

II.4. ИССЛЕДОВАНИЯ ПАЛЕОЦУНАМИ НА ДАЛЬНЕВОСТОЧНОМ ПОБЕРЕЖЬЕ РОССИИ

Пинегина Т.К.¹, Разжигаева Н.Г.²

Ключевые слова: дальневосточное побережье, катастрофические цунами, палеоцунами

Дальневосточные побережья России периодически подвергаются воздействию волн цунами, возникающих в результате землетрясений в акваториях Тихого океана, Охотском, Японском и Беринговом морях. Наиболее катастрофические для Дальнего Востока России цунамигенерирующие землетрясения приурочены к Курило-Камчатской зоне субдукции, протянувшейся вдоль северо-западной окраины Тихого океана.

Камчатка и Курильские о-ва являются одними из наиболее сейсмически активных регионов планеты, и самые крупные исторические землетрясения в этой зоне генерировали цунами. Так, самое страшное цунами на дальневосточном побережье случилось ночью 5 ноября 1952 г., его эпицентр располагался в океане примерно в 200 км к юго-востоку от Петропавловска-Камчатского (52.75° с.ш., 159.50° в.д.), а длина очага составила около 600 км. От волны сильно пострадали более 700 км побережья от Кроноцкого п-ова на Камчатке до Северных Курильских о-вов. Волна высотой более 10 м (до 18 м) смыла полностью г. Северо-Курильск и пос. Океанский на о-ве Парамушир, а также несколько поселков на Камчатке (описание обследования последствий этого цунами можно найти в дневниках Пийпа [2005], а также в [Саваренский и др., 1958])

Мощное землетрясение с эпицентром, расположенным восточнее о-ва Шикотан, 4 октября 1994 г. породило цунами, высота заплеска которого на побережье Шикотана достигла величины 15 м [Кайстренко и др., 1997], а на о-ве Кунашир – 8.7 м [Королев и др., 1997].

Катастрофические цунами – явления редкие, и использование только известных исторических данных недостаточно как для построения реалистичной модели цунамиактивности, так и для получения качественных и количественных оценок цунамиопасности. Однако все сильные цунами оставляют следы в прибрежных отложениях, изучение которых позволяет получить необходимый материал о проявлениях цунами в прошлом.

В России первые работы по изучению отложенных цунами начались на Камчатке [Мелекесцев и др., 1994] и на о-ве Итуруп [Булгаков и др., 1995] в начале–середине 90-х годов. В 1993 г. впервые были идентифицированы 4 горизонта цунамигенных отложений на Камчатском п-ове, расположенном к востоку от пос. Усть-Камчатск.

Геологические эффекты при воздействии цунами на берег

Как правило, волна цунами подходит к берегу не в виде одиночной волны, а в виде серии волн, причем самой высокой часто бывает не первая волна [Левин, Носов, 2005]. Довольно редко на берегу во время цунами можно наблюдать медленное повышение уровня воды. Гораздо чаще при подходе к берегу передний фронт волны вырастает, опрокидывается и трансформируется в бор – высокоскоростную турбулентную волну с крутым фронтом. Благодаря большой длине волн цунами способны затапливать побережье на расстояние нескольких километров вглубь суши, а скорость распространения цунами на побережье может достигать нескольких десятков метров в секунду. После значительных цунами (>5 м) на берегу практически всегда остаются характерные эрозионные формы рельефа (борозды, каналы,

¹ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский.

² Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток.

фестоны, выемки) и аккумулятивные отложения [Dawson, Shi, 2000; MacInnes et al., 2009a, b]. Волны воздействуют на берег как прямым, так и обратным потоком, причем в зависимости от геоморфологии побережья обратный поток может воздействовать не менее интенсивно, чем прямой. Таким образом, геологические эффекты, которые мы видим на берегу после цунами, являются суммарным результатом воздействия нескольких волн и нескольких прямых и обратных потоков. Побережье после цунами выглядит довольно хаотично, участки с эрозией и аккумуляцией могут чередоваться как вдоль линии берега, так и перпендикулярно ей, и во всех случаях мы вправе говорить лишь о преобладании эрозии или аккумуляции на каждом конкретном участке побережья. Вместе с тем, исследования показали, что граница распространения отложений цунами очень близка (в пределах нескольких десятков метров по горизонтали) к границе максимального заплеска цунами [Пинегина и др., 2008]. Таким образом, изучение аккумулятивных отложений цунами является наиболее надежным методом и чаще всего используется при восстановлении величин вертикального и горизонтального заплеска. Анализ отложений в ряде случаев может дать информацию о скорости, направлении потока на берегу, количестве волн и других характеристиках цунами.

Отложения цунами

Отложения цунами имеют следующие основные характеристики [Bourgeois et al., 2006; Morton et al., 2007; Paris et al., 2007]:

1) как правило, состоят из рыхлого материала, эродированного и перенесенного с прилегающего побережья и с глубин ~50 м и менее;

2) представлены галечными, песчаными и илистыми горизонтами (мощностью в среднем от нескольких миллиметров до нескольких десятков сантиметров);

3) неоднородны и нерегулярны по мощности и гранулометрическому составу и редко перекрывают всю поверхность в зоне заплеска цунами;

4) строение цунамигенных горизонтов свидетельствует об условиях быстрой (моментальной) аккумуляции;

5) могут быть неслоистыми, либо содержать несколько тонких прослоев, соответствующих нескольким волнам (фиг. II.4.1, вклейка);

6) могут откладываться как прямым, так и обратным потоком, в результате чего прослои могут залегать друг по отношению к другу с угловым несогласием;

7) горизонты цунамигенных отложений чаще имеют нормальную градационную слоистость (см. фиг. II.4.1), либо не имеют ее вообще. В очень редких случаях отмечена обратная градационная слоистость;

8) могут быть хорошо или плохо сортированы по крупности зерен;

9) могут содержать аллохтонные включения (дерево, почву, торф и др. фрагменты);

10) границы по кровле и по подошве, как правило, резкие;

11) граница по контакту с подстилающими отложениями часто носит эрозионный характер;

12) мощность цунамигенного горизонта чаще всего составляет не более 25 см.

