

GROUND ZERO:

Мегаземлетрясения — главная угроза безопасности морских побережий

В зоне полного разрушения:
15-метровая волна, обрушившаяся
на западное побережье Суматры
утром 26 декабря 2004 г., сносила
все на своем пути. Фото автора

© В. К. Гусяков, 2018

Проблема оценки цунамиопасности подводных землетрясений является одной из важных задач сейсмологических исследований в Тихоокеанском регионе, в котором сильнейшие (с магнитудой до 9.0) землетрясения происходят в окружающих его зонах субдукции. Ущерб, наносимый цунами, усиливается их полной внезапностью, быстротечностью, тяжелыми разрушениями и высокой вероятностью фатальных исходов среди людей, оказавшихся в зоне воздействия этих волн. Ввиду наличия постоянных возмущений уровня открытого моря, обусловленных ветровым волнением, штормами и приливами, цунами обладают некоторым естественным порогом (по высоте), ниже которого они практически ненаблюдаемы, а выше него сразу становятся опасными. Проблема эффективной защиты от этого стихийного бедствия осложняется редкостью его проявления на отдельном участке побережья. Даже в наиболее цунамиактивных районах Тихого океана (таких как Япония, Чили, Перу) сильные цунами с жертвами происходят раз в 30–50 лет, катастрофические – раз в 100–150 лет. Эти периоды намного превышают повторяемость, например, ураганов и наводнений и сопоставимы с периодами повторяемости землетрясений и вулканических извержений. По числу жертв и суммарному ущербу цунами находятся на четвертом месте в ряду стихийных бедствий и катастроф, после землетрясений, наводнений и тайфунов. В мировой статистике жертв природных катастроф в XX столетии, унесших более четырех миллионов жизней, доля цунами была относительно невелика и составляла чуть более 1%. Индонезийская катастрофа 2004 г., унесшая 228 тыс. жизней, сразу подняла эту долю до 20 %

Раннее утро воскресенья 26 декабря 2004 г. на северо-западном побережье Суматры было солнечным и уже жарким. Хозяйки в небольшом местечке Лхо-Нга, дома которого прятались среди кокосовых пальм, растущих сразу за песчаной полосой пляжа, уже успели покормить домашнюю живность и птицу и собирались будить к завтраку детей. Часы показывали 7:58 утра, когда внезапно земля дрогнула и в домах зазвенела посуда. За первым толчком последовали сильные, раскачивавшие деревья и стены домов колебания почвы, сопровождавшиеся низким нарастающим гулом. Сильные толчки продолжались почти пять минут, потом земля, казалось, успокоилась, иногда вздрагивая от пережитого катаклизма. Землетрясение перепугало жителей этой части острова: большинству никогда ранее не доводилось испытывать таких сильных толчков. Но жертв и больших разрушений они не вызвали. Океан тоже был спокоен. Никаких предупреждений и сигналов тревоги от властей не поступало. Но уже через 15 минут на западном горизонте, где синяя морская вода сливалась с голубым небом, появилась темная полоса, быстро приближающаяся к берегу. Со стороны



ГУСЯКОВ Вячеслав Константинович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией математического моделирования цунами (<http://tsun.sccc.ru/tsulab>) Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (Новосибирск), председатель (в 1995–2003 гг.) Комиссии по цунами Международного геодезического и геофизического союза (МГГС), участник многих экспедиций в России и за рубежом по изучению следов разрушительных цунами. Автор более 100 научных публикаций по проблеме цунами и природных катастроф

Ключевые слова: цунами, палеоцунами, цунамиопасность, прогноз цунами, очаги землетрясений, сеймотектоника, зоны субдукции, природные катастрофы.
Key words: tsunami, paleotsunami, tsunami hazard, tsunami warning, earthquake sources, seismotectonics, subduction zones, natural hazards



Члены экспедиции (автор в центре) по изучению последствий Индонезийского цунами 26 декабря 2004 г. на фоне баржи с 5 тыс. тонн угля, перенесенной волной цунами через пирс на шоссе. Суматра, январь 2005 г. Фото автора

океана слышался все нарастающий шум. Когда жители деревни обратили на него внимание и увидели подходящую к берегу волну, бежать от нее было уже поздно. Хотя до спасительных холмов позади деревни было не более 500 метров, поток воды, возникший при накате на пляж первой волны, двигался слишком быстро, неся с собой вырванные стволы деревьев и обломки разрушенных домов. У попавших в него людей практически не было шансов на спасение. Несколько сотен жителей этой деревни, расположенной в наиболее близкой



к очагу землетрясения точке побережья Суматры, стали первыми жертвами разрушительного цунами, о котором в тот день узнал весь мир. В последующие несколько часов к ним добавились еще 228 тыс. человек в 15 странах бассейна Индийского океана.

Никто не ждал беды. Индонезия, 26 декабря 2004 г.

В 12 километрах к востоку от местечка Лхо-Нга, за мысом после которого побережье Суматры поворачивает на восток, в заливе, обращенном уже не к Индийскому океану, а к окраинному Андаманскому морю, находился город Банда-Ачех с населением около 200 тыс. человек, административный центр провинции Ачех. В его длинной истории, ведущей начало с XV в., не отмечено, что город ранее подвергался атакам цунами, но теперь его название стало синонимом

Местечко Лхо-Нга Бич на северо-западе Суматры. В 100 км отсюда в Индийском океане утром 26 декабря 2004 г. произошло сильнейшее землетрясение магнитудой 9,0, через 20 мин. после которого на берег обрушилась волна цунами. Системы раннего предупреждения о цунами в Индонезии на тот момент не существовало. Историческая память живущих здесь людей также не могла помочь, так как последнее сильное цунами в этой части Суматры было отмечено более ста лет назад. В результате на этом плотно заселенном побережье погибло 90% жителей. Фото автора

индонезийской трагедии 2004 г. Именно здесь были сняты драматические, невероятные даже для специалистов кадры, запечатлевшие черный поток уже не воды, а какой-то немислимой смеси песка, камней, стволов деревьев, обломков зданий, кусков мебели, искореженных автомобилей, который безостановочно двигался по улицам города. Этот поток нес в себе то, что еще недавно было городскими кварталами, примыкающими к северной, портовой части города. Эти кварталы были разрушены волной цунами до основания, фотографии оттуда напоминают снимки Хиросимы после атомной бомбардировки. Жителей Банда-Ачеха никто никогда не предупреждал об опасности цунами, но даже при наличии предупреждения населению этого района с преимущественно частной, низкэтажной застройкой спастись было просто негде.

Разрушив Банда-Ачех, волна цунами через Малаккский пролив продолжила свое движение на восток, к побережью Малайзии и Таиланда. Здесь первым она достигла тайландского острова Пхукет, отели которого в это рождественское время были заполнены туристами из Европы. Колебания от самого землетрясения здесь были слабыми, 3–4 балла, так что не все находившиеся вне зданий люди их заметили. Небольшое отступление

моря от берега, предшествовавшее первой волне, также никого не насторожило. Люди продолжали лежать на прохладном утреннем песке, дети играли с небольшими набегавшими волнами. Появившийся вдалеке белый бурун высотой в несколько метров привлек к себе внимание, но из заметивших его спастись удалось немногим: только тем, кто раньше других оценил опасность, смог добежать до отеля и подняться на второй-третий этажи. В последующие 10–15 минут несколько тысяч туристов утонули в потоках морской воды, заливавшей тайландские пляжи.

В самом Индийском океане волны цунами, разрушив практически все поселения на северо-западном побережье Суматры, продолжали с большой скоростью двигаться на запад, в сторону Шри-Ланки, Индии и Мальдивских островов. Индийские сейсмические станции зарегистрировали землетрясение, дежурные сейсмологи определили его местоположение

Город Банда-Ачех на севере Суматры был разрушен до основания ударом цунами 26 декабря 2004 г. От его северных кварталов, примыкавших к портовой части города, не осталось ничего. Фото автора



и примерную магнитуду, однако никаких дальнейших действий по оценке угрозы цунами имевшийся у них тогда регламент не предусматривал. Здесь нужно напомнить, что единственное в XX в. опасное цунами на западном побережье Индии наблюдалось почти за 60 лет до этого трагического момента – в 1945 г., и возникло оно после землетрясения магнитудой 8.3 на границе с Пакистаном. На восточном побережье Индии и в Шри-Ланке жертв от цунами в новейшей истории не было. В результате цунами 2004 г. погибло более 30 тыс. человек в Шри-Ланке и почти 11 тыс. – в Индии. Последней жертвой этого цунами стал человек, утонувший на одном из пляжей Кении, куда волны цунами, все еще имевшие высоту до 3 метров, подошли спустя 8 часов после землетрясения.

