

Вулканические цунами: от Кракатау до Карымского

А.Б.Белоусов, М.Г.Белоусова

После недавних катастроф геологический термин «цунами» стал известен практически каждому. Первое в XXI в. крупномасштабное цунами 26 декабря 2004 г. разрушило густонаселенное, но технологически слабо развитое побережье северной части Индийского океана. Вторая катастрофа поразила 11 марта 2011 г. Японию — наиболее развитую страну мира и ее атомные электростанции, которые, как казалось, были надежно защищены от любого природного катаклизма.

Как и всем геологическим явлениям, цунами трудно дать однозначное строгое определение, что связано с многообразием причин его возникновения, широким диапазоном параметров самих волн, особенностями каждого конкретного случая (типом водоема, характером берега и др.). Традиционное обращение к «первоисточнику» не решает проблему. Точное значение этого японского слова — «волна в гавани» (не в заливе, как у нас часто переводят, а там, где стоят суда). Но в Японии цунами наблюдались как в гаванях, так и на открытых частях берега, и на мысах. В основном они провоцировались землетрясениями, происходили на океанском побережье и имели региональный масштаб. Однако одним из наиболее разрушительных в истории Японии (4300 погибших) стало локальное цунами



Александр Борисович Белоусов, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник отдела вулканологии Обсерватории Земли, Сингапур. Область научных интересов — вулканология.



Марина Геннадьевна Белоусова, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН (г.Петропавловск-Камчатский) и отдела вулканологии той же обсерватории. Область научных интересов — вулканология.

в мелководной закрытой бухте, вызванное крупномасштабным обвалом прибрежного вулкана Унзен в 1792 г. Извержения острова-вулкана Сакурадзима, расположенного в глубоко врезанной бухте о.Кюсю, на протяжении нескольких столетий служат регулярным источником небольших цунами.

Обращение к статистике (например, интернет-страница В.К.Гусякова*) показывает, что в XX в. на Земле в год в среднем происходило по девять цунами, а цунами с высотой заплеска

более 5 м — примерно один раз в год. Большинство аномальных волн (75%) провоцируется землетрясениями, около 10% образуется в результате крупных подводных или береговых оползней, 4% связано с извержениями вулканов, а 3% вызваны разнообразными метеорологическими явлениями. Причина возникновения для 8% случаев вообще остается неизвестной.

Пока не наблюдалось, но теоретически обосновано возникновение цунами от падения крупных метеоритов. В период «холодной войны» большие волны искусственного проис-

хождения (например, от подводных ядерных взрывов) рассматривались милитаристами обеих сторон как перспективный вид геофизического оружия. Это, кстати, способствовало щедрому финансированию изучения цунами.

Водоёмы, где наблюдаются цунами, тоже весьма разнообразны. В классическом случае это океан, но цунами наблюдались и в окраинных, и внутренних морях, в крупных озерах и даже в больших реках, например в Волге. Высота волны может быть от нескольких десятков сантиметров до нескольких сотен метров (так называемые мегацунами).

Итак, чтобы охватить многообразие цунами, можно предложить следующее определение: «Цунами — это природное явление, представляющее собой волну в естественном или искусственном водоёме, которая имеет неметеорологическое и негравитационное происхождение». Такое определение исходит из рассмотрения морские приливы, нагонные и штормовые волны, а также волны искусственные.

Еще совсем недавно информация о цунами (районах проявления, масштабах, причинах) поступала исключительно от очевидцев и потому ограничивалась историческими событиями. Несколько десятилетий назад выяснилось, что цунами оставляют на берегах водоёмов характерные отложения (в виде песков, валунов и др.), которые при благоприятных условиях сохраняются в геологической летописи. Они могут быть диагностированы и датированы (например, изотопными методами). Изучение отложений цунами позволяет и получить данные о совершенно неизвестных доисторических явлениях (палеоцунами), и существенно дополнить сведения об исторических событиях.

В данной статье пойдет речь о цунами вулканического происхождения, причем о двух его

крайних проявлениях. Если извержение Кракатау 1883 г. и вызванные им цунами относятся к числу наиболее сильных и разрушительных в истории, то события 1996 г. в Карымском озере имели намного меньший масштаб и не привели к человеческим жертвам. Однако именно возможность такого сравнения позволяет многое понять в процессах возникновения вулканических цунами. Идея такого сравнительного изучения легла в основу международного проекта с образным названием «Огненные волны» («Fire Waves»). Основной целью проекта был поиск специфики отложений и воздействия вулканических цунами.