Во время прохождения цунами осадконакопление на разных участках побережья имеет существенные различия, обусловленные особенностями трансформации волны на берегах разной конфигурации, геолого-геоморфологическим строением подводного берегового склона и зоны затопления. Даже на небольшой территории одно и то же цунами приводит к накоплению осадков разнообразного состава [Разжигаяева и др., 2006 а].

Цунами захватывает материал из различных источников, и образующийся осадок представляет собой своеобразную смесь разного материала, перенесенного волной. Если размывается пляж и морские террасы, то цунамигенный осадок хорошо сортирован, если поставляется материал с подводного склона полузакрытых бухт или со склонов – откладывается плохо сортированный материал. Вдоль идеализированного геологического разреза, выполненного вкрест простирания береговой линии, отложения цунами, в целом, будут утончаться по мощности и по гранулометрическому составу от моря в сторону суши (рис. II.4.1а).

Более сложное строение может иметь цунамигенный горизонт, отложенный прямыми и обратными потоками нескольких волн (рис. II.4.1б). При этом каждая последующая волна может эродировать отложения предыдущих волн.

В ряде случаев бывает проблематично отличить отложения цунами от прочих генетических типов отложений. Пожалуй, больше всего дискус-

ерикофф
I ✓

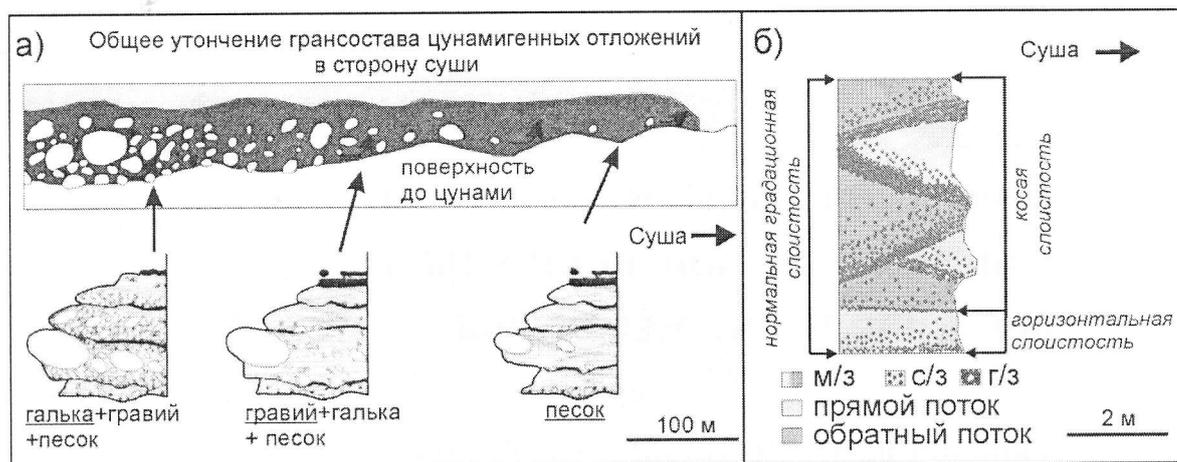


Рис. II.4.1. Идеализированные разрезы с отложениями цунами: а) отложения прямого потока [Fujiwara, Kamataki, 2007]; б) отложения прямого и обратного потоков [Choowong et al., 2007]

сий в публикациях посвящено проблеме отличия штормовых отложений от цунамигенных. Это связано с кажущимся сходством этих отложений, так как и те, и другие откладываются морскими волнами и состоят из сходного по облику и составу материала.

Вместе с тем, физические характеристики штормовых (т.е. ветровых) волн очень сильно отличаются от волн цунами. Процесс воздействия цунами на побережье происходит в течение периода времени от первых десятков минут до нескольких часов, а один единичный шторм (включая фазы нарастания и убывания) может продолжаться много суток. Одно цунами состоит из нескольких волн (редко наблюдалось до 10), в то время как при шторме на побережье обрушиваются тысячи волн. Длина волн цунами и, соответственно, их период намного больше, чем длина и период ветровых волн. Исходя из различия самих явлений, нужно искать различия между штормовыми и цунамигенными отложениями.

