №12-П-04-06.

Список литературы

- Брайцева О. А., Кирьянов В. Ю., Сулержицкий Л. Д. Маркирующие прослои голоценовой тефры Восточной вулканической зоны Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1985. №5. С. 80–96.
- Брайцева О. А., Мелекесцев И. В., Пономарёва и др. Сильные и катастрофические эксплозивные извержения на Камчатке за последние 10 тысяч лет. Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2001. С. 235–252.
- Гусев А. А. Схема очаговых зон сильных землетрясений Камчатки за инструментальный период. Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2004. С. 75–80.
- Заякин Ю. Я., Лучинина А. А. Каталог цунами на Камчатке. Обнинск: ВНИИГММЦД, 1987. 50 с.
- Певзнер М. М., Пономарёва В. В., Мелекесцев И. В. Чёрный Яр – реперный разрез голоценовых маркирующих пеплов северо-восточного побережья Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1997. №4. С. 3–18.
- Пинегина Т. К., Базанова Л. И., Мелекесцев И. В. и др. Доисторические цунами на побережье Кроноцкого залива – Камчатка, Россия // Вулканология и сейсмология. 2000. №2. С. 66–74.
- Пинегина Т. К., Кожурин А. И., Пономарёва В. В. Оценка сейсмической и цунамиопасности для посёлка Усть-Камчатск (Камчатка) по данным палеосейсмологических исследований // Вестник КРАУНЦ, Серия Науки о Земле. 2012. №1. С. 138–159.
- Пинегина Т. К., Кравчуновская Е. А., Ландер А. В. и др. Голоценовые вертикальные движения побережья полуострова Камчатский (Камчатка) по данным изучения морских террас // Вестник КРАУНЦ, Серия Науки о Земле. 2010. №1. С. 231–247
- Abe K., Size of great earthquakes of 1837–1974 inferred from tsunami data // J. Geophys. Res. 1979. Vol. 84. P. 1561–1568.
- Abe K. Quantification of historical tsunamis by the *Mt* scale // Zisin, J. Seismol. Soc. Jpn. 1999. Vol. 52. P. 369–377 (in Japanese with English abstract).
- Braitseva O. A., Ponomareva V. V., Sulerzhitsky L. D. et al. Holocene key-marker tephra layers in Kamchatka, Russia // Quaternary Research. 1997. Vol. 47. P. 125–139.
- Burgmann R., Kogan M. G., Steblou G. M. et al. Interseismic coupling and asperity distribution along the Kamchatka subduction zone // Journal Of Geophysical Research. 2005. Vol. 110. B07405, doi:10.1029/2005JB003648.
- Bourgeois J., Pinegina T., Ponomareva V., Zaretskaia N. Holocene tsunamis in the southwestern Bering Sea, Russian Far East, and their tectonic implications // GSA Bulletin. 2006. Vol. 118. N. 3/4. P. 449–463.
- Dirksen V., Dirksen O., Diekmann B. Holocene vegetation dynamics and climate change in Kamchatka Peninsula, Russian Far East // Review of Palaeobotany and Palynology. 2013. Vol. 190. P. 48–65.
- Kato Y., Kimura M. Age and origin of so-called “Tsunami-ishi”, Ishigaki Island, Okinawa Prefecture // J. Geol. Soc. Japan. 1983. V. 89. P. 471–474.
- MacInnes B., Pinegina T. K., Bourgeois J. et al. Field survey and geological effects of the 15 November 2006 Kuril tsunami in the middle Kuril Islands // Pure appl. geophys. 2009. Vol. 166. P. 9–36.
- 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 // Bulletin of the Seismological Society of America. 2010. Vol. 100. P. 1695 – 1709.
- Morton R. A., Gelfenbaum G., Jaffe B. E. Physical Criteria for Distinguishing Sandy Tsunami and Storm Deposits Using Modern Examples // Sedimentary Geology. 2007. N 200. P. 184–207.
- Paris R., Lavigne F., Wassmer P., Sartohadi J. Coastal sedimentation associated with the December 26, 2004 tsunami in Lhok Nga, west Banda Aceh (Sumatra, Indonesia) // Marine Geology. 2007. N 238. P. 93–106.
- Pinegina T. K., Bourgeois J. Historical and paleo-tsunami deposits on Kamchatka, Russia: long-term chronologies and long-distance correlations // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2001. Vol. 1. N 4. P. 177–185.
- Pinegina T., Bourgeois J., Bazanova L. et al. Millennial – scale record of Holocene tsunamis on the Kronotskiy Bay coast, Kamchatka, Russia // Quaternary Research. 2003. Vol. 59. P. 36–47.
- Pinegina T. K., Bourgeois J., Kravchunovskaya E. A. et al. A nexus of plate interaction: Segmented vertical movement of Kamchatsky Peninsula (Kamchatka) based on Holocene aggradational marine terraces // GSA Bulletin. 2013. Vol. 125. N. 9/10. P. 1554–1568.
- 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., Izbekov P., Lees J. AGU, 2007. Vol. 172. P. 263–282.
- 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. N. 4. P. 974–1002.
- Zaretskaya N. E., Ponomareva V. V., Sulerzhitsky L. D. Radiocarbon dating of large Holocene volcanic events within South Kamchatka (Russian Far East) // Radiocarbon. 2007. Vol. 49/2. P. 1065–1078.