

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ОПОЛЗНИ КУРИЛЬСКОЙ ОСТРОВНОЙ ДУГИ И ОПАСНОСТЬ ЦУНАМИ

Бондаренко В.И.¹, Петухин А.Г.², Рашидов В.А.³

¹ Костромской государственной университет им. Н.А. Некрасова, Кострома, vibond@list.ru;

² Geo-Research Institute, Osaka, Japan, anatolyp@geor.or.jp

³ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, rashidva@kscnet.ru

Введение

Принято считать, что волны цунами в Курило-Камчатском регионе возникают в цунамигенной зоне, которая расположена в Курило-Камчатском и Алеутском желобах, или приходят от удаленных землетрясений. Но в настоящее время имеются многочисленные свидетельства о возникновении цунами вследствие крупных подводных оползней и обвалов, часто происходящих после даже не очень сильных землетрясений [3–6, 8–10].

Судя по данным наших исследований, обвално-оползневые процессы имеют широкое распространение на подводных склонах Курильской островной дуги. Наибольшую опасность с точки зрения возникновения цунами оползневого генезиса, на наш взгляд, представляют возможные обрушения гравитационно-неустойчивых «висячих» крупных тел осадочных или рыхлых вулканогенных отложений на крутых склонах островов или подводных вулканов. Пример подобных тел представлен на рис. 1а. Здесь на фрагменте сейсмограммы непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСП) можно увидеть изображение крупных «висячих» блоков рыхлых отложений на средней части склона о. Чирпой (о-ва Черные Братья), и мощную толщу предполагаемых оползневых отложений у подножия склона [1]. Значительную опасность могут также представлять обрушения крутых стенок крупных подводных каньонов.

В 1980–1990-е годы в 11-ти вулканологических экспедициях на научно-исследовательском судне «Вулканолог» в пределах Курильской островной дуги была выполнена геофизическая съемка (эхолотный промер, НСП, гидромагнитная съемка) по системе пересекающихся галсов со средним межпрофильным расстоянием около 5 км и со сгущением на отдельных участках до 1–2 км. Общий объем отработанных профилей – порядка 60000 погонных км.

Интерпретация полученных данных позволила выделить многочисленные обширные участки распространения оползневых отложений, закартировать крупные подводные каньоны на склонах Курильской островной дуги, выявить ряд крупных «висячих» тел рыхлых отложений на склонах островов и отдельных подводных вулканов (рис. 1б).

Примеры оползневых отложений

Центральные Курилы. По данным НСП в этом районе выделено несколько участков, в пределах которых распространены оползневые отложения. Их наибольшая концентрация отмечена в нижней части океанического склона о. Матуа, в нижней части и у подножия охотоморских склонов о-вов Ушишир, Кетой и Черные Братья (рис. 1б). Особенно широко развиты оползневые отложения в районе о-вов Черные Братья в проливе Буссоль, что обусловлено, по-видимому, поступлением на крутые склоны островов огромного количества рыхлого вулканогенного материала в результате исключительно высокой вулканической активности, имеющей здесь преимущественно взрывной характер. Мощность оползневых отложений местами достигает 600–800 м.

Подобные блоки, на наш взгляд, вследствие их гравитационной неустойчивости при сильных землетрясениях могут придать движение и стать причиной возникновения цунами. В частности, они распространены в нижней, местами средней части, северных, северо-западных и западных склонов вулканического массива Черных Братьев (рис. 1б).

Южные Курилы. Здесь проживает большая часть населения Курильских островов и располагается ряд населенных пунктов, самыми крупными из которых являются г. Курильск (о. Итуруп), и п.г.т. Южно-Курильск (о. Кунашир). По данным НСП, на охотоморских склонах о-вов Уруп, Итуруп и Кунашир широко распространены оползневые отложения, что свидетельствует о высокой активности гравитационных процессов. Их активности в данном районе способствуют расчлененный рельеф, высокая сейсмическая и вулканическая активность.