Отложения штормов – один из самых распространенных типов рыхлых отложений в мире. Они присутствуют на побережьях всех морей, океанов и любых крупных водоемов. Соответственно, они прекрасно и всесторонне изучены. Наиболее характерными признаками этих отложений являются [Morton et al., 2007]:

- 1) субгоризонтальная слоистость в разрезах, параллельных береговой линии (рис. II.4.2);
- 2) очень пологая косая слоистость и клиновидность слоистых серий в перпендикулярных к линии уреза воды разрезах (см. рис. II.4.2);

3) ритмичная (градационная) сортировка и хорошая окатанность зерен;

4) наличие серий из песка, гравия и гальки;

5) тонкослойчатость;

6) отсутствие аллохтонных включений (за очень редким исключением);

7) мощность отложений единичного шторма, как правило, составляет 30–200 см;

Сравнение гранулометрических характеристик штормовых и цунамигенных отложений на о-ве Шикотан показало, что штормовые осадки существенно грубее, часто содержат примесь гравия (до 66%), практически не включают алеврита, присутствующего в осадках цунами (до 33%) [Ганзей и др., 2010]. Как правило, сортировка материала штормов лучше, чем осадков цунами. Такая же закономерность была установлена при сравнении характеристик осадков цунами 1993 г. и шторма, связанного с прохождением тайфуна Miyakojima в 1959 г. на побережье юго-западного Хоккайдо [Nanayama et al., 2000]. Осадки штормов и цунами наиболее сильно различаются в бухтах, где идет подача грубого материала с бортов, здесь осадки штормов хуже сортированы по сравнению с цунамигенными песками. В крупных бухтах с широким песчаным пляжем гранулометрический состав осадков штормов и цунами почти аналогичен, осадки цунами имеют более уплощенные кривые распределения и несколько хуже сортированы. В целом, осадки штормов и цунами имеют одни и те же источники поступления материала, но их вклад в формирование осадков существенно отличается: цунами в отличие от штормов захва-

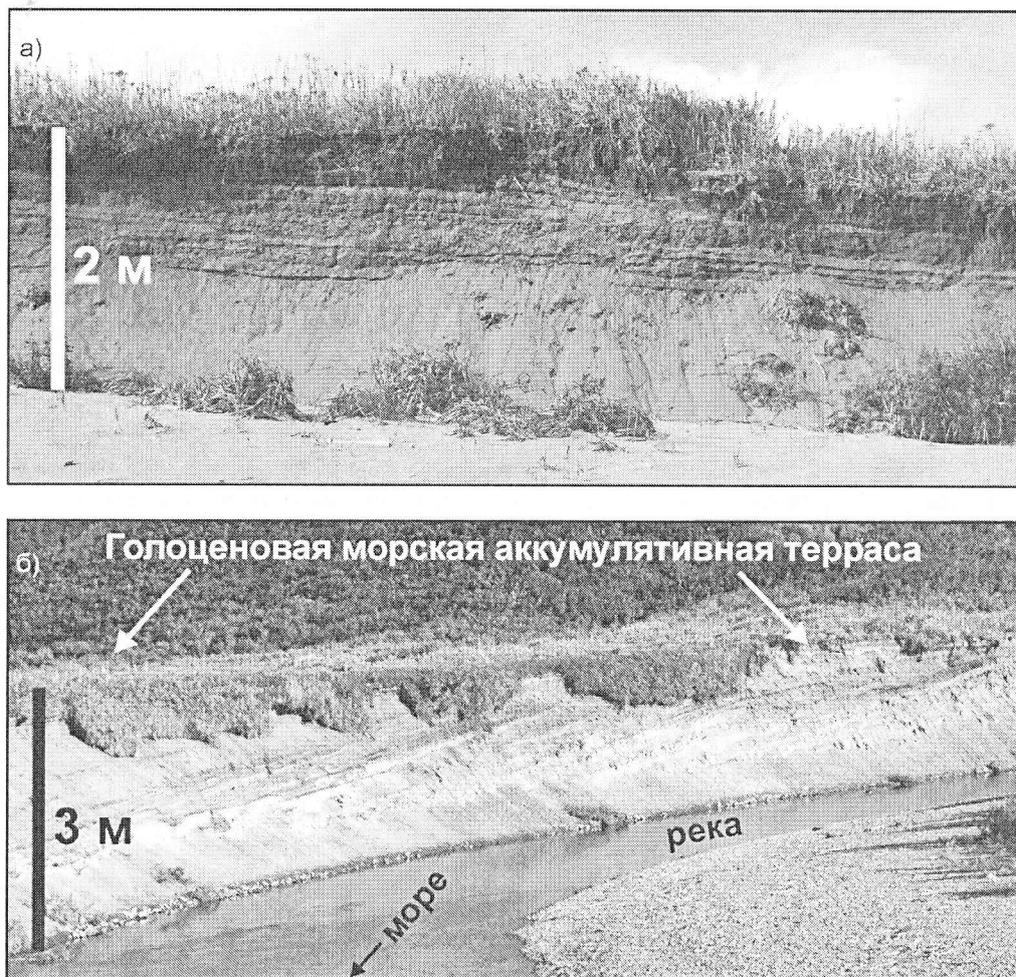


Рис. 11.4.2. Типичные штормовые отложения: а) обнаженные в уступе размыва берегового вала. Уступ расположен параллельно береговой линии, хорошо видна субгоризонтальная слоистость; б) в обнажении вдоль устьевой части реки. Обнажение расположено перпендикулярно береговой линии, видна характерная пологонаклонная косяя слоистость. Фото Т.К. Пинегиной

тывает больше материала с подводного берегового склона.

Говоря об отличиях цунамигенных и штормовых отложений, следует подчеркнуть еще три очень важных аспекта: во-первых, сильные штормы происходят гораздо чаще сильных и катастрофических цунами; во-вторых, граница отложений цунами находится гораздо дальше от уреза воды, чем граница штормовых отложений; в-третьих, эрозия и аккумуляция материала во время цунами субсинхронны, а во время шторма эрозия берега происходит на фазе нарастания шторма, а аккумуляция материала – только на фазе убывания.