Кракатау

Название «Кракатау» в сознании людей ассоциируется с понятием вулканической катастрофы огромного масштаба. Сто двадцать восемь лет назад (в конце августа 1883 г.) мир был потрясен известием о внезапной гибели 36 тыс. человек на берегах пролива между островами Ява и Суматра в результате извержения на небольшом вулканическом острове Кракатау [1]. Хотя само извержение было достаточно сильным (6,5 баллов по 8-балльной шкале интенсивности извержений — VEI-Volcanic Explosivity Index), от воздействия собственно извержения (ожогов от облаков горячего пепла) погибло только около 1000 человек, находившихся в ближайших к вулкану населенных пунктах. Большинство же стало жертвами цунами, которое буквально принесло энергию извержения к многочисленным прибрежным поселкам, удаленным на десятки—сотни километров от вулкана. Высота заплеска достигала 40 м, а удар был такой силы, что снес многие морские навигационные маяки, построенные вдоль берегов пролива. Их кирпичные, рассчитанные на века стены толщиной более 2 м, разбились на куски и были заброшены в глубь суши

на расстояние до нескольких километров (рис.1). От бамбуковых хижин аборигенов вообще не осталось никаких следов.

Предмет нашего исследования, отложения цунами, — разнообразный материал (включая обломки маяков), который был подхвачен волной в прибрежной зоне и отложен на суше среди рисовых полей и кокосовых плантаций. Когда мы уезжали в экспедицию, многие наши коллеги не верили в успех. Аргумент был простой: «Прошло столько времени, район с высочайшей плотностью населения, все много раз перекопано, уверены: вы ничего не найдете!» Действительно, той Явы, с непроходимыми джунглями и носорогами, описанной в школьных учебниках географии, давно не существует. Заповедник Уджунг-Кулон — все, что осталось от бывшего буйства природы. Малейший кусочек земли здесь тщательно возделан, везде кто-то живет, торгует, пасет скот или сваливает мусор (обычно все это происходит одновременно). На рисовых террасах преобразование рельефа человеком сравнимо вообще с геологическим процессом. Тем не менее оказалось, что следы такого мощного цунами невозможно стереть полностью.

Первое, что мы обнаружили, — это очень глубокую эрозию поверхности небольших прибрежных островков, через которые перехлестнуло цунами. Слой почвы толщиной несколько метров вместе с растущим вековым тропическим лесом был полностью смыт, и на обширных площадях обнажилось прочное скальное основание (рис.2).

Даже по прошествии стольких лет здесь почти ничего не выросло. Размыв берега обычен при цунами, однако в случае Кракатау эрозия проявилась особенно сильно. Дело в том, что извержение вызвало многочисленные цунами. Если невулканическое цунами, как правило, обрушивается на берег в виде нескольких отдельных волн с интервалом от



Рис.1. Массивное кирпичное основание башни маяка Аньер на берегу о-ва Ява, разрушенного цунами в 1883 г. (в 50 км от Кракатау). На заднем плане металлический маяк, построенный в 1885 г.

Здесь и далее фото А.Б.Белоусова

нескольких минут до нескольких десятков минут, то колебания уровня моря в Зондском проливе, вызванные извержением Кракатау, наблюдались почти непрерывно в течение 25 ч! Причем наиболее разрушительные волны высотой 35–40 м отмечены в 19.30 (26 августа), 1.30, 5.30, 6.40, 8.20 и 10.02 (27 августа).

Особенно впечатляющим и сразу бросающимся в глаза свидетельством мощи цунами 1883 г. служат гигантские блоки коралловых рифов, лежащие в приливно-отливной зоне и занесенные в глубь суши на расстояние до нескольких километров. В литературе, посвященной извержению Кракатау, описан

только самый большой блок размером 10x12x5 м (рис.3), но оказалось, что цунами разбросало их великое множество вдоль всего западного побережья Явы. На некоторых уже успел сформироваться слой почвы и растут небольшие деревья.

Несмотря на то что местные жители используют эти блоки для строительства, многие сохранившиеся глыбы все еще возвышаются над зеленым бархатом рисовых полей, как памятники погибшим здесь крестьянам.