Всего в этом стихийном бедствии, непосредственно затронувшем побережье 15 государств Индийского океана, погибли граждане 55 стран. Для некоторых из них, например, для Швеции (544 жертвы) или Финляндии (176 жертв), это были наибольшие потери от стихийных бедствий за всю историю этих стран.

Операционный центр Международной системы предупреждения о цунами на Гавайях сразу же начал обработку данных этого события. Первый бюллетень центра, сообщавший о сильном землетрясении магнитудой 8.0 в районе Суматры, был выпущен через 15 минут после начала его регистрации. В последующих бюллетенях магнитуда землетрясения была повышена до 8.5. Важно подчеркнуть, что значение магнитуды 9.0 появилось только на следующий день, когда сейсмологи в США смогли собрать и обработать записи сверхдлиннопериодных приборов, зарегистрировавших собственные колебания Земли, вызванные этим землетрясением. Тем не менее даже магнитуда 8.0 намного превышает пороговое значение, при котором уже следует объявлять тревогу цунами, по крайней мере, для ближайшего побережья. В Индии, Индонезии и других странах бассейна Индийского океана этого не было сделано, поскольку эти страны не имели на тот момент собственных национальных систем предупреждения о цунами. Соответственно, не было регламентов принятия решения о тревогах и, главное, системы доведения информации до населения. При отсутствии такой системы и планов защитных мероприятий любые срочные сообщения о надвигающейся катастрофе, доводимые по любым каналам до посольств, консульств, военных и гражданских органов власти в угрожаемых районах, оказываются малоэффективными.



Мегацунами вместо цунами. Япония, 11 марта 2011 г.

Семь лет спустя не только ученые-сейсмологи, но и весь мир был потрясен потоком срочных сообщений из Японии, где 11 марта 2011 г. произошло сильнейшее землетрясение, за которым последовало разрушительное цунами. Землетрясение началось в 14 часов 11 минут местного времени, в разгар рабочего дня (пятница), его эпицентр располагался в океане, примерно в 150 км от восточного побережья Хонсю. Очаг землетрясения представлял собой магистральный разрыв вдоль главной литосферной границы раздела

между поддвигающейся под цепочку японских островов океанической корой и перекрывающим ее выступом Японской микроплиты. Смещения по этому разрыву достигали 30–50 метров, а по некоторым данным, даже невероятных, никогда не измеряемых прежде 60–80 метров. Поперечная протяженность разрыва составила 150 км, вдоль островной дуги он распространился на 450–500 км. Береговые GPS-станции зафиксировали

Город Мияко в префектуре Ивату оказался одним из первых крупных городов на восточном побережье Хонсю, до которого волна дошла уже через 20 мин. после землетрясения (http://latimesblogs.latimes.com/world_now/2012/03/japanese-tsunami-six-stunning-videos.html). Credit: Ho New / Reuters/ REUTERS

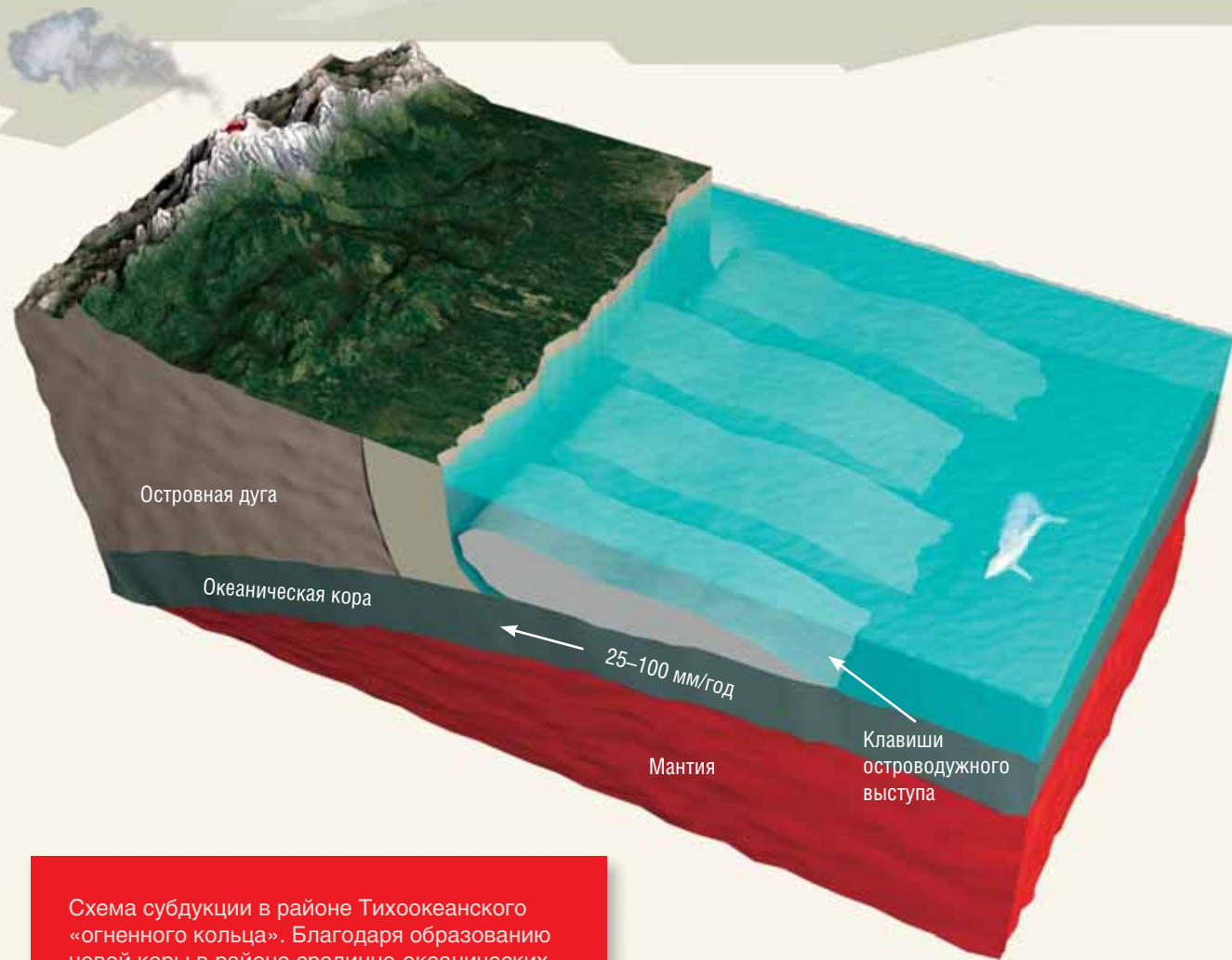


Схема субдукции в районе Тихоокеанского «огненного кольца». Благодаря образованию новой коры в районе срединно-океанических хребтов океаническая кора пододвигается здесь со скоростью 25–100 мм в год под континентальные окраины и островные дуги. Основные напряжения накапливаются на главной литосферной границе раздела между пододвигаемой океанической корой и перекрывающим ее островодужным выступом, разбитым поперечными разломами на ряд блоков (клавиш). Когда напряжения превышают предел прочности пород, блок срывается и выдвигается в сторону глубоководного желоба, при этом происходит землетрясение с магнитудой 7.5–8.0. Когда несколько блоков срабатывают одновременно, происходит мегаземлетрясение с магнитудой до 9.0. Такая схема, несмотря на ее упрощенность, позволяет грубо оценивать возможные магнитуды субдукционных землетрясений и их повторяемость

горизонтальное смещение восточного побережья Хонсю на 5 метров и опускание берега на 1–1.5 м. Землетрясение вызвало значительные деформации морского дна на площади более 15 тыс. км², результатом которых стало самое разрушительное в истории Японии цунами.

На этом побережье Японии, известном под названием Тохоку, стоят десятки памятников жертвам цунами прошлых веков, среди которых было много разрушительных, вызвавших гибель многих тысяч людей (например, при цунами Санрику в 1896 г. погибло 27 122 человека). Однако масштаб бедствия, обрушившегося на это побережье 11 марта 2011 г., превосходил все ранее известное. Население и власти оказались явно к нему не готовы, несмотря на дорогостоящие программы противодействия природным стихиям, проводившиеся в течение последних десятилетий.