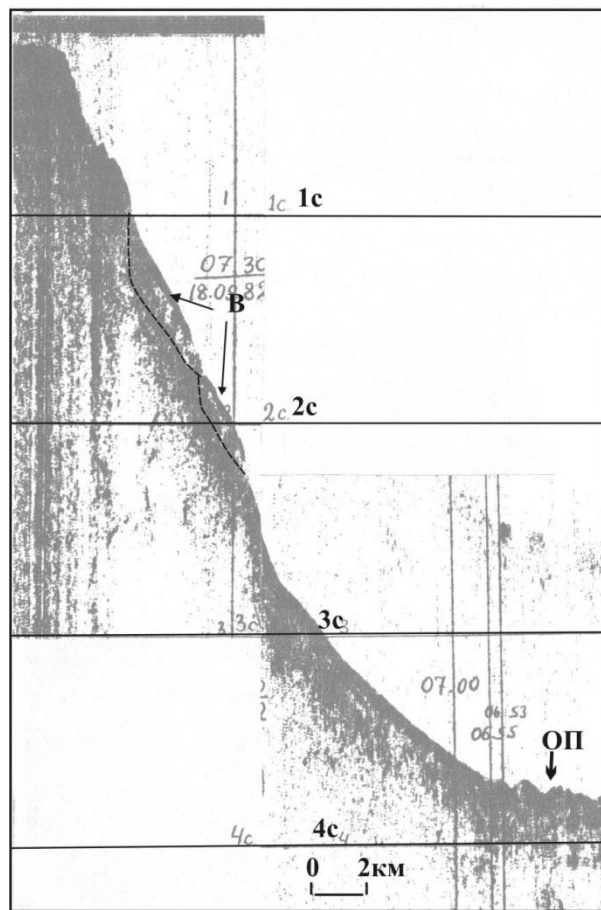
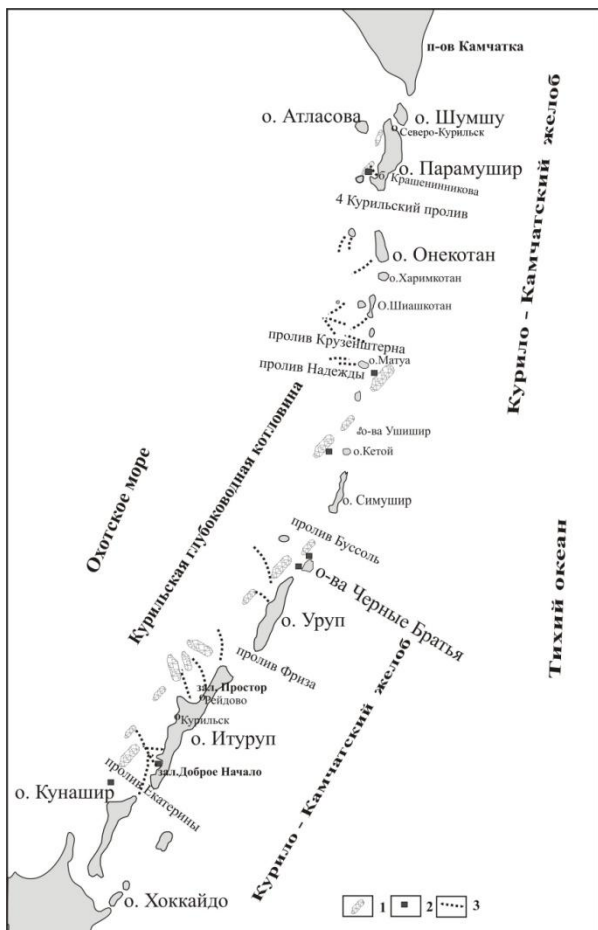


Рис. 1. Слева (а) – схема распространения оползневых отложений и крупных активных подводных каньонов в пределах Курильской островной дуги: 1 – участки распространения оползневых отложений; 2 – участки, в пределах которых по данным НСП зафиксированы крупные «висячие» тела рыхлых отложений, представляющие особую опасность с точки зрения возможной генерации цунами; 3 – крупные активные подводные каньоны. Справа (б) – пример оползневого тела на фрагменте профиля НСП, пересекающего подводную часть северо-восточного склона о. Чирпой. Стрелками показаны крупные «висячие» тела (В) предполагаемых рыхлых отложений на склоне и оползневые отложения (ОП) у подножия склона. Штриховая линия – границы «висячих тел»

Моделирование цунами

Численное моделирование оползневого цунами требует наличия трех компонент: (1) модели источника, определяющей распределение начальных высот и скорости воды в волне цунами; (2) морской батиметрии и прибрежной топографии, и (3) модели распространения цунами и набега волны на берег. Для подводных оползней, высоты начальной свободной поверхности и скорости воды в двух направлениях X и Y , были получены путем многомерной, полуэмпирических аппроксимации функцией безразмерных параметров, характеризующих оползень (например, плотность, геометрия формы и др.) и местной батиметрии (напр., уклон, глубина и т. д.). Соответствующих безразмерных параметров были выбраны на основе законов масштабирования предложенных Уотсом ([11], программа ГЕОВЭЙВ). Численные эксперименты по сетке параметров проводились по 3D модели [7]. Затем, результаты численного моделирования были аппроксимированы криволинейными поверхностями. Продолжительность фазы ускорения тела оползения t_0 в численном моделировании является также длительностью формирования волны цунами. Следовательно, момент времени t_0 это время формирования источника цунами и с этого момента начинается фаза распространения цунами. Рис. 2 показывает схему движения оползня и обозначение основных параметров.