По мере того как в поисках отложений 1883 г. мы копали небольшие шурфы и вручную бурили многочисленные скважины вдоль берега, обнаружилось, что почти везде в низменных местах цунами оставило слой толщиной до 40 см плохо сортированного кораллового гравия (рис.4).

Отложения цунами Кракатау оказались намного грубее наиболее часто встречающихся отложений невулканических цунами. Последние даже на коралловых островах представлены, как правило, песком, в котором крупные фрагменты кораллов встречаются нечасто. Очевидно, как и в случае с эрозией берега, это результат многократности цунами от извержения Кракатау. Огромные, следующие одна за другой волны постепенно разбили, расшатали и размолотили прибрежные коралловые рифы, а самое мощное цунами (27 августа, около 10 утра) подняло и выплеснуло эту коралловую кашу на низменные берега западной Явы.

Интересно, что в отложениях цунами нам удалось найти лишь один крупный окатанный кусок пемзы извержения 1883 г. В открытой воде цунами не переносят какой-либо материал. Только у берега, где волна начинает взаимодействовать с дном, она тормозится, обрушивается и превращается в поток воды, подхватывающий и несущий отложения прибрежной зоны. Найденная пемза была выброшена

на начальной стадии извержения Кракатау, за три месяца до пароксизма, вызвавшего цунами, и длительное время дрейфовала по морю. Она случайно оказалась занесенной в прибрежную зону морскими течениями и ветром, а затем была выброшена цунами на берег вместе с другим, невулканическим материалом.

Хотя цунами от извержения Кракатау — признанный эталон цунами вулканического происхождения, механизм их возникновения полностью не ясен и служит предметом длительной дискуссии. Дело в том, что извержение Кракатау (как и вообще любое крупное извержение) имело комплексный характер. Оно включало несколько различных процессов, которые могли вызвать цунами. Важнейшим из них стало извержение в течение 16 ч 18—20 км³ пирокластического материала, который был отложен преимущественно в море. Суммарная толщина отложений в непосредственной близости от вулкана превышает 30 м (рис.5).

Массовое отложение пирокластического материала в виде растекающихся от центра извержения многочисленных потоков, — одна из наиболее вероятных причин образования цунами. Вторая причина возникновения цунами связана с тем, что в ходе извержения образовалась подводная кальдера — впадина диаметром 5 км и глубиной до 400 м, в которую просела большая часть о.Кракатау. Заполнение морем этой кальдеры должно было сопровождаться образованием гигантских волн, а втекающая вода контактировала с раскаленными породами, что вызывало мощные подводные взрывы — еще один вероятный источник цунами. Таким образом очевидно, что цунами на Кракатау возникали в результате нескольких процессов, а относительный вклад каждого из них был различным на разных этапах извержения.



Рис.2. Скальные породы выступают там, где цунами 1883 г. смыло слой почвы с маленького островка. На заднем плане, за узким проливом, виден городок Мерак (в 65 км от Кракатау), где высота заплеска волны достигла 40 м.



Рис.3. На самом большом блоке кораллового рифа, выброшенного на берег цунами у г.Аньер, уже выросли деревья (вверху). Блоки коралла, разбросанные цунами среди рисовых чек в 50 км от Кракатау (внизу).



Рис.4. В этот нетуристический район Явы европейцы заезжают очень редко, а если они еще и начинают копать землю, то в зрителях и помощниках недостатка нет (слева). Во многих местах западного побережья Явы под тонким слоем почвы лежит слой кораллового гравия, выброшенного на берег цунами 1883 г.

Отдельный вопрос: почему самое сильное цунами образовалось последним, в самом конце извержения? Скорее всего, оно было вызвано крупномасштабным обвалом стратовулкана Раката, составлявшего южную оконечность о.Кракатау. На завершающей стадии извержения край формирующейся кальдеры пересек остров в месте, где располагался крутосклонный конус Раката высотой 800 м. Это привело к потере конусом гравитационной устойчивости, и половина постройки Ракаты соскользнула в заполнявшуюся морем кальдере, вызвав самое



Рис.5. Остров Панджанг, край кальдеры Кракатау. Толщина отложений пирокластических потоков извержения 1883 г. здесь достигает нескольких десятков метров.



Рис.6. Остров Раката — все, что осталось от о.Кракатау после извержения 1883 г. Фото сделано с о.Анак-Кракатау, который сформировался в результате серии посткальдерных извержений, начавшихся в 1927 г.