В штаб-квартире ЯМА (Японское метеорологическое агентство) в Токио, в чьи функции входит срочная информация населения страны о происходящих землетрясениях и оперативный прогноз цунами, сразу же началась обработка информации, поступающей

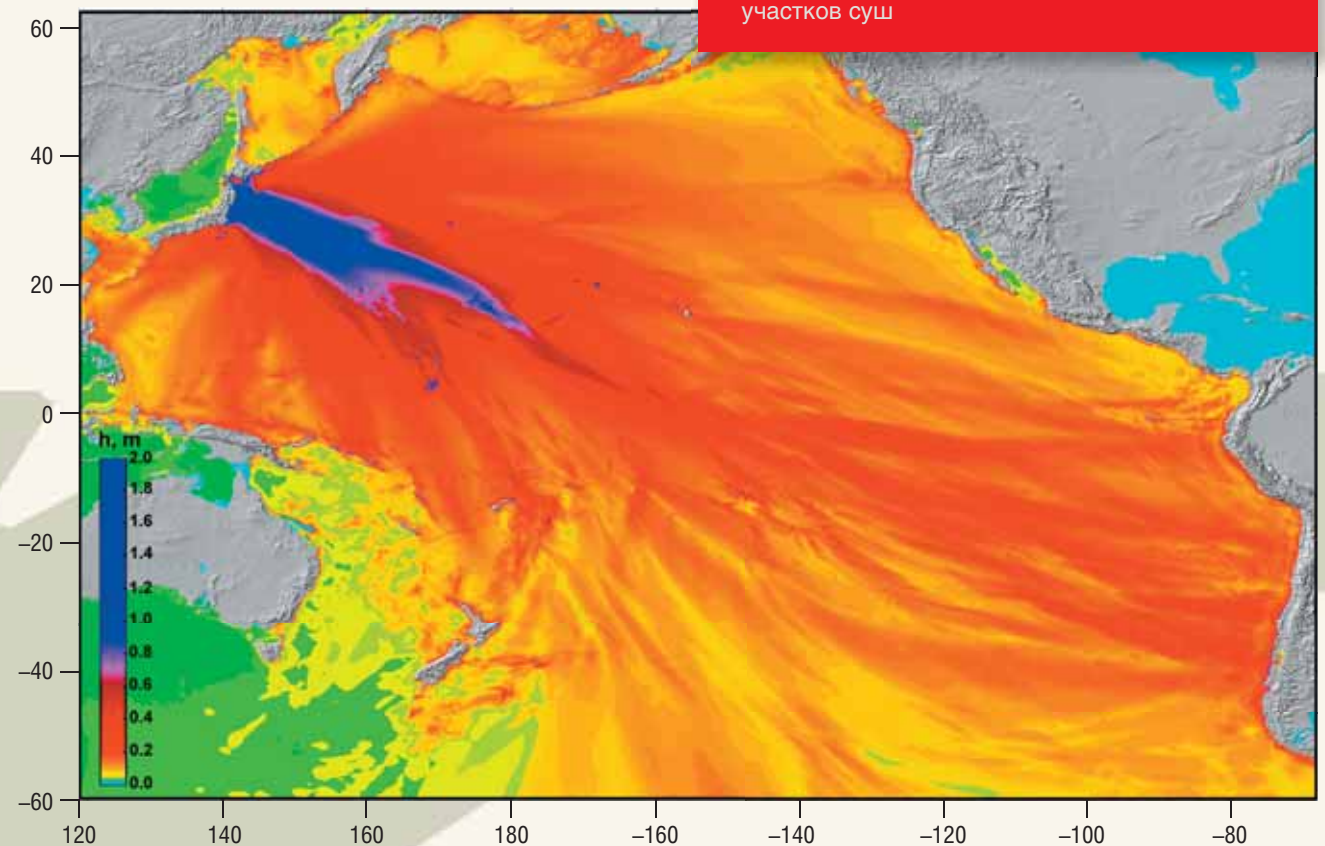
с 1200 сейсмических и 200 мареографных станций, которые регистрировали происходящее землетрясение и последовавшее за ним цунами. Уже через 4.5 сек. после начала регистрации колебаний ближайшими сейсмическими станциями на всех телевизионных каналах появилось срочное сообщение: «Происходит сильное землетрясение!». Через 2 мин. 40 сек. ЯМА выдала первую оценку магнитуды толчка (7.9) и прогноз цунами (до 6 метров). За ним последовал целый поток срочных сообщений со все возрастающей магнитудой, расширяющимися зонами для тревоги цунами и их ожидаемой высотой.

В отличие от Индонезии, не имевшей в 2004 г. собственной национальной системы предупреждения о цунами, Япония находилась в наивысшей среди всех стран Тихоокеанского бассейна степени готовности, как технически, так и организационно. В отношении быстрого действия служба срочных донесений ЯМА сработала выше собственных нормативов, буквально на пределе имевшихся технических возможностей. Результатом, тем не менее, стали 15,884 погибших и пропавших без вести и свыше четверти триллиона долларов материального ущерба. Власти и население региона Тохоку были готовы к отражению угрозы цунами, но не такой силы и масштаба, которое обрушилось на них в этот день. Это

показывает важность оценки и осознания реальности угрозы крайне редких мегасобытий в общей стратегии защиты от стихийных бедствий.

Несмотря на наличие в этом регионе очень плотной сети геофизических наблюдений, никаких краткосрочных (месяцы, недели, дни) предвестников землетрясения установлено не было. Между тем геологи, изучавшие следы палеособытий (доисторических

Современные методы численного моделирования цунами позволяют с достаточной точностью оценить распределение высот цунами в целом по океаническому бассейну. На рисунке приведен результат расчета максимальных амплитуд цунами Тохоку 11 марта 2011 г., выполненного с использованием программных комплексов STATIC (ИВМиМГ СО РАН) (Гусьяков, 1978) и MOST (NOAA) (Titov *et al.*, 2016). Расчеты необходимых инженерам и проектировщикам высот заплеска в каждой отдельной точке побережья представляют собой значительно более трудную задачу, поскольку требуют применения сложных нелинейных алгоритмов и детальных данных о батиметрии дна и рельефе прибрежных участков суши



землетрясений и цунами) в этой части Японии, указывали в своих публикациях, что известное по хроникам землетрясение Джоган 869 г. вызвало катастрофическое цунами, которое проникло на равнине Сендай в глубь суши на 5–7 км, что само по себе говорило о масштабе события. В частности, среди таких ученых был профессор геологии университета Тохоку К. Миноура, а также профессиональные геологи, работавшие в корпорации «ТЕПКО», которой принадлежала атомная станция «Фукусима-Дайичи», наиболее сильно пострадавшая от воздействия цунами. Однако их предостережения о возможности повторения столь разрушительного землетрясения и цунами в регионе Тохоку не были приняты во внимание ни правительством страны, ни руководством корпорации. Результатом этой неадекватности стала тяжелая авария на станции, приведшая к масштабному радиоактивному загрязнению и необходимости полной эвакуации людей из окружающей 30-километровой зоны, что в условиях перенаселенной Японии было крайне непростым делом.

Трагедия Северо-Курильска. 5 ноября 1952 г.

Все Курильские острова расположены в высокосейсмичной зоне, землю здесь «трясет» достаточно часто, и даже приехавшие сюда быстро к этому привыкают. Однако колебания, начавшиеся рано утром 5 ноября 1952 г., по своей силе сразу превосходили все до сих пор испытанное жителями г. Северо-Курильска, расположенного на острове Парамушир, самом большом из северных Курильских островов. Проснувшиеся от сильных толчков люди в темноте (городская электростанция по ночам не работала), будили и быстро одевали детей, чтобы вывести их на улицу. Земля ходила ходуном, деревянные дома и бараки трещали, в окнах лопались стекла, внутри рассыпались печи. О том, что после землетрясения может последовать цунами, большинство людей не знали, поскольку приехали на Курилы недавно, вскоре после освобождения их от японцев в 1945 г. Через 30–40 мин. после землетрясения со стороны океана послышался отдаленный гул, и еще через минуту на город обрушилась первая волна, высотой 5–7 метров. Ее подход по проливу между островами Парамушир и Шумшу первыми



Год спустя после цунами Тохоку 11 марта 2011 г. Профессор И. Цудзи (Токийский университет) осматривает руины домов в г. Рикюзен-Таката (префектура Мияги). Своевременное предупреждение и срочная эвакуация позволили спастись большинству его жителей, но, проведя ночь во временных убежищах и вернувшись на следующее утро, они обнаружили на месте своих домов одни фундаменты. Цунами отняло у них все.
Фото автора



Разрушения в г. Северо-Курильске (о. Парамушир) после цунами 5 ноября 1952 г. Высота волн здесь достигала 12–15 м. Через 23 часа цунами достигло побережья Чили, все еще имея высоту до 2 м.