Для расчета цунами использовалась модель батиметрии и топографии берега скомпилированная из глобальных моделей батиметрии (GEBCO) и топографии (SRTM). Данные глубин были приведены к прямоугольной сетке с шагом 200м при помощи линейной триангуляции.

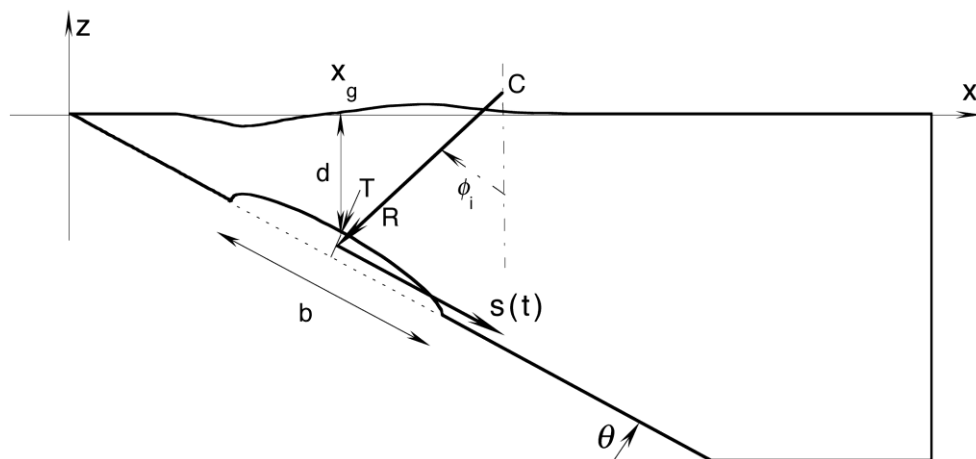


Рис. 2. Схема расчета источника оползневой цунами согласно [12]. Основные параметры: длина оползня b , максимальная ширина оползня w , мощность (толщина) T , глубина погружения d , угол уклона θ , важными параметрами являются также параметры воды (фактически постоянные) и плотность осадков, составляющих тело оползня.

Карта распределения глубины моря показана на рис. 3. Сетка батиметрических данных с шагом 200 м вполне достаточна для расчета распространения цунами и набега в прибрежной зоне при простой конфигурации берега. Район моделирования цунами в Охотском море ограничен 150° - 152° в.д. и 45.5° - 47.5° с.ш.

Для расчета распространения цунами мы использовали волновую модель Буссинеска, разработанную в [13] (программа FUNWAVE). Эта модель полностью нелинейна (т.е. сохраняет информацию на всех уровнях нелинейности A/H , где A – амплитуда волны, а H – глубина воды) и учитывает дисперсию волн. FUNWAVE также учитывает придонное трение и разрушение волны, без которых волна может искусственно усиливаться на побережье. Для моделирования набега на берег используется алгоритм щелей, который был полностью проверен на моделировании набега и разрушения коротких (т.е. штормовых) волн. FUNWAVE была откалибрована для моделирования длинных волн (т.е. цунами) и успешно использована для моделирования различных региональных цунами.

Результаты моделирования

Изначально, мы рассчитали источник цунами, т.е. распределение смещений высот поверхности моря и скорости воды в двух направлениях X и Y в момент окончания фазы ускорения оползня t_0 . Рассмотрели три варианта: два оползня с параметрами примерно соответствующими оползневым телам на рис. 1а, а также случай коллапса внешней северной стенки кальдеры, которая, судя по батиметрическим данным на рис. 3, имеет крутой склон до глубин 1000м. Таблица показывает величины основных параметров для 3-х случаев.