мощное цунами данного извержения (рис.6).

Проведенное нами физическое моделирование процесса проседания кальдеры (рис.7) показало, что, если кольцевой кальдерный разлом пересекает эксцентрично расположенный вулканический конус, происходит крупномасштабное обрушение конуса внутрь кальдеры. При этом обвалившийся конус приобретает характерную, легко

узнаваемую подковообразную форму [2].

Анализ космических снимков показал, что такие подковообразные постройки, расположенные у краев крупных кальдер, широко распространены во многих вулканических районах, в частности на Камчатке. Следовательно, обвалы, аналогичные обвалу Ракаты, — достаточно обычное явление в процессе кальдерообразующих изверже-

ний. При формировании подводных кальдер они, очевидно, служат источником наиболее разрушительных цунами.

После извержения 1883 г. Кракатау на 44 года погрузился в спячку. В 1927 г. в его кальдере возобновилась вулканическая деятельность — началось длительное подводное извержение базальтовой магмы (рис.8). Подводные взрывы умеренной силы вызывали небольшие цунами на



Рис.7. Воспроизведение процесса образования кальдеры на модели из песка: а — до образования кальдеры; б — после; в — увеличенное изображение обвалившегося конуса.



Рис.8. Остров-вулкан Анак Кракатау. На заднем плане — о.Сертунг. На архипелаге Кракатау, который входит в состав заповедника Уджунг Кулон, нет поселений и не проложено массовых туристических маршрутов. Попастъ в это красивейшее место можно только арендовав лодку. Название Анак Кракатау (Сын Кракатау) было предложено Владимиром Петрушевским — офицером русской армии, который после победы красных на Дальнем Востоке эмигрировал на Яву и много лет работал в Вулканологической службе Ост Индии. Фото сделано с о.Панджанг.

островках, окружающих кальдери. Островки были необитаемые, и это явление не привлекло большого внимания и не было детально изучено.

Карымское озеро

Уникальная возможность изучить воздействие цунами от относительно небольших взрывов представилась на Камчатке в 1996 г., когда в оз.Карымском произошло подводное взрывное извержение базальтовой магмы.

Примерно в 40 минутах лёта на север от г. Петропавловска-Камчатского, среди невысоких вулканических гор, поросших



Рис.9. Карымское озеро расположено в кальдерной впадине вулкана Академии Наук. Вдали видны Тихий океан и мыс Шипунский.

ольховым стланником, сначала появляется небольшой правильный конус вулкана Карымский, а потом несколько правее него вдруг открывается большое, почти идеально круглое озеро с водой восхитительного небесно-голубого цвета (рис.9). Это — оз.Карымское диаметром 3,5 км и максимальной глубиной 65 м. Оно занимает почти всю чашу кальдеры Академии Наук (рис.9).

2 января 1996 г. на дне озера, у его северного берега, произошло короткое (менее суток), но достаточно мощное подводное эксплозивное извержение [3]. Институту вулканологии удалось организовать облет на вертолете, когда извержение было в самом разгаре. Подводные взрывы выбрасывали фонтаны черной смеси воды и пирокластики на высоту до 1 км. Этот материал был тяжелее воздуха и потому не всплывал в атмосфере как обычное вулканическое облако, а обрушивался обратно в озеро, радиально растекаясь от центра извержения и формируя так называемую базисную пирокластическую волну (рис.10). Одновременно образовывались многочисленные цунами, распространявшиеся по всей поверхности озера.



Рис.10. Один из примерно 200 взрывов подводного извержения 2 января 1996 г. в Карымском озере. Выброшенная смесь воды и пирокластики обрушилась обратно в озеро и растеклась радиально от центра извержения в виде базисной пирокластической волны.

Фото Я.Д.Муравьева



Рис.11. Отложения песка, блоки, вырванные при эрозии берега, и погибший кустарник отмечают область воздействия цунами 1996 г. в Карымском озере (слева); кустарник смытый и выброшенный цунами на южный берег озера (справа).

