НЕСЕЙСМИЧЕСКИЕ ЦУНАМИ В ОКРАИННЫХ МОРЯХ И ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМАХ РОССИИ

В.К.Гусяков¹⁾, А.Б.Рабинович²⁾

¹⁾ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г.Новосибирск
²⁾ Институт океанологии РАН, г.Москва





Максимальные высоты цунами, зарегистрированные в Мировом океане в течение последних 120 лет (с 1900 по 2019 год). Цветом показан тип источников: S - сейсмогенный, L - оползневый, V - вулканический, М - метеорологический. Для заплесков выше 50 м указаны их точные значения. По статистике за эти годы, **37%** максимальных высот имеют несейсмическую

природу



Карта очагов цунамигенных событий, давших максимальные годовые высоты. Символами обозначен тип источника цунами: кружки - сейсмогенный, звезды оползневый, треугольники - вулканический, ромбы - метеорологический. Размер символа пропорционален высоте наката соответствующего цунами. События с высотами выше 50 м маркированы годом возникновения.



Карта исторически известных очагов цунами, около 2250 событий с баллом достоверности V=1-4, происшедших за период с 2000 ВС до 2020г.



E

L

V M

Доли цунамигенных событий различного генезиса в историческом каталоге цунами



за весь исторический период (с 1737 г. по наст время)



Положение известных на данный момент очагов цунами в Черном и Азовском морях. Показаны очаги 49 цунами, происшедших в регионе с 900 года до н.э. по настоящее время. Вертикальные линии показывают известные максимальные высоты волн. Одно из сильнейших землетрясений с магнитудой до 7 произошло в 63 году до н.э. в районе Керченского пролива. Высоты цунами достигали 6-7 метров.



(по данным последней (2019) версии исторического каталога цунами для Черного и Азовского морей (51 событие, 900 ВС – 2019 гг.)

Оползневые цунами

Бурейский оползень 19.06.2019г.



Общий вид стенки срыва и тела оползня с пробитым взрывами прораном у левого берега р.Бурея. Снимок А.В.Остроухова с квадрокоптера «Фантом-4» 19.06.2019г.



Воздействие водной волны на берега водохранилища

Долина реки Ср.Сандар. Граница заливания на отметке около 70 м над уровнем водохранилища и удалении порядка 2 км от оползня



proceeding and a state



На отметке максимального заплеска (90 м), достигнутого на удаление 2.8 км по долине р.Ср.Сандар. Направление съемки – вниз по течению р.Ср.Сандар



Карта измеренных высот заплеска Бурейнского цунами, построенная в графической оболочке ДПМ / ТГУ. Красной точкой отмечено место возникновения оползня.

Одиннадцать дней спустя, 22 декабря 2018 г. в Индонезии в Зондском проливе произошло во многом сходное событие – оползень на склоне молодого вулкана Анак Кракатау, объемом порядка 100 млн. куб. метров. Оползень породил волну цунами с максимальной высотой 85 метров (на ближайших островах Раката и Сертунг), которая спустя 35 мин достигла западной оконечности острова Ява, имея высоту от 3 до 10 метров.





Снимки извержения вулкана, сделанные в июне-июле 2018 года

Несмотря на предшествовавшую полугодичную активизацию вулкана и его мониторинг, возникновение оползня и приход цунами оказался совершено неожиданным для прибрежных поселений. Индонезийская СПЦ (как и любая другая СПЦ) не была рассчитана на этот тип событий и не смогла спрогнозировать приход цунами. Погибло 430 человек, около 1500 было ранено, разрушено несколько тысяч домов.

Krakatau 1883 remnant Rakata

Anak Krakatau Before (Photo: September 2018)

Fritz H., Solihuddin T., Synolakis C., Prasetya P., Borrero J, Skanavis V., Husrin S., Kongko W., Istiyanto D., Daulat A., Purbani D., Salim H., Hidayat R., Asvaliantina V, Usman U., Kodijat A. The 2018 Anak Krakatau tsunami: Near-source field survey on Islands in the Sunda Strait // International Symposium on the Lessons Learnt from the 2018 Tsunamis in Paluand Sunda Strait 26-28 September 2019, Auditorium BMKG, Jakarta - Indonesia.











Воздействие волны цунами на берега близлежащих островов (Ратака и Сертунг)



Fig. 2. (a) Cross-section of Anak Krakatau (inset: Fig. 1) and the 1883 eruption caldera. The landslide scar, defined by modifying some level lines on our initial DEM, is drawn in black. It is orientated southwestwards, with a slope of 8.2° , delimiting a collapsing volume of about 0.28 km³. (b) Topography before the simulated landslide, with the location of the cross-section presented in (a). The caldera resulting from the 1883 Krakatau eruption is clearly visible, as well as Anak Krakatau, which is built on the NE flank of this caldera. (c) Topography after the simulated landslide, with the horseshoe-shaped scar clearly visible.