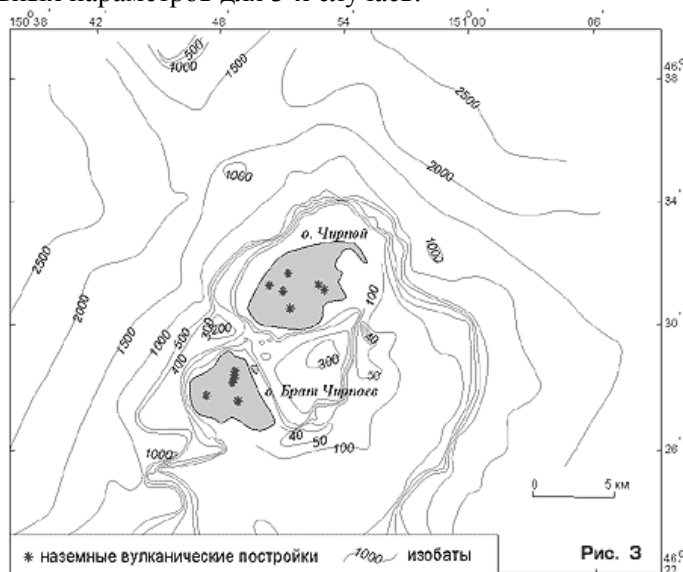


Рис. 3. Батиметрическая карта в районе о-вов Черные Братья. Глубина моря в метрах показана линиями изобат

Таблица. Величины основных параметров тела оползня.

Параметр	Оползень		Вариант 3: коллапс внешней стены кальдеры
	Вариант 1	Вариант 2	
Длина оползня, м	700	700	5000
Максимальная ширина, м	350	350	2500
Мощность (толщина), м	135	90	250
Глубина погружения, м	1040	1500	1500
Угол уклона, град.	20	20	12
Плотность осадков, кг/м ³	1850	1850	2000

Далее мы моделировали набег на берег для всех 3-х случаев. Для моделирования методом конечных разностей мы использовали сетку с шагом 200 м. По сравнению с обычно используемыми, для расчета набега волны цунами на берег, сетками 10-30м, сетка 200 м довольно груба, однако она совместима с нехваткой прибрежных батиметрических и топографических данных в этом малоизученном районе. Рис. 4 показывает пример распределения высоты волны цунами для 4-х моментов времени. За счет движения оползня вниз по склону, за оползнем образуется глубокая воронка, а впереди себя оползень толкает горб воды. По окончании фазы ускорения, воронка начинает заполняться водой со всех сторон и по инерции превращается в высокий горб который движется в сторону берега и вызывает цунами на ближайшем побережье. С другой стороны, горб воды впереди оползня изначально имеет горизонтальную скорость около 20 см/с в направлении от берега и в конечном итоге приводит к цунами на соседнем острове.

Интересно отметить что за счет фокусировки волны на мелководье, высокие заплески цунами образуются не только на ближайшем к оползнию побережье о. Чирпой, но и на соседнем острове Броутона, а также на мелководном участке восточного края кальдеры Горшкова с глубинами 40–50 м. В последнем случае цунами в 1.5 раза больше.