Исследование палеоцунами на Курильских островах и Камчатке

Поиск, датирование и корреляция отложений цунами

Предварительные участки для поиска и изучения отложений цунами выбираются после тщательного анализа аэрофото- и космических снимков и топографических материалов. На их основе выделяются ключевые участки на побережьях, где на протяжении длительного времени могут со-

храниться цунамигенные отложения. Эти участки не должны быть в зоне воздействия флювиальных и склоновых процессов. Желательно, чтобы прибрежный рельеф состоял из разных высотных уровней, а конфигурация побережий не препятствовала свободному проникновению цунами. Кроме того, собираются описания исторических цунами на предполагаемом участке исследований. Отложения исторических цунами служат опорными для оценок интенсивности более древних событий.

Во время проведения полевых работ на выбранном участке побережья проводится съемка топографических профилей от уреза воды на расстояние максимальных заплесков цунами – через пляж и береговые валы. Для получения наиболее полной информации по отложениям цунами профили необходимо измерять через несколько километров вдоль берега. Вдоль профилей закладываются геологические шурфы или скважины и в них описываются геологические разрезы. Обычно вдоль каждого профиля закладывается от 5 до 20 шурфов. Глубина шурфов составляет в среднем от 1 до 4 м – в зависимости от возраста поверхности и скорости накопления отложений. Основными объектами для поиска отложений палеоцунами являются торфяники, почвенно-пирокластические чехлы береговых валов и озерные отложения. При геологическом описании шурфов в них выделяется граница между континентальными и подстилающими морскими отложениями. В разрезах детально описываются все прослои, в том числе вулканических пеплов и цунамигенных отложений. Из разрезов отбираются образцы для минералогического, радиоуглеродного, диатомового, гранулометрического и других анализов с целью определения генезиса, возраста и прочих особенностей прослоев.

На Курильских о-вах (о-ва Уруп, Кунашир, Шикотан, Полонского, Зеленый, Юрий, Танфильева) при исследованиях отложений палеоцунами наряду с седиментологическим широко применялся и диатомовый анализ, показывающий наличие/отсутствие в этих прослоях морских диатомей, как сублиторальных, так и неритических и океанических. Присутствие последних можно считать индикатором сильного цунами [Гребенникова и др., 2002; Разжигаева и др., 2006 а]. На участках берега, где происходила активная эрозия, створки диатомей сильно из-

ломаны. В районе развития песчаных аккумулятивных форм створки диатомей имеют лучшую сохранность. Как правило, среди морских видов диатомей преобладают бентические прибрежно-морские формы; неритические и океанические встречаются единично. Обилие диатомей, обитающих в прибрежной зоне моря, свидетельствует о том, что волна цунами в основном захватывает материал с мелководья. Пресноводные комплексы в осадках цунами характеризуют не только вмещающие отложения, но и могут фиксировать поставку материала из пресноводных водоемов, через которые проходила волна. В осадках Симуширского цунами найдены единичные бентосные фораминиферы, включая глубоководные виды, фрагменты раковин остракод, многочисленные мелкие обломки ракуши, мшанок, спикулы губок, фрагменты мелких морских ракообразных, иглы и обломки панцирей морских ежей [Иванова, 2009; Разжигаева и др., 2009]. В цунамигенных песках в разрезах торфяников и других континентальных отложений Курильских о-вов органогенные карбонатные остатки не сохраняются.

Для определения возраста цунамигенных отложений применяется радиоуглеродный метод. При этом анализируются образцы торфа, а также куски древесины, иногда присутствующие в песчаных прослоях.

На Дальнем Востоке, в частности на Курильских о-вах и на Камчатке, изучение отложений цунами тесным образом связано с возможностью применения метода тефрохронологии [Брайцева и др., 1985]. Метод основан на изучении и корреляции маркирующих горизонтов вулканических пеплов (тефры), каждый из которых имеет характерный облик, химический и минералогический состав и распространение на большой территории. На побережье Камчатки и Курильских о-вов помимо отложений цунами в разрезах всегда присутствуют и вулканические пеплы голоценовых извержений. Возраст многих пеплов к настоящему времени определен с помощью радиоуглеродного метода [Брайцева и др. 2001], что уже во время полевых работ позволяет коррелировать от шурфа к шурфу и примерно датировать залегающие между пепловыми горизонтами отложения цунами (рис. II.4.3).

После описания геологических разрезов, идентификации отложений и корреляции цунамигенных прослоев составляется сводная геологиче-

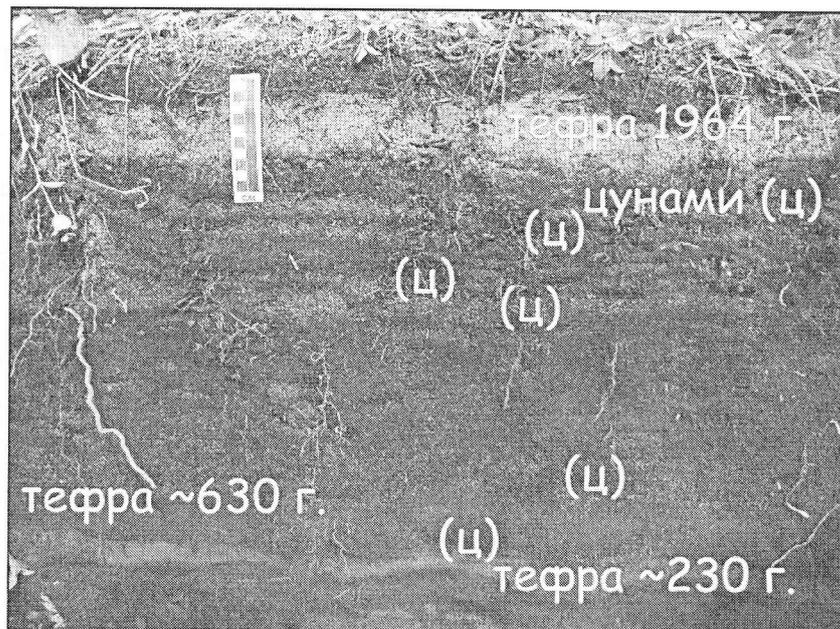


Рис. II.4.3. Фотография стенки шурфа с прослоями тефры и отложениями цунами в почве. Шурф заложен на 20-метровой террасе в 500 м от современного уреза воды (п-ов Камчатский, Камчатка). Фото Т.К. Пинегиной