заметили военнослужащие и начали стрелять в воздух, пытаясь предупредить остальных жителей. Эта волна, залит до половины наиболее близко стоящие к берегу дома, отхлынула, унося с собой много человеческих тел и обломков. Не успели люди прийти в себя после пережитого ужаса, как через 15–20 минут на город обрушилась вторая, еще более высокая волна. Имея уже на урезе высоту более 10 метров, она сносила все на своем пути, от домов оставались одни фундаменты. Сила ударов волны была так велика, что укрепленные на бетонных фундаментах станки и тяжелые паровые лебедки срывались с креплений и отбрасывались далеко от мест их установки. Волна переворачивала и тащила за собой тяжелые трактора и гусеничные вездеходы. Прощедшая через город вода достигла окружающих сопок, на которых спасались люди, ушедшие туда после первой волны, и начала скатываться обратно в котловину, где была расположена центральная часть города. Здесь образовался огромный водоворот, в котором плавали обломки строений вместе с цеплявшимися за них людьми и мелкие суда. «Дома и крыши домов кидало,

как спичечные коробки, и уносило в море», – писал один из очевидцев. Пролив между островами оказался сплошь заполнен плавающими домами, крышами и другими обломками, на которых пытались спастись люди. Температура воздуха была около нуля по Цельсию (накануне выпал первый снег), температура воды 6–8 градусов.

Камчатское землетрясение и цунами 4 ноября 1952 г. является самым крупным стихийным бедствием на территории России за всю ее современную историю. Оно было крупнейшим как по выделившейся из земных недр энергии, так и по масштабам разрушений и числу погибших. Город Северо-Курильск был полностью уничтожен. Точное число жертв цунами, возможно, и было посчитано, но никогда не было обнародовано. Уже в период перестройки появилась цифра потерь среди гражданского населения – 2336 человек. Однако большинство из находившихся в то время на Курилах людей были военными. В книге камчатского журналиста и краеведа А. А. Смышляева «Время красной рыбы» приведена экспертная оценка общего количества жертв на Северных Курилах – от 15 до 17 тыс. человек.

В сейсмологических каталогах того времени магнитуда землетрясения по шкале Ms приведена как 8.5, но, по современным оценкам, основанным, в частности,





Разрушения в г.Северо-Курильске (о. Парамушир) после цунами 5 ноября 1952 г.

на приборных записях цунами, более длиннопериодная магнитуда Mw, точнее отражающая размер события, оценивается как 9.0. Землетрясение породило трансокеанское цунами, зарегистрированное всеми мареографными станциями, работавшими тогда в Тихом океане. На Гавайях была зафиксирована волна высотой 9 м, на чилийском побережье, удаленном от Камчатки на 16 тыс. км, высота волн составила почти 2 м (в южной части Чили это было наиболее сильное цунами в период с 1920 по 1960 г., т. е. в течение почти 40 лет).

Камчатское цунами 1952 г. оказалось первым событием такого масштаба, при котором была задействована созданная в начале 1950-х гг. Международная служба предупреждения о цунами в Тихом океане с оперативным центром в Гонолулу (Гавайи). Своевременные предупреждения об опасных волнах позволили избежать жертв за пределами ближней зоны, непосредственно примыкавшей к очагу землетрясения. СССР тогда не был участником этой системы, но в любом случае предупреждение, полученное из Гонолулу через час после землетрясения (работать быстрее тогдашняя техника связи и принципы обработки данных не позволяли), оказалось бы опоздавшим.

«Оргвыводы» из произошедшей катастрофы, однако, были сделаны. Академия наук начала исследования проблемы цунами, появились первые научные публикации. Правительством СССР в 1957 г. было принято решение о создании Службы предупреждения о цунами (СПЦ) на Дальнем Востоке. Академии наук была поручена разработка принципов ее работы, а ряду конструкторских бюро – создание специальной аппаратуры для СПЦ.

И уже на следующий год (скорость исполнения правительственных решений тогда была очень высокой) такая служба начала работу и дала свой первый прогноз при Урупском землетрясении 7 ноября 1958 г., породившем опасное цунами на Южных Курилах.

Одно мегацунами стоит десятков «обычных», тоже опасных и разрушительных

Формальное условие выделения трансокеанских цунами в исторических каталогах состоит в проверке наличия высот заплеска более 5 м на расстоянии свыше 5000 км от очага цунами. Физический смысл этого критерия заключается в способности цунами производить разрушения на противоположных берегах океанического бассейна. Оказывается, что среди более чем 2250 цунамигенных событий, произошедших в Мировом океане со II тыс. до н.э. по настоящее время, таких событий насчитывается всего 18, т. е. менее 1% от общего числа. Однако эти события ответственны за более чем половину от общего числа жертв цунами и за значительную долю произведенного материального ущерба.

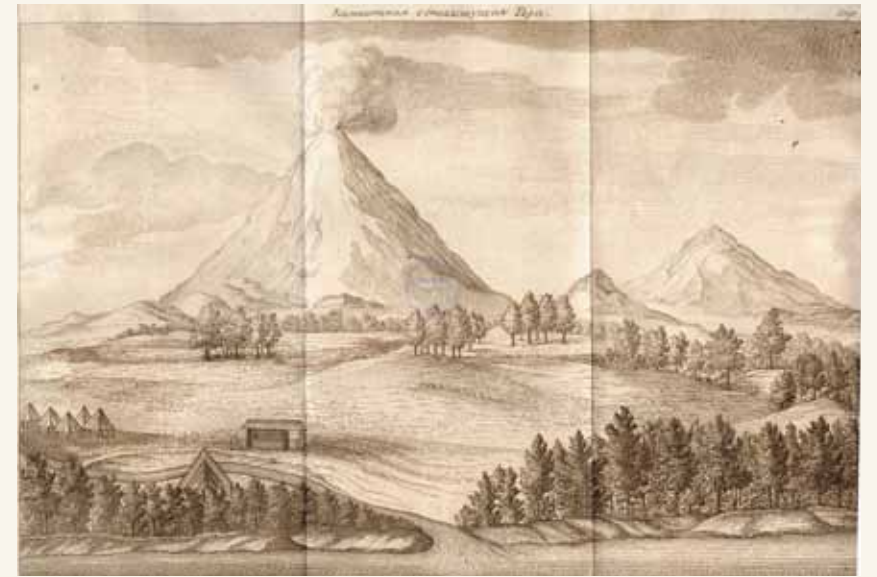
Оставшиеся 99% – это локальные и региональные цунами. Создаваемые ими высоты заплеска на ближайшем побережье могут быть весьма значительны и достигать десятков и даже сотен метров (с рекордной высотой волны в 525 м в бухте Литуйя на Аляске, которая возникла при береговом обвале, вызванном землетрясением магнитудой 8.0, которое произошло в этом районе 10 июля 1958 г.). Однако протяженность зоны опасного воздействия таких цунами, как правило, невелика и составляет от нескольких сотен метров

Предыдущее цунами, сравнимое по силе с цунами 1952 г., произошло на Камчатке в 1737 г. Мы знаем о нем благодаря подробным сведениям, собранным Степаном Крашенинниковым, участником Второй Камчатской экспедиции, прибывшим на Камчатку из Охотска две недели спустя после землетрясения. Из рапорта С. П. Крашенинникова профессорам И. Г. Гмелину и Г. Ф. Миллеру от 14 ноября 1737 г.: «Октября 6 дня [17 октября н.с.] в 3 часу полуночи сперва земля так жестоко тряслася, что от него многия балаганы попадали и людям стоять невозможно было, и продолжалось с четверть часа. Оное трясение приходило волнами с ЮЮВ, и по прошествии валов земля чрез долгое время дрожала, а потом как перестало трясение, то воды вдруг с моря с великим шумом сажени на три [6.3 м] прибыло, которая тотчас в море далеко ушла.