Фото А.Б.Белюсова

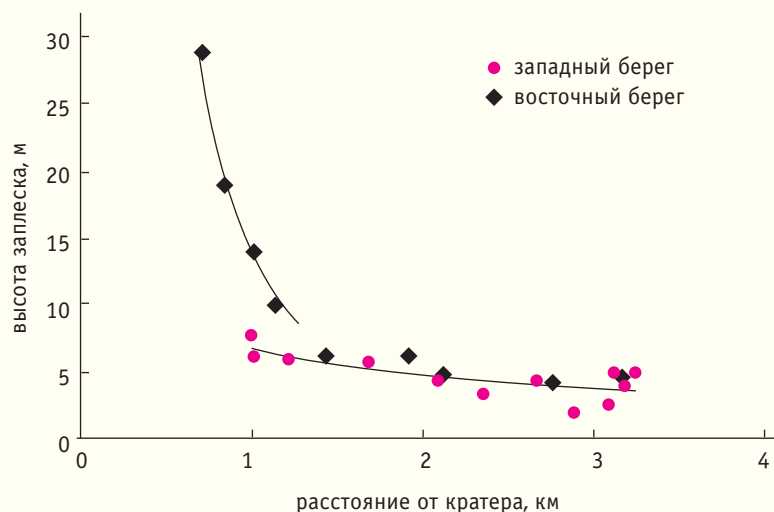


Рис.12. График затухания волн цунами в Карымском озере с расстоянием от центра извержения 1996 г. [5].

Извержение вызвало настоящую локальную экологическую катастрофу. Вода в озере стала кислой и прогрелась до 25°C, что привело к гибели всего живого. Выброшенный взрывами пирокластический материал сформировал полузатопленный конус (туфовое кольцо) с кратером диаметром 600 м и глубиной 50 м.

Мы изучали последствия цунами сразу после извержения, когда высота заплеска волн четко прослеживалась по полосе погибшей растительности. Дополнительные исследования со-

вместно с французскими коллегами были проведены после работ на Кракатау. Полученные данные свидетельствовали, что вблизи подводного кратера высота заплесков волны на берег достигала 30 м. Цунами от подводных взрывов, так же, как и при извержении Кракатау, сильно эродировали берега озера, а вырванные блоки пород забрасывались далеко в глубь суши (рис.11).

Выполненные замеры высоты заплеска позволили впервые построить график затухания волн с увеличением расстояния

от центра извержения (рис.12). Оказалось, что сначала происходит очень быстрое уменьшение высоты заплеска с 30 до 5–7 м, а на расстоянии около 1,5 км от кратера скорость затухания становится меньше и в дальнейшем конце озера высота заплеска уменьшается до 2–3 м [4]. Выполненное впоследствии численное моделирование этого цунами показало хорошее соответствие с данными натурных измерений [5].

Проект «Огненные волны» впервые позволил собрать систематические данные об отложениях цунами вулканического происхождения. Сравнение различных по масштабам проявления событий на Кракатау и Карымском дало возможность выявить ряд черт, характерных для воздействия цунами, вызванных подводными взрывными извержениями, а также определить скорость затухания волн с увеличением расстояния от источника. Установленные закономерности имеют важное прикладное значение. Они впервые позволяют оценивать опасность от волн, образующихся при подводных извержениях в мелководных бассейнах — озерах и морских заливах, берега которых во многих районах мира отличаются чрезвычайно высокой плотностью населения. ■

Литература

1. Self S. Krakatau revisited: the course of events and interpretation of the 1883 eruption // *Geojournal*. 1992. V.28. P.109–121.
2. Belousov A.B., Walter T.R., Troll V. Large-scale failures on domes and stratovolcanoes situated on caldera ring faults: sand box modeling and natural examples from Kamchatka, Russia // *Bulletin of Volcanology*. 2005. V.67. P.457–468.
3. Belousov A., Belousova M. Eruptive process, effects and deposits of the 1996 and ancient basaltic phreatomagmatic eruptions in Karymskoye lake, Kamchatka, Russia // *Lacustrine Volcanoclastic Sedimentation* / Eds J.D.White, N.R.Riggs. 2001. IAS Special Volume. V.30. P.235–260.
4. Belousov A., Voight B., Belousova M., Murat'yev Ya. Tsunamis generated subaquatic volcanic explosions: unique data from 1996 eruption in Karymskoye lake, Kamchatka, Russia // *Pure and Applied Geophysics*. 2000. V.157. P.1135–1143.
5. Torsvik T., Paris R., Didenkulova I. et al. Numerical simulation of a tsunami event during the 1996 eruption in Karymskoye lake, Kamchatka, Russia // *Natural Hazards and Earth System Science* 2010. V.10. P.2359–2369.