ская колонка и геохронологический (временной) разрез, на основе которого возможно рассчитать частоту повторяемости цунами на побережье. Таким образом, для многих участков побережья Камчатки и Курил были получены данные по повторяемости цунами за последние ~7000 лет [Pinegina, Bourgeois, 2001; Iliev et al., 2005; Разжигаева и др., 2006б; 2008а, б].

Основные результаты исследований палеоцунами на Камчатке и Курильских островах

В 1993 г. впервые были идентифицированы 4 горизонта цунамигенных отложений на Камчатском п-ове, расположенном к востоку от пос. Усть-Камчатск [Мелекесцев и др., 1994]. Начиная с 1995 г. исследования отложений цунами на Камчатке стали проводиться ежегодно. Геологические следы более чем 40 цунами, произошедших за последние ~7000 лет, были обнаружены в 1995 г. на побережье Кроноцкого залива [Пинегина и др., 1997, 2000; Pinegina et al., 2003]. Полученные данные позволили реконструировать не только параметры отдельных цунами на побережье (такие как вертикальный и горизонтальный

заплески), но и поставить задачу об оценке периода повторяемости крупных цунамигенерирующих землетрясений в голоцене [Pinegina, Bourgeois, 2001].

В ходе исследований было выявлено, что на многих участках побережий сохранились геологические следы исторических цунами: 1611, 1737, 1843, 1923, 1952, 1969, 1971, 1975, 1994, 1997, 2006, 2007 годов. Эти отложения были детально изучены, а восстановленные по отложениям параметры цунами сравнивались с данными исторических наблюдений [Minoura et al., 1996; Кравчуновская и др., 2009; Kravchunovskaya, 2009]. Для событий, произошедших во второй половине XX в. – начале XXI в., параметры ряда цунами были сопоставлены с инструментальными данными параметров очагов [Martin et al., 2008; MacInnes et al., 2009a, b, 2010; MacInnes, 2010]. Таким образом, появилась возможность использовать отложения исторических цунами как опорные горизонты, сравнивать их с отложениями доисторических цунами и использовать их при оценке некоторых параметров цунамигенерирующих палеоземлетрясений.

Необходимо отметить, что пространственное распределение и повторяемость сильных и катастрофических землетрясений и цунами вдоль

Курило-Камчатской зоны субдукции и к северу от нее изучены все еще недостаточно, и в разных районах эти работы проведены с различной степенью детальности.

На основе данных, полученных в ходе экспедиционных исследований в 1995–2009 гг., были проанализированы и, по возможности, скоррелированы отложения исторических и доисторических цунами вдоль побережья от Петропавловска-Камчатского до южной оконечности о-ва Парамушир [Пинегина, Буржуа, 2009]. На основании этих данных были выделены наиболее сильные цунами и менее значительные события для последних ~1500 лет. Два наиболее сильных исторических цунами произошли на Камчатке и Северных Курилах в 1952 г. ($M \sim 9.0$) и в 1737 г. Данные, полученные по отложениям цунами, позволили сделать вывод о том, что очаги этих землетрясений были сопоставимы по размеру и примерно совпадали пространственно [Кравчуновская и др., 2009]. Также было установлено, что за последние ~1500 лет в этом же районе произошло еще как минимум 3 или 4 катастрофических цунами (то есть в среднем 1 событие в 250–300 лет) (рис. II.4.4). Судя по интенсивности проявления реконструированных цунами и на основе сравнения их с историческими событиями, можно предполагать, что они были генериро-

ваны землетрясениями с $M \geq 8$. Прочие отложения цунами, не коррелируемые между различными участками побережья, могли быть связаны с более слабыми землетрясениями.

В ходе исследований особое внимание было уделено изучению отложений цунами на Халактырском пляже, расположенном поблизости от г. Петропавловска-Камчатского, крупнейшего населенного пункта п-ова Камчатка [Пинегина и др., 2002]. Халактырский пляж с прилегающим побережьем является рекреационной зоной отдыха горожан, в связи с чем оценка цунами-опасности для него весьма актуальна. В результате проведенных исследований было установлено, что за последние ~3500 лет максимальная дальность горизонтальных заплесков цунами в районе Халактырского пляжа не превышала одного километра. Таким образом, в случае объявления тревоги цунами один километр можно принять за минимальное расстояние, на которое необходимо проводить эвакуацию. Кроме этого было выяснено, что цунами, имеющие при подходе к побережью среднюю высоту волн около 6.5–8.5 м (аналогичные цунами 1952 г.), в районе Халактырского пляжа затопляют участок побережья шириной до 600 м. В целом же, по отложениям цунами было установлено, что в Авачинском заливе, на побережье которого расположен Халактырский пляж,