По сбежании воды в другой раз земля тряслася, только очень легко, а после опять вода с моря до того же места пришла, где в первый раз была, и так же, как и первая, нимало не стояв в одной мере, в море ушла так далеко, что в проливе, которой между первого и другого острова имеется [Второй Курильский пролив], камень великой дикой на сажень сверх воды виден был. Спустя с четверть часа в третий раз воды моря с превеликим шумом сажени на десять [21 м] выше прежних мест прибыло, которою многие иноземческие жилища унесло. Оная вода, нимало не стояв, опять в море убежала и, ставши на море, чрез два дня то убывала, то прибывала»



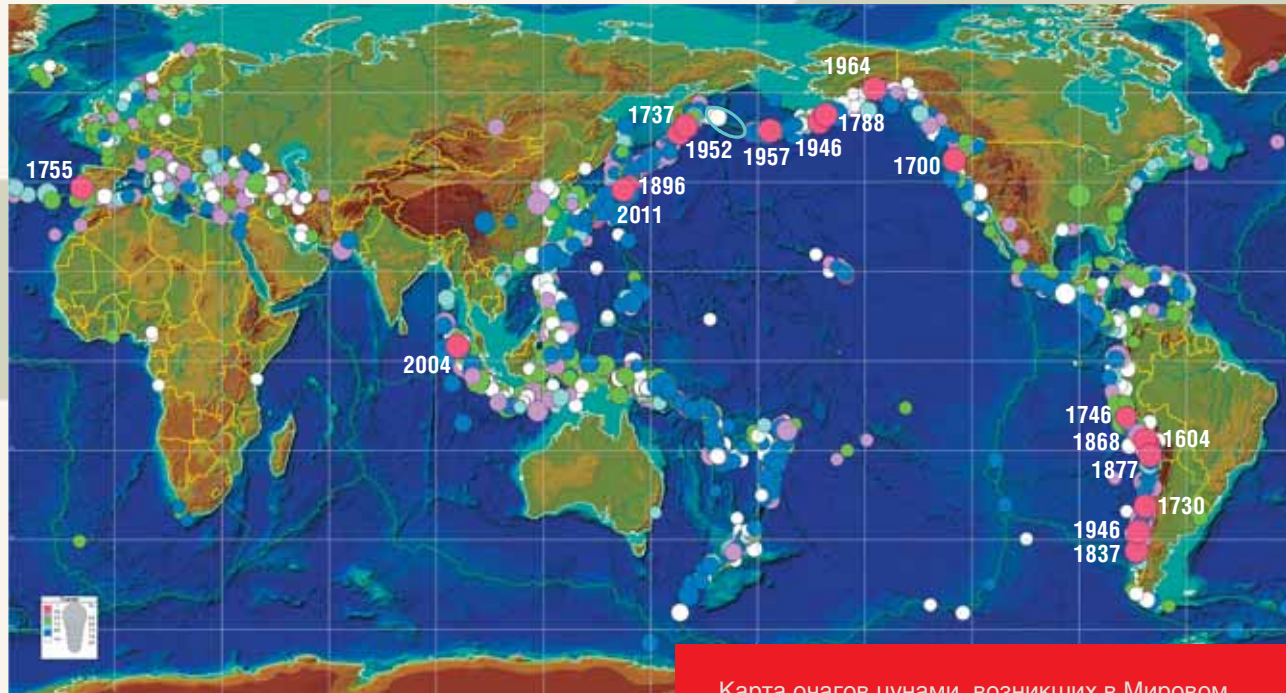
С. Крашенинниковъ.



Крашенинников Степан Петрович (1711—1755), путешественник, исследователь Камчатки, академик Петербургской Академии наук. Гравюра пунктиром А. А. Осипова. 1801 г.

«Камчатская огнедышащая гора». Гравюра из русского издания 1755 г. «Верхняя часть составляет целую треть высоты ее, а окружность ее на подножье больше трехсот верст. Шатер ее весьма ... крут и со всех сторон росщелялся вдоль до самого тощего нутра ее. Самой верх ее от часу становится плосче, без сомнения для того, что во время пожара жерло по краям осыпается... Дым из верху ее весьма густой идет беспрестанно, но огнем горит она в сем, в восемь, в десять лет; а когда гореть начала, того не запомнят. Пепел выметывается из ней по объявлению жителей на каждой год по два и по три раза, и иногда в таком множестве, что верст на 300 во все стороны земля им на вершок покрывается». По: (Крашенинников С. П. Описание Земли Камчатки. СПб., 1994. Т. 1. С. 174—175).

Фрагмент «Карты Земли Камчатки с около лежащими местами». Из русского издания 1755 г.



Карта очагов цунами, возникших в Мировом океане в течение последних двух тысяч лет. Очаги известных мегацунами (с указанием года) – кружки красного цвета. Источник: Глобальная база исторических цунами, поддерживаемая в лаборатории цунами ИВМиМГ (http://tsun.sccc.ru/nh/tsun_descr.html). Эллипс показывает положение сейсмической бреши в районе Командорских островов, где за весь исторический период не было сильных землетрясений

(в случае локальных цунами обвального происхождения) до первых сотен километров (в случаях сильных цунами сейсмотектонического происхождения).

В противоположность этому, опасное воздействие сильнейших трансокеанских цунами может проявляться на значительно больших участках побережья, протяженностью до 700–800 км и более. Самым важным, однако, является то, что такие цунами способны производить разрушительный эффект в дальней зоне (более 1000 км от очага), вплоть до противоположных берегов океанического бассейна, чего никогда не происходит при обычных, даже разрушительных региональных цунами. Во время последних могут наблюдаться большие, достигающие 20–30 м высоты заливания берега, однако зона таких заплесков ограничена ближайшим к очагу участком побережья, за пределами которого высоты волн быстро спадают. В дальней же зоне такие цунами, как правило, регистрируются только инструментально.

Если проанализировать список известных на данный момент трансокеанских цунами с их основными параметрами (Гусьяков, 2014), то можно увидеть, что 15 из 18 трансокеанских цунами возникли в результате землетрясений магнитудой 9.0 и выше. Это верно, по крайней мере, для всех событий начиная с середины XX в., когда появилась возможность инструментально измерять магнитуду в длиннопериодной области.

Если основываться на данных этого списка, значение магнитуды $M_w = 9.0$ можно принять в качестве порога для выделения трансокеанских мегацунами среди всех прочих цунамигенных событий. Похоже,

что даже незначительное снижение величины M_w (на 0.2–0.3 балла) при сохранении разрушительного потенциала события в ближней зоне приводит к резкому снижению его опасности для удаленных побережий. Последним таким примером является цунами Мауле в Чили 27 февраля 2010 г. ($M_w = 8.8$), максимальные заплески которого на чилийском побережье достигали 25–29 м. Однако на Гавайях, в Японии и на Курило-Камчатском побережье высоты волн не превышали 1–2 м, и хотя объявление тревоги на этих побережьях было вполне оправданным, реальной угрозы и ущерба от такой волны ни на Гавайях, ни в Японии не было.

Другой важной особенностью трансокеанских мегацунами является их способность проникать в окраинные моря и оказывать опасное воздействие на участки океанского побережья, не имеющие перед собой зон субдукции (к таковым относится примерно 80% побережья Мирового океана). Как известно, большинство цунамигенных землетрясений происходит именно в субдукционных зонах. Возникающие здесь сильные

(с магнитудой до 8.5) землетрясения способны возбудить опасные цунами с высотами до 15–20 метров на ближайших островах, но зона их воздействия ограничена размерами самого очага, т. е. составляет 200–300 км. Характерным примером является последнее разрушительное цунами на Средних Курилах, возникшее 15 ноября 2006 г. после землетрясения магнитудой 8.3. На острове Симушир высоты заплесков достигали 20–22 метров, при этом на южных и северных Курилах они не превышали одного метра, а на охотском побережье Колымы амплитуда волн составляла не более 30 см.

Обладающие же совсем другими характеристиками цунами, порожденные мегаземлетрясениями, способны проникать сквозь цепочки островов и вызывать значительную «раскачку» акватории окраинных морей. Этот важный результат, впервые обнаруженный в работах новосибирской группы исследователей цунами (Бейзель и др., 2014), подтверждается материалами наблюдений реальных исторических событий. В Магадане, например, наиболее значительные колебания уровня с размахом свыше 2 метров наблюдались при Камчатском цунами 1952 г. и Чилийском цунами 1960 г. В корякском поселке Пахачи размах колебаний уровня в 1960 г. достигал 7 метров, и это наибольшая известная

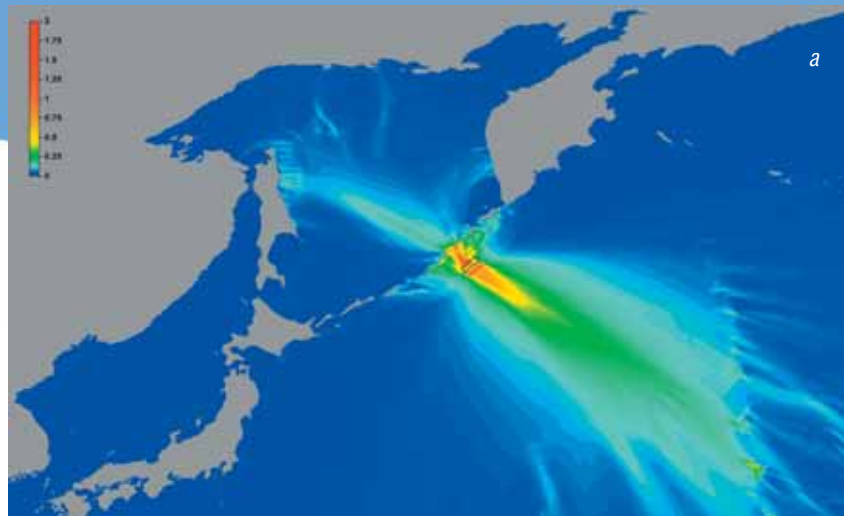
для этой части Берингова моря высота цунами. Что касается других стран, то побережья островных систем Тихого океана, таких как Гавайи, Таити, Тонга, Маркизские острова, страдают, главным образом, от удаленных цунами, порожденных субдукционными землетрясениями класса M_9 , происходящими в разных частях Тихоокеанского «огненного кольца».

Где это случится в следующий раз?

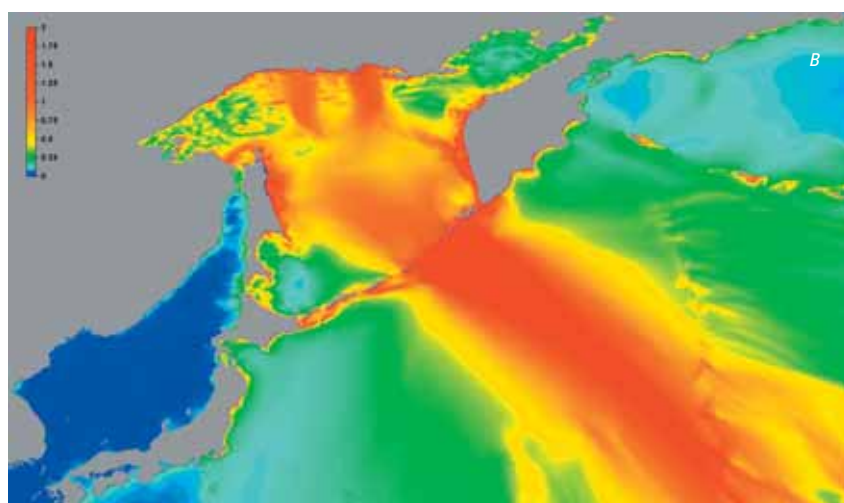
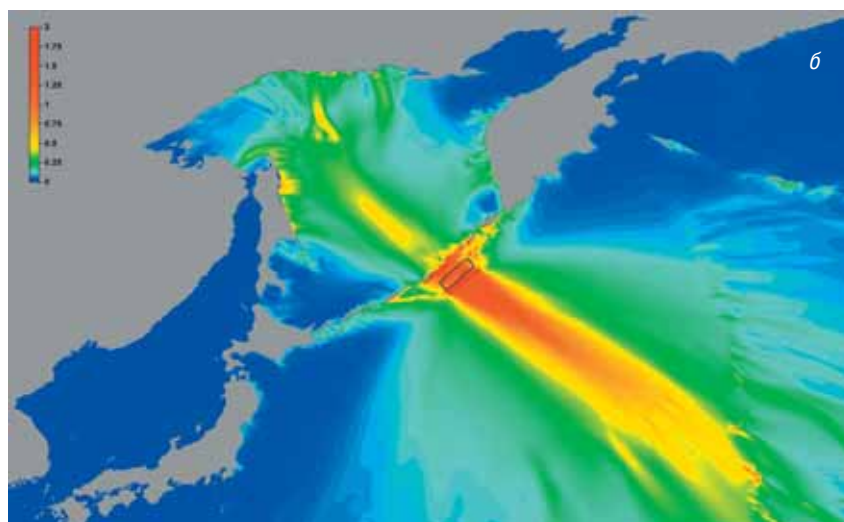
Большинство из идентифицированных мегацунами (16 из 18) произошло в Тихом океане, одно – в Индийском (2004 г., Индонезия) и одно – в Атлантическом (1755 г., Лиссабон). Здесь нужно отметить, что список мегасобытий, приведенный в вышеупомянутом списке, появился только в последние годы, когда после двух разрушительных цунами начала текущего столетия (Индонезийского в 2004 г. и Тохоку в 2011 г.) ученые начали более внимательно изучать данные о прошлых сильных цунами. Ранее были известны только пять трансокеанских цунами (Алеуты, 1946; Камчатка, 1952; Алеуты, 1957; Чили, 1960 и Аляска, 1964). Появление более ранних событий в этом списке обязано

Список исторически известных трансокеанских цунами и их основные параметры

Дата и местоположение	Магнитуда землетрясения (M)	Максимальная высота цунами в ближней зоне ($H_{мнЗ}$, м)	Максимальная высота цунами в дальней зоне (более 5000 км от очага) ($H_{днЗ}$, м)	FAT – число жертв. Прочерк в столбцах означает отсутствие данных
24 ноября 1604, Перу	9	10–15	–	74
26 января 1700, Каскадия	9	10	2–4	–
8 июля 1730, Чили	9+	>10	2–3	3
17 октября 1737, Камчатка	9	63	12–15	–
29 октября 1746, Перу	9+	24	–	4800
1 ноября 1755, Лиссабон	9	30	7	~10000
7 ноября 1837, Чили	8,5	8	6	62
13 августа 1868, Чили	9	15	5,5	619
9 мая 1877, Чили	9	24	12	562
15 июня 1896, Япония	7,6	38,2	9	27122
1 апреля 1946, Алеуты	8,6	42,2	20	167
4 ноября 1952, Камчатка	9	18	9,1	>10000
9 марта 1957, Алеуты	9,1	22,8	16,1	2
22 мая 1960, Чили	9,6	15,2	10,7	1283
28 марта 1964, Аляска	9,3	68	4,9	124
26 декабря 2004, Суматра	9	50,9	9,6	227898
11 марта 2011, Тохоку	9	38,9	3	18453



Современные методы численного моделирования цунами позволяют достаточно быстро выполнять сценарные расчеты цунами на реальных участках акватории океана. На этой серии рисунков показаны расчеты цунами от модельных очагов с магнитудами $M_w = 7.8$ (а), 8.4 (б) и 9.0 (в), расположенных в районе Средних Курил. Расчеты выполнены в ИВТ СО РАН с использованием программных комплексов MGS и STATIC. Видно, что проникновение волн цунами в Охотское море начинается уже при магнитуде 8.4, но по-настоящему опасными для Охотоморского побережья они становятся при магнитуде 9.0



пересмотру параметров некоторых сильных цунами прошлых лет на основе новых данных об их пространственной распространенности и результатов исследования их геологических отложений.