Giachetti, T., Paris, R., Kelfoun, K. & Onotowirjo, B. (2012) Tsunami hazard related to a flank collapse of Anak Krakatau. Geol. Soc. Lond. Spec. Publ. 361, 79–90.

Актие

Tsunami hazard related to a flank collapse of Anak Krakatau Volcano, Sunda Strait, Indonesia

Аннотация: Численное моделирование быстрой частичной дестабилизации вулкана Анак Кракатау (Индонезия) было проведено с целью исследования цунами, вызванного этим событием. Анак Кракатау, который возник на крутой северо-восточной стене кальдеры извержения Кракатау 1883 года, активен на своей юго-восточной стороне (в сторону кальдеры 1883 г.), что делает эту вулканическую постройку довольно нестабильной. Гипотетический обвал ее юго-западного склона объемом 0,280 км3, вызовет начальную волну высотой до 43 м, которая достигнет островов Сертунг, Панджанг и Раката менее чем за 1 мин, с высотами от 15 до 30 м. Эти волны могут быть потенциально опасны для многих небольших туристических судов, постоянно циркулирующие внутри и вокруг архипелага Кракатау. Волны тогда распространятся в радиальном направлении из зоны воздействия и через Зондский пролив, в среднем скорость 80-110 км/час. Цунами достигнет городов, расположенных на западном побережье острова Ява (например, Мерак, Анер и Карита) через 35-45 минут, с максимальными высотами от 1,5 (Мерак и Панимбанг) до 3,4 м (Лабухан). Так как много промышленных и туристических инфраструктуры расположены близко к морю и на высотах менее 10 м, эти волны будут представить немалый риск. Благодаря многочисленным отражениям внутри архипелага Кракатау, волны могут даже в течении часа достичь Бандар-Лампунг (Суматра, ок. 900 000 жителей) с максимальной амплитудой 0,3 м. Волны будут намного меньше, чем возникшие во время извержения Кракатау в 1883 году (около 15 м). Быстрое обнаружения факта обрушения склона приборными средствами вместе с эффективной системой оповещения на побережье способно предотвратить этот гипотетический обвал от превращения в фатальное событие.

Giachetti, T., Paris, R., Kelfoun, K. & Onotowirjo, B. (2012) Tsunami hazard related to a flank collapse of Anak Krakatau. Geol. Soc. Lond. Spec. Publ. 361, 79–90.

Sunda Strait Islands Tsunami Field Survey



Fritz H., Solihuddin T., Synolakis C., Prasetya P., Borrero J, Skanavis V., Husrin S., Kongko W., Istiyanto D., Daulat A., Purbani D., Salim H., Hidayat R., Asvaliantina V, Usman U., Kodijat A. The 2018 Anak Krakatau tsunami: Near-source field survey on Islands in the Sunda Strait // International Symposium on the Lessons Learnt from the 2018 Tsunamis in Paluand Sunda Strait 26-28 September 2019, Auditorium BMKG, Jakarta - Indonesia.



Fig. 1 Elevated volcanic activity prior to sector collapse. **a** Location of Anak Krakatau. Coastline map created using the GMT/MATLAB Toolbox⁵⁹. **b** Multiyear time series of the volcanic radiative power (VRP) and cumulative volcanic radiative energy (VRE) recorded as MODIS data at Anak Krakatau. A sharp increase in thermal activity started on 30 June 2018, marking the beginning of a new eruptive phase that culminated in the collapse of the edifice on 22 December 2018. The red rectangle marks the recent eruptive period shown in detail in Fig. 3. **c** Time-averaged discharge rate (TADR) derived from satellite thermal data during the June-Dec 2018 eruption. Note the occurrence of 11 pulses with a TADR above 3 m³ s⁻¹ (dashed line) associated with effusive paroxysms that produced lava flows. The cumulative erupted volume (red line) indicates a gradual decline in effusive activity after Oct 2018

Walter, T.R., Haghshenas Haghighi, M., Schneider, F.M. et al. Complex hazard cascade culminating in the Anak Krakatau sector collapse. Nat Commun 10, 4339 (2019) doi:10.1038/s41467-019-12284-5

Другие примеры оползневых цунами, произошедших в последние десятилетия в различных странах



Литуйя Бэй, Аляска, 10.07.1958г. Объем оползня 31 млн. куб. м, макс. заплеск



Дамба Вайонт, пережившая катастрофу 1963 года (вид с нижнего бьефа)



Аэрофотоснимок плотины и водохранилища Вайонт, сделанный через несколько дней после катастрофы

Taan Fiord in SW Alaska on **October 17, 2015.** Inundation reached **190** m at its highest point, and exceeded 50 m along over 10 km of coastline.





Обвал склона фьорда Аусьен в Чили 21.04.2007г. породил волну высотой до 60 м. От волн высотой до 10 м в селении Пуэрто Аусьен погибло 10 человек.