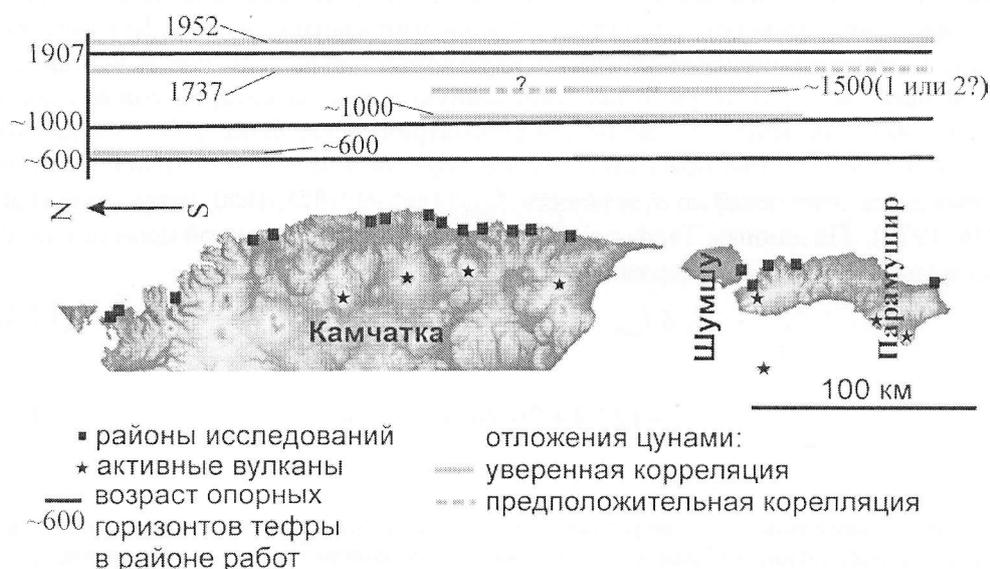


Рис. II.4.4. Корреляция отложений наиболее сильных цунами вдоль южной Камчатки и Северных Курильских о-вов, произошедших за последние ~1500 лет [Pinegina, Bourgeois, 2010]. Длина серых линий примерно соответствует длине очагов цунамигенных землетрясений, приуроченных к Курило-Камчатской зоне субдукции

сильные цунами (с высотой вертикальных заплесков на побережье $\geq 5-6$ м) происходят в среднем раз в 60 лет.

Начиная с 1998 г. исследования отложений цунами проводились не только на побережьях, расположенных вдоль Курило-Камчатской зоны субдукции, но и на западном побережье Берингова моря, к северу от зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Здесь были детально изучены отложения от единственного в этом районе исторического цунами 1969 г., связанного с подводным землетрясением с $M = 7.7$ [Martin et al., 2008]. На побережье Берингова моря были идентифицированы отложения еще 12–15 цунами, произошедших за последние ~ 4500 лет [Bourgeois et al., 2006]. Реконструированные высоты вертикальных (4–8 м) и горизонтальных ($\leq 300-400$ м) заплесков выявленных палеоцунами примерно совпадают с аналогичными параметрами цунами 1969 г. На этом основании было высказано предположение, что большинство из выявленных цунами произошли от местных землетрясений с $M \sim 7.5 \pm 0.5$. Возможно, эти цунамигенерирующие землетрясения по механизму являются подводными аналогами недавнего Олюторского землетрясения с $M_w = 7.6$, произошедшего 20 апреля 2006 г. на юге Корякского нагорья [Пинегина, 2007]. По предварительным данным было установлено, что период повторяемости цунами на беринговоморском побережье Камчатки увеличивается в направлении с юга на север и находится в пределах от 125 до 700–1000 лет. Таким образом, северо-восточное побережье Камчатки является цунамиопасным, и необходимо учитывать вероятность катастрофических событий в районе в будущем, особенно если принять во внимание тот факт, что практически все населенные пункты в Олюторском, Карагинском и Алеутском районах располагаются на песчаных косах на высоте 2–4 м над уровнем моря.

В 2006–2009 гг. были проведены комплексные исследования на Курильских о-вах, в том числе исследовались и отложения цунами. Полученные данные показали, что Центральные Курилы сейсмически так же активны, как и остальная часть Курило-Камчатской дуги [Пинегина и др., 2008; MacInnes et al., 2009a, b]. Существовавшая здесь до 2006 г. сейсмическая брешь была практически заполнена во время сильных цунамигенерирующих землетрясений 2006–2007 гг. Произшедшие события предоставили уникальную возможность

сопоставить параметры цунами (вертикальные и горизонтальные заплески, характер отложений) с аналогичными параметрами более древних событий. По предварительным данным, цунами, сопоставимые с 2006 г. либо более интенсивные, происходили в позднем голоцене на Центральных Курилах раз в 200–500 лет. Эти цунами могли быть вызваны землетрясениями с $M \geq 8$ (рис. II.4.5а, б)

Первые работы по изучению осадков палеоцунами на Южных Курилах были проведены на побережье зал. Касатка о-ва Итуруп, где в торфянике были обнаружены три прослоя песка предположительно цунамигенного происхождения, их возраст оценивается около 250, 1530 и 2370 лет назад (л.н.) [Булгаков и др., 1995]. Через год после Шикотанского цунами 1994 г. Ивановым [1997] была обследована сохранность следов цунами и описаны цунамигенные осадки в ряде бухт тихоокеанского побережья о-ва Шикотан. С 2001 г. в районе Южных Курил начаты регулярные работы по поиску следов палеоцунами [Шиев et al., 2005].

Изучение отложений палеоцунами в разрезах голоценовых отложений Южных Курил показало, что проявление этих событий в недавнем геологическом прошлом имело больший масштаб, чем в XX веке. Из осадков многочисленных цунами, зарегистрированных в XX веке, обнаружены следы не более 2–3 событий. Наиболее распространены осадки Шикотанского цунами 1994 г., обнаруженные на о-вах Кунашир, Шикотан, Танфильева [Иванов, 1997; Разжигаяева и др., 2007]. Ниже по разрезу были идентифицированы отложения более сильных событий, произошедших за последние 300–400 лет. Отсутствие цунамигенных отложений от всех зарегистрированных в районе исторических событий может объясняться тем, что большинство из них имело высоту заплеска менее 5 м [Соловьев, Го, 1974; Соловьев, 1978; Соловьева, 2000], а наблюдения за проявлением современных цунами показало, что такие цунами не сопровождаются интенсивной эрозией и не оставляют осадочных покровов на большой площади на побережье [Dawson, Shi, 2000; Разжигаяева и др., 2006 a; MacInnes et al., 2009a, b]. Часть осадков предыдущих событий могла быть уничтожена последующими цунами, если они проходили через незначительные интервалы времени. Из исторических цунами на о-вах Зеленый и Юрий обнаружены пески предположительно от

существовала

v v

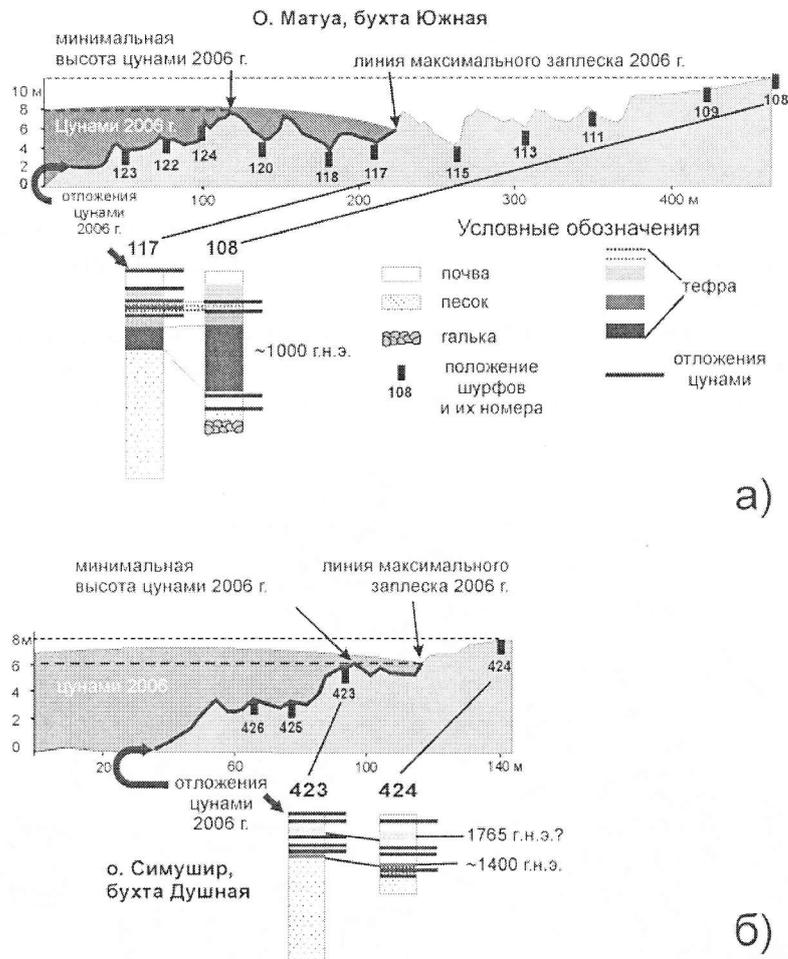


Рис. II.4.5. Отложения цунами на о-вах Матуа (а) и Симушир (б). По интенсивности выявленные палеоцунами сопоставимы либо превосходят цунами 15.11.2006 [Пинегина и др., 2008]

цунами 1894 г., а на о-ве Шикотан обнаружены осадки цунами Токаши-оки (Tokashi-oki) 1843 г., залегающие между прослоями вулканических пеплов Ко-с2 (1694 г.) и Ко-с1 (1856 г.) вулкана Комагатаке. Наиболее подробная летопись исторических цунами зафиксирована в разрезах торфяников на побережье бухты Малая Церковная (о. Шикотан), закрытой от прямого воздействия океана о-вом Айвазовского. Здесь обнаружено 4–5 прослоев морского песка, залегающих выше прослоев вулканических пеплов Ко-с2 (1694 г.) вулкана Комагатаке и Та-а (1739 г.) вулкана Тарумаи, расположенных на о-ве Хоккайдо. В целом, из исторических событий в районе Малой Курильской гряды и о-ва Кунашир наиболее сильно проявилось цунами XVII века, вероятно 1611 г.

Осадки этого цунами широко распространены на побережье Восточного Хоккайдо и встречаются до высоты 18 м над уровнем моря (н.у.м.), ширина зоны затопления достигала 1–4 км [Nanayama et al., 2003, 2011; Satake et al., 2008].

Для реконструкции проявления палеоцунами в голоцене большой интерес представляет Малая Курильская гряда, поскольку она максимально приближена к склону Курило-Камчатского желоба, где расположено большинство эпицентров землетрясений, вызывающих цунами [Соловьев, 1978]. Наиболее подробная геологическая летопись событий палеоцунами за последние 6–7 тыс. лет восстановлена для о-ва Шикотан [Разжигаяева и др., 2008а, б]. Максимальное количество прослоев цунамигенных песков найдено на тихоо-

W

кеанском побережье острова, где в отложениях барьерных палеозер и длительно существующих болотных массивов обнаружено до 22 прослоев, оставленных цунами в позднем голоцене, и до 18 – в среднем голоцене. Частота проявления палеоцунами за последние 6 тыс. лет была неравномерной. Высокая повторяемость событий отмечена для временного интервала 500–1500 л.н. В разрезах торфяников в тыловой части прибрежных низменностей встречены осадки наиболее сильных цунами (фиг. II.4.2, вклейка), которые прослеживаются на расстояние до 0.7 км от берега и на высотах до 9 м. Точную оценку высоты заплесков цунами установить затруднительно из-за сильных косейсмических движений, характерных для этого острова.

Из крупных палеоцунами позднего голоцена следует отметить события, произошедшие около 700, 1000, 1500, 1750, 2000, 2200 л.н., хорошо выраженные на юге Курильской гряды. Осадки этих цунами залегают выше прослоя вулканического пепла Та-с вулкана Тарумаи, извергавшегося 2.3 календарных тысяч лет назад (кал. тыс. л.н.). Следы близких по возрасту палеоцунами были также обнаружены на Восточном Хоккайдо [Nanayama et al., 2003, 2011]. В целом, в среднем–позднем голоцене, включая историческое время, частота проявления сильных палеоцунами была около 300–400 лет, что хорошо согласуется с данными по п-ову Немуро – 200–379 лет [Nanayama et al., 2011].

В 2007 и 2009 гг. поиск следов палеоцунами проводился на о-вах Итуруп и Уруп. В северной части залива Касатка в районе озер Октябрьское и Среднее были обнаружены осадки цунами, возраст которых оценивается около 750 л.н. и около 1500 л.н. Эти два события хорошо коррелируют с сильными цунами, имевшими место в XIII в. и около 1.4–1.5 тыс. л.н., выделенными для побережья Восточного Хоккайдо (зона затопления превышала 2.6–3.0 км), связанными с сильными землетрясениями ($M = 8.6$) [Nanayama et al., 2003, 2011]. Возможно, эти же цунами достигали побережья о-ва Итуруп.

Реконструкция палеоцунами на о-ва Уруп проведена на основе изучения разреза озерно-болотных отложений, расположенного на тихоокеанском побережье (бух. Осьма) на высоте около 7.5 м в 300 м от береговой линии [Razhigaeva et al., 2009]. В разрезе встречено 4 прослоя зеленовато-серых среднезернистых хорошо со-

ртированных песков (мощностью до 12 см), включающих морские диатомеи различной экологической принадлежности. Крупные цунами в данном районе имели место в конце среднего – начале позднего голоцена, возраст событий оценивается около 3.64, 3.19, 2.97, 2.3 кал. тыс. л.н.

В целом, несмотря на хорошую корреляцию, некоторые события, установленные на Южных Курилах, не выявлены на Восточном Хоккайдо [Nanayama et al., 2003, 2011], и наоборот – некоторые события, зафиксированные на Хоккайдо, не имеют аналогов на юге Курильских о-вов. На основании этого факта можно сделать предположение о разном положении очагов цунамигенных землетрясений. Однако имеющегося фактического материала недостаточно, чтобы провести детальные палеосейсмологические реконструкции для конкретных событий.

Палеосейсмологическая интерпретация отложений цунами

Известно, что высота цунами в ближайшей зоне контролируется параметрами очага землетрясения (величиной подвижки, глубиной и длиной разрыва), а наибольшие вертикальные заплески цунами наблюдаются на побережьях, расположенных ближе всего к очаговой области [Geist, Dmowska, 1999].

Подавляющее большинство очагов крупных землетрясений, вызывающих цунами на Дальнем Востоке России, расположено вдоль Курило-Камчатской зоны субдукции. Таким образом, по отложениям цунами можно восстанавливать повторяемость сильных цунамигенерирующих землетрясений на том или ином отрезке зоны субдукции и примерно оценивать размеры и положение их очагов.

Определяя магнитуду землетрясения по интенсивности цунами, необходимо иметь данные по высоте заплесков на побережье, ближайшем к источнику [Abe, 1999]. При этом нужно знать средние максимальные высоты волн вдоль большого участка побережья с шагом, по крайней мере, в 40–50 км или чаще. Таким образом, для оценки интенсивности древних цунами и размеров очагов вызвавших их палеоземлетрясений данных по цунами в отдельном пункте побережья недостаточно – надо знать распределение высот заплеска по всей длине побережья. Эта задача очень сложная

и комплексная. Помимо исследования отложений цунами для каждого участка побережья необходимо провести реконструкцию положения древней береговой линии и определить высоту рельефа на различные моменты времени. И только после этого становится возможным определить необходимые параметры палеосейсмических событий. В условиях быстрых и больших по амплитуде вертикальных подвижек на побережьях (что характерно для зон субдукции) реконструкции древних береговых линий особенно важны.

Полученные материалы по изучению палеоцунами в Курило-Камчатском регионе позволили удлинить ряды наблюдений, сделать заключения

о частоте сильных событий, представляющих опасность для населения и инфраструктуры, понять, какие участки опасны для заселения и строительства.

Несмотря на трудности, связанные с геологической интерпретацией отложений цунами, такие работы являются единственной возможностью получить объективные данные для оценки пространственно-временного распределения очагов сильных цунамигенерирующих землетрясений в прошлом. Эти данные должны лечь в основу долгосрочного прогноза цунами, цунамирайонирования и выявления цунамибезопасных зон в случае объявления тревоги цунами.