Показательным примером в этом отношении являются работы американских геологов и геоморфологов из университета штата Вашингтон по восстановлению истории сильнейших землетрясений на северо-западе США в районе Каскадия. По сравнению с соседней Калифорнией, этот район обладает гораздо более низким уровнем современной сейсмичности. Тем более удивительным оказалось обнаружение явных геологических следов сильнейших землетрясений и последующих цунами, происшедших здесь в доисторические времена. Последнее из таких мегаземлетрясений произошло в районе Сиэтла около 300 лет тому назад, еще до прибытия сюда первых европейцев. Его отголоски («сильное трясение земли, случившееся зимней ночью») до начала XX в. сохранялись в легендах местных индейцев. Радиоуглеродные даты

отложений цунами укладывались в интервал 1700 ± 20 , а дендрохронологические датировки деревьев, погибших при опускании берега под уровень приливов, позволили сузить его до 1700 ± 2 . Разрушительное цунами охватило не менее 1000 км береговой линии района Каскадия и, несомненно, распространилось по всему Тихому океану. Действительно, целенаправленные поиски в японских архивах позволили обнаружить сообщения о необычных, не предварявшихся землетрясением колебаниях уровня моря, происходивших на многих участках восточного побережья Японии в ночь с 27 на 28 января 1700 г. Сейчас это палеособытие введено в каталоги цунами и землетрясений с вполне надежно определенными параметрами: координатами очага (39.5 с. ш., 142.0 з. д.), магнитудой (9.0), датой (27.01.1700) и даже оценкой времени (6 час. по Гринвичу). Результатом этих уникальных, действительно междисциплинарных исследований стала серия публикаций в престижных научных журналах, включая *Science* и *Nature*, а также монография «Забывтое цунами 1700 г.» (Atwater *et al.*, 2005).

До начала нынешнего столетия считалось, что мегаземлетрясения, способные порождать трансокеанские цунами, могут возникать лишь на некоторых особых участках зон субдукции. Относительно механизма их возникновения было несколько гипотез. Первоначальная идея состояла в том, что если океаническая плита относительно молодая, т. е. более горячая и легкая, то ее субдукция должна проходить под меньшим углом, обеспечивая, следовательно, большее сцепление с перекрывающей континентальной корой и давая возможность накопления больших напряжений, освобождающихся в предельно сильных событиях. Анализируя четыре известных на то время мегаземлетрясения (Камчатка, 1952, Алеуты, 1957, Чили, 1960 и Аляска, 1964), американские сейсмологи Л. Рафф и Х. Канамори обнаружили, что все они произошли в зонах субдукции, характеризующихся возрастом менее 80 млн лет и скоростью поддвига более 5 см/год (Ruff, Kanamori, 1980). Под это были подведены и некоторые физические основания, одно из которых состояло в том, что для менее плотной океанической коры требуются большие усилия для погружения ее под континентальную кору. Однако наличие касательной компоненты относительного движения плит и присутствие толстого слоя осадков в области глубоководной впадины рассматривались как факторы, понижающие вероятность возникновения мегаземлетрясений. С такой точки зрения землетрясение 2004 г. с магнитудой 9.0 вблизи Суматры оказалось совершенно неожиданным для сейсмологов. Ранее этот участок зоны субдукции считался способным порождать только землетрясения с магнитудой 8.0. Еще более удивительным оказалось то, что при общем касательном движении плит преобладающим механизмом главного

толчка оказался пологий подвиг, подвижка по разрыву которого направлена практически вкрест простирания зоны контакта плит.

Возникновение в 2011 г. землетрясения магнитудой 9.0 в наиболее цунамиактивном регионе Японии (Тохоку), где в историческое время таких землетрясений не было известно, окончательно убедило большинство сейсмологов, что мегаземлетрясения, по-видимому, могут возникать на любых участках зон субдукции. Единственной причиной отсутствия таких событий в некоторых зонах является недостаточная длина инструментальных и исторических каталогов, которые в большинстве регионов существенно короче, чем период повторяемости таких землетрясений.

Командорская «брешь» — угроза Дальневосточному побережью?

На карте очагов цунамигенных землетрясений хорошо заметна брешь в районе Командорских островов, где за все историческое время не было сильных землетрясений. Впервые на существование этой бреши было указано уже почти полвека назад в работах отечественных, а затем и зарубежных сейсмологов. С тех пор сейсмический «потенциал» бреши только усиливается, поскольку GPS-наблюдения фиксируют непрерывное относительное смещение Беринговой плиты относительно Тихоокеанской со скоростью примерно 30–50 мм в год. Нет никакого сомнения в том, что рано или поздно этот потенциал реализуется в виде сильного землетрясения, вопрос лишь в том, какова будет его магнитуда и какой механизм реализуется в его очаге. Размеры зоны «сейсмического затишья» составляют порядка 500–600 км, что вполне достаточно для размещения здесь очага землетрясения магнитудой 9.0, способного породить трансокеанское цунами. Ответ на вопрос о том, будет ли оно серьезно угрожать побережью Камчатки и Курильских островов, в значительной степени зависит от механизма очага будущего мегаземлетрясения. Определения механизмов более слабых землетрясений, время от времени происходящих в этой зоне, показывают, что в них значительную долю составляет сдвиговая компонента, отражающая преимущественно боковой характер относительного смещения плит в этом районе. Такие очаги возбуждают существенно (на порядок) меньшие цунами, чем очаги с преимущественно взбросовой или поддвиговой подвижкой. Однако, как отмечалось выше, похожая ситуация косоугольного смещения плит реализовалась в Суматро-Андаманской зоне, при этом подвижка в очаге магистрального разрыва землетрясения 2004 г. оказалась практически поддвиговой, ориентированной вкрест простирания дуги.

Сценарий «наихудшего варианта» для будущего Большого Командорского землетрясения, рассмотренный в работах отечественных сейсмологов и специалистов по геотектонике (Лобковский и др., 2014), дает волны цунами высотой 8–10 метров для всего восточного побережья Камчатки, которые окажутся, несомненно, разрушительными для той береговой инфраструктуры, которая еще осталась здесь со времен СССР. Такие сильные цунами не наблюдались здесь с 1952 г., а на участках к северу от Кроноцкого полуострова – с 1923 г., т. е. почти сто лет. Будут затронуты и Курильские острова, хотя большой катастрофы здесь не должно быть: волны цунами неспособны распространяться на большие расстояния вдоль побережья, поскольку в силу рефракции на наклонном дне (материковом склоне и шельфе) волновая энергия постоянно «заворачивает» к берегу. Наиболее опасными землетрясение и цунами окажутся для жителей Командор, хотя самое крупное поселение там (пос. Никольское) хорошо защищено от цунами своим расположением на высокой (до 20 метров) береговой террасе.

Когда это случится в следующий раз?

Землетрясения предельно возможной магнитуды (9.0–9.5) являются достаточно редкими событиями, однако именно они вызывают наибольший ущерб и потери человеческих жизней.

Смещение по разрыву в очагах таких землетрясений может достигать 25–50 м и более. Относительная скорость плит в районах субдукции варьируется от 25 до 100 мм в год. Тогда, если предположить, что все накопленные напряжения освобождаются только в очагах сильнейших землетрясений, их период повторяемости должен быть в пределах от 1000 до 250 лет. Если часть деформаций освобождается в виде асейсмического крипа и в очагах меньших землетрясений, тогда период повторения может быть еще более длительным. Фактический интервал времени между двумя последовательными мегасобытиями изменяется в весьма широких пределах: для уже известных исторических землетрясений от 215 лет (Камчатка, 1737 и 1952) до 1142 лет (Тохоку, 869 и 2011). Наиболее длинный ряд наблюдений таких событий, протянутый к настоящему времени почти на 10 тыс. лет назад, существует для субдукционной зоны Каскадия на северо-западе США. Хронология событий здесь была восстановлена по данным бурения прилегающих участков морского дна, где осадочные колонки содержат отчетливые следы турбидитных потоков, инициированных сильными землетрясениями. Оказалось, что средний интервал повторяемости сильнейших землетрясений этой зоны составляет порядка 650 лет, однако фактические

промежутки времени между двумя последовательными событиями изменяются в пределах от 300 до 1500 лет.

Оценка реальных интервалов повторяемости таких событий составляет главную проблему их долгосрочного прогноза. В силу их редкости для большинства регионов, не столь подробно изученных геологическими методами, как северо-запад США, повторяемость не может быть посчитана непосредственно, и ее приходится оценивать косвенными методами, например, путем линейной экстраполяции в область больших магнитуд (8–9) графика повторяемости землетрясений умеренных магнитуд (5–7), достаточно надежно описываемого законом Гутенберга-Рихтера. При этом для некоторых регионов выясняется, что фактическая повторяемость предельно сильных землетрясений значительно (до 3–5 раз) превышает оценку, вытекающую из закона Гутенберга-Рихтера.

Другой возможный метод оценки повторяемости мегасобытий – это поиск и исследование геологических следов цунами, оставленных ими на побережье. Такие методы в настоящее время хорошо развиты и широко применяются на различных участках побережья Мирового океана, в том числе и на побережье Камчатки, Курильских островов и Приморья. В результате многолетних полевых исследований, выполняемых сотрудниками Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН и Тихоокеанского института географии ДВО РАН, были найдены десятки новых неизвестных ранее событий, произошедших там за последние 3–5 тыс. лет, что позволило значительно удлинить исторический каталог цунами для Курило-Камчатского побережья. Большой проблемой по-прежнему является выделение среди этих событий следов реальных мегацунами. Стандартный критерий – по высоте и дальности заплеска – здесь не работает, поскольку в субдукционных зонах иногда случаются необычные землетрясения магнитудой 7.0–7.5, цунами от которых при небольшом охвате побережья дают локальные заплески с высотами до 15–20 метров (так называемые «цунами-землетрясения», по терминологии Х. Канамори). Выделить отложения мегацунами среди других подобных событий можно только путем тщательного контроля вдоль береговой протяженности зоны максимальных заплесков. Это, однако, требует существенно большего объема полевых работ, что в тяжелых условиях Камчатки и Курильских островов является достаточно сложным делом.

На сегодняшний день опубликована только одна работа (Разжигаева и др., 2017), в которой сделана попытка обобщения результатов многочисленных находок следов палеоцунами на Южных Курилах с точки зрения выделения среди них возможных мегацунами. В ней на основе анализа пространственного масштаба проявлений следов палеоцунами на Южных Курильских островах за последние 2.5 тыс. лет выделены наиболее



Город Аньер на западной оконечности о. Ява (Индонезия). Автор статьи (второй слева) с участниками научной конференции, посвященной 120-летию со дня извержения вулкана Кракатау. Позади – 200-тонный коралловый блок, принесенный цунами, которое возникло после взрыва и обрушения кальдеры вулкана Кракатау 27 августа 1883 г. Поскольку источник (вулканический взрыв) был практически точечным сравнительно с очагом мегаземлетрясения, трансокеанское цунами не возникло, но на берегах Зондского пролива, разделяющего острова Ява и Суматра, высота волн достигала 35 м, погибло 36,417 человек. Фото автора

крупные события, которые могут рассматриваться как кандидаты в мегацунами. Примерные датировки этих событий относятся к XVII, XIII, X вв., а также к интервалам 1400–1600, 1700–1800 и 2000–2100 лет тому назад. Помимо выяснения пространственного масштаба палеособытий, другой сложной проблемой являются их датировки, получение которых, как правило, требует дорогостоящих радиоуглеродных анализов. Правда, применительно к оценке долгосрочной цунамиопасности эта проблема несколько упрощается. Поскольку такие оценки делаются на вероятностной основе, точные даты событий необязательны, достаточно знать их общее число за определенный интервал времени.

Это можно делать даже в полевых условиях, на основе использования тефрохронологической шкалы, которая хорошо разработана для Камчатки и Курильских островов.

Защититься от 20-метровой волны

Побережье Тохоку, в наибольшей степени пострадавшее от мегацунами 11 марта 2011 г., морфологически относится к побережью риасового типа, при котором крутые, обрывающиеся в сторону океана берега прорезаются узкими заливами, примыкающими к долинам впадающих в океан рек. По сути, эти долины являются единственными пригодными для жилой застройки местами на более чем 900-километровом протяжении этого побережья. В настоящее время практически все эти долины перегорожены защитными дамбами высотой до 7–8 метров, эффективно защищающими расположенные за ними жилые кварталы. Однако эти защитные сооружения не смогли уберечь жителей от волны высотой 12–15 метров, обрушившейся на это побережье 11 марта 2011 г. Строительство же более высоких защитных дамб высотой 15–20 метров не только экономически очень затратно, но зачастую просто невозможно, так как в условиях сплошной застройки трудно выделить землю для закладки оснований таких массивных сооружений.

Одним из последствий цунами 2011 г. в Японии стало принятие так называемой двухуровневой стратегии защиты от цунами. Правительство официально признало, что существующие береговые защитные сооружения могут защитить население от обычных цунами, высоты которых чаще всего не превышают 5–7 метров, но оказываются бесполезными в случае редких мегацунами с высотами до 15–20 метров. Поэтому все критически важные сооружения (школы, больницы, образовательные, торговые и культурные центры) должны постепенно выноситься из опасной зоны. В условиях перенаселенной Японии, где все сколь-нибудь пригодные для строительства участки в береговой зоне уже давно заняты, найти новые площадки для их размещения практически невозможно. Поэтому стратегия предусматривает инженерные работы по преобразованию берегового рельефа с целью искусственного создания ровных площадок для размещения таких объектов. Подобная практика планирования и строительства в цунамиопасных зонах, возможно, будет эффективной, однако вряд ли она сможет стать общепринятой в силу ее высокой затратности.

Конечная цель изучения природных катастроф состоит в выработке стратегии и практических рекомендаций для лиц, уполномоченных принимать решения по оптимизации потенциальных рисков и стоимости превентивных и защитных мероприятий. Оптимальный уровень реакции – это баланс между ожидаемыми потерями от стихийного бедствия и экономическими затратами на их предотвращение (Stein, Stein, 2012). Достижение этого баланса является непростой задачей, поскольку люди, уполномоченные принимать решения, не являются экспертами в данной области и склонны принимать рекомендации, полученные от ученых как «истину в последней инстанции». Однако эксперты и ученые, привлекаемые к выработке таких рекомендаций, имеют ограниченную способность предсказания будущих событий, поэтому они должны честно и откровенно сообщать о всех неопределенностях, связанных с получаемыми оценками риска.

Любой экспертный прогноз должен быть по возможности прозрачен, что означает, что лежащие в его основе предположения, гипотезы и модели процессов, использованные данные и их неопределенности должны быть оговорены. Четкое сообщение «уровня неопределенности» результата, даже в случаях, когда он не может быть строго посчитан, является совершенно необходимым. К сожалению, это происходит далеко не всегда. Для многих уже опубликованных карт сейсмо- и цунамиопасности реальные неопределенности оказываются значительно большими, чем указанные составителями карт и основанные часто только на технике вычислений.



Литература

Бейзель С.А., Гусяков В.К., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И. Оценка воздействия удаленных цунами на Дальневосточное побережье России на основе результатов математического моделирования // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 90, № 5. С. 578–590.

Гусяков В.К. Остаточные смещения на поверхности упругого полупространства // Условно-корректные задачи математической физики в интерпретации геофизических наблюдений. Новосибирск: ВЦ СО РАН, 1978. С. 23–51.

Гусяков В.К. Сильнейшие цунами мирового океана и проблема безопасности морских побережий // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 90, № 5. С. 496–507.

Лобковский Л.И., Баранов Б.В., Дозорова К.А. и др. Командорская сейсмическая брешь: прогноз землетрясения и расчет цунами // Океанология. 2014. Т. 54, № 4. С. 561–573.

Разжигаяева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А. и др. Проблема палеореконокструкций мегацунами на Южных Курилах // Тихоокеанская геология. 2017. Т. 36, № 1. С. 37–49.

Atwater B. F., Musumi-Rokkaku S., Satake K. et al. The orphan tsunami of 1700; Japanese clues to a parent earthquake in North America: U.S. Geological Survey Professional Paper 1707. Seattle, 2005. 133 p.

Ruff L., Kanamori H. Seismicity and the subduction process // Physics of the Earth and Planetary Interiors 23. 1980. Issue 3., P. 240–252.

Stein J., Stein S. How good do natural hazard assessments need to be? // GSA Today 23. 2012. № 4/5. P. 60–61.

Titov V. V., Kanoğlu U., Synolakis C. Development of MOST for real-time tsunami forecasting // J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng. 2016. № 142(6). 03116004, doi: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000357.

Толстый светлый слой в стенке шурфа, выкопанного на южном побережье Португалии, – это отложения морского песка после Лиссабонского цунами 1755 г. Волна цунами смыла этот песок с пляжа на побережье и перенесла почти на километр от берега. Такие отложения позволяют геоморфологам восстанавливать историю катастрофических цунами и землетрясений на несколько тысяч лет назад. На противоположных берегах Атлантики (на Малых Антильских островах) высота волн достигала 7 м. Нет точных данных о жертвах, но они, несомненно, были, так как приход цунами был внезапным и не предвещался никакими сейсмическими предвестниками (землетрясение было у берегов Португалии). В Португалии, Испании и Марокко от этого цунами погибли не менее 10 тыс. человек. Фото автора