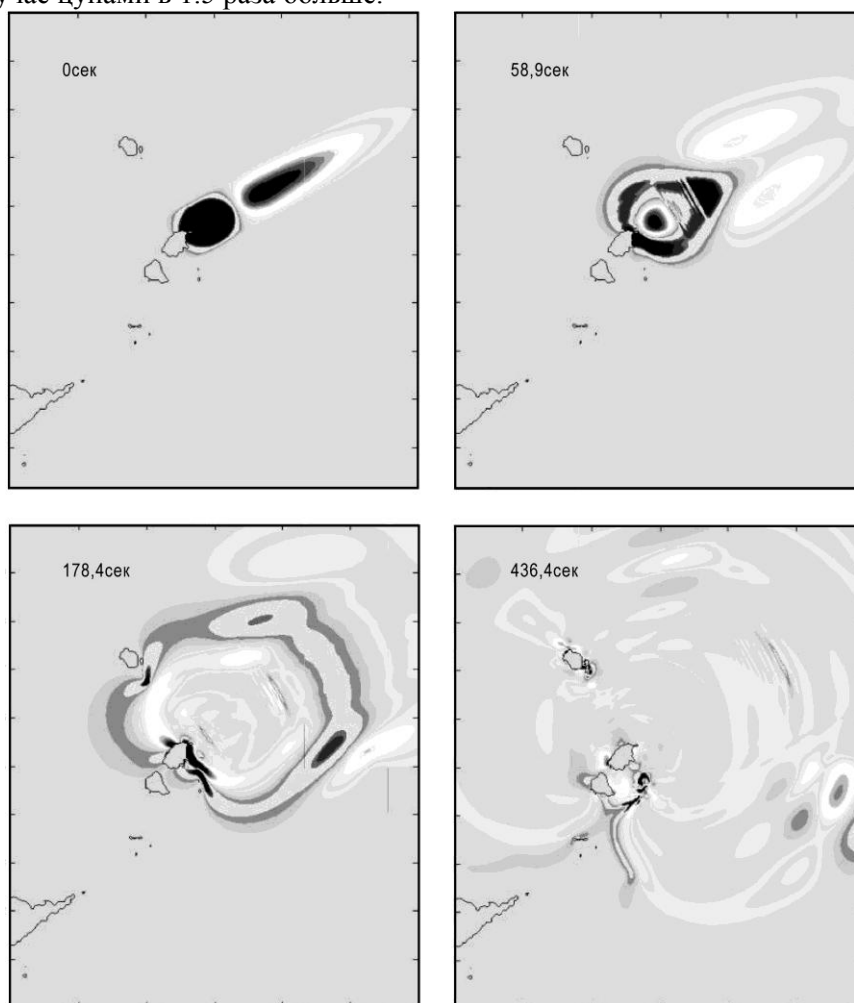


Рис. 4. Пример расчета распространения цунами для источника 3 (см. таблицу). Приведены снимки распределения высоты волны для 4-х моментов времени 0, 58.9, 178.4 и 436.4 сек.

Заключение

Наибольшая вероятность возникновения цунамигенных оползней и обвалов существует в нескольких участках Курильской островной дуги. Это – крутые склоны подводных вулканов, расположенных к северо-западу от о. Симушир [2], подводные склоны вулканического массива Черных Братьев [1, 2], а также каньон Екатерины, залив Доброе Начало и залив Простор.

Для уточнения степени опасности цунамигенных оползней в пределах Курильской островной дуги проведено моделирование генерации и распространения волн цунами при подводных оползнях. Для этого использованы современные программные комплексы, проверенные на ряде тестов.

Результаты моделирования на примере оползня в районе о-вов Черные Братья показывают, что высота цунами может достигать 5–10 м на ближайшем к оползню побережье. А также усиливаться до 10-15-ти м за счет фокусировки волн цунами на мелководных участках в районе о-вов Черные Братья и близлежащих островах.

Список литературы

1. Бондаренко В.И., Рашидов В.А. Вулканический массив Черных Братьев (Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 2003. № 3. С. 35-51
2. Бондаренко В.И., Рашидов В.А. Выявление потенциально цунамигенных участков в пределах Курильской островной дуги // III научно-техническая конференция «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России» г. Петропавловск-Камчатский 9-15 октября 2011 г. Сборник докладов. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2011 (http://www.emsd.iks.ru/konf111009/pdf/sb/Sekciya_Cunami/Bondarenko_Rashidow.pdf/)
3. Важенин Б. П. Курильские вулканы – источники цунами в Северном Охотоморье // Вулканизм и геодинамика: Материалы III Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. Т. 3. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского научного центра СО РАН, 2006. С. 659-663.
4. Гардер О.И., Долина И.С., Пелиновский Е.Н. и др. Генерация волн цунами гравитационными литодинамическими процессами // Исследования цунами. 1993. № 5. С. 50-60.
5. Леонидова Н.Л. О возможности возбуждения волн цунами мутьевыми потоками // Волны цунами. Южно-Сахалинск: Тр. СахКНИИ АН СССР. 1972. Вып. 29. С. 262-270.
6. Brink ten U.S., Geist E.L., Andrews B.D. Size distribution of submarine landslides and its implication to tsunamihazard in Puerto Rico // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. P. L11307. doi:10.1029/2006GL026125.
7. Grilli, S. T., Vogelmann, S., and Watts, P. Development of a 3D numerical wave tank for modeling tsunami generation by underwater landslides // Engrg. Analysis with Boundary Elements, 26(4), 301-313.
8. Moore G.W., Moore J.G. Large-scale bedforms in boulder gravel produced by giant waves in Hawaii // Geol. Soc. Am. Spec. Paper. 1988. V. 229. P. 101-109.
9. Murty T.S. Submarine slide-generated water waves in Kitimat Inlet, British Columbia // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. № 12. P. 7777-7779.
10. Ward, S.N. Landslide Tsunami // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. P. 11201-11215.
11. Watts, P. Tsunami features of solid block underwater landslides // J. Waterw., Port, Coast, and Oc. Engrg., ASCE, 126(3), 144-152.
12. Watts Ph., S.T. Grilli, M.ASCE, D.R. Tappin, and G.J. Fryer // Tsunami Generation by Submarine Mass Failure. II: Predictive Equations and Case Studies, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, DOI: 10.1061/ASCE0733-950X2005131:6298
13. Wei, G. and Kirby, J.T. A time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations // J. Waterw. Port Coastal Oceanic Eng. 1995, 121, 251– 261.