Location map of the **2007 Chehalis Lake** landslide and tsunami (Wang, Ward, Xiao, 2015) Maximum run-up **37.8 m**.

Реконструкция И.В.Мелекесцева



2013

Зона обвала

Image Landsat Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO Image © 2014 TerraMetrics © 2014 Google

Imagery Date: 4/10/2013 lat 60.552448° lon 168.709433° elev 28 m eye alt 1.86 km 🔵

Фото В.К.Гусякова 1991 г.

Крупный (объем порядка 500 млн. куб. м) сейсмотектонический обвал на мысе Крещенный Огнем (Камчатка), несомненно, сопровождавшийся разрушительным локальным цунами. Датировка С14 события 1660±40 л.т.н. (Мелекесцев, Курбатов, 1997)

УДК 550.34:551.1/.4+528.7(571.65)

Важенин Б.П.

Северо-Восточный комплексный НИИ ДВО РАН Россия, 685000, г. Магадан, ул. Портовая, 16 vazhenin@neisri.ru

ОБВАЛЬНЫЕ И ОПОЛЗНЕВЫЕ ДЕФОРМАЦИИ БЕРЕГОВ ОХОТСКОГО МОРЯ В ОКРЕСТНОСТЯХ г. МАГАДАН

Дистанционным — с применением спектрозональных стереокосмоснимков, аэроснимков и космоснимков из интернет-сервиса Google Earth — и полевым изучением морских берегов з окрестностях г. Магадан выявлены различия в процессах их обвальнооползневого преобразования в зависимости от различий в литологии и величине обвального потенциала.

В результате многолетних палеосейсмогеологических и геолого-геоморфологических исследований всей территории Магаданской области с прилегающими районами Хабаровского края и Якутии с использованием спектрозональных стереокосмоснимков с разрешением в первые десятки метров, аэроснимков и полевых методов изучена и территория Примагаданья [1]. В пределах административных границ города площадью 1 200 км² (на застроенную часть приходится только 50 км² или 4 %) выявлено и изучено два роя палеосейсмодислокаций: Дукча и Гертнера, представляющих собой аномально плотные и компактные скопления гравитационных и тектонических сейсмодеформаций, являющихся следами голоценовых разрушительных землетрясений с магнитудой ≥ 6,4 - на фоне обширных смежных участков, лишенных подобных образований. За последнее десятилетие с использованием космоснимков с разрешением ~1 м из интернет-сервиса Google Earth и многолетнего мониторинга береговой морфолитодинамики более обстоятельно изучены ближайшие окрестности Магадана [2]. При этом оказалось, что как тектонические (разломы различной кинематики), так и гравитационные (обвалы, оползни) дислокации известного ранее [1] роя Гертнера и вновь выявленные – в результате данного исследования – «привязаны» большей частью к морским берегам (рис.).



Рис. Следы обвально-оползневой деформации морских берегов в окрестностях г. Магадан. 1 – застроенная часть территории г. Магадан; 2 – скальные обвалы: a – крупные, объемами более 100 тыс. м³, δ – малые, объемами менее 100 тыс. м³; 3 – блоковые оползни: a – объемами свыше 100 тыс. м³, δ – мелкие, объемами менее 100 тыс. м³; 4 – Восточный клиф бухты Нагаева, сложенный слабо литифицированными отложениями нагаевской свиты, подверженный обвально-оползневой деструкции; 5 – свежие сбросовые уступы разной протяженности, вероятно, сейсмогенного происхождения; 6 – расщелины в скальных горных породах; 7 – разломы свежего облика, вероятно, сейсмогенного происхождения.

Буквами В, Г, Н, П, С, Ч, ЮС в индексации гравитационных дислокаций обозначены их названия: Восточный, Горняк, Нагаева, Портофлот, Светлый, Черный, Южностарицкий, соответственно, а цифрами – их объемы в млн м³

Морские берега Примагаданья длиной свыше 100 км в пределах административных границ города имеют сложную в

53

52

О большом потенциале обвальных процессов на побережье Охотского моря говорится, например, в ряде работ Б..Важенина (СВКНИИ, г.Магадан)

Rabinovich, A.B., R.E. Thomson, B.D. Bornhold, I.V. Fine, and E.A. Kulikov, Numerical modelling of tsunamis generated by hypothetical landslides in the Strait of Georgia, British Columbia, Pure Appl. Geophys., 2003, 160, (7), 1273-1313.



Карта мест возникновения оползневых цунами на северо-западном побережье Канады и США



Сейсмообвал на мысе Большой Утриш (район полуострова Абрау). Объем главного оползневого тела – порядка 0.3-0.5 куб. км. Детальные сейсмогеологические и палеосейсмологические исследования начались только в 2014-2016гг. (Попков и др. 2017). Точные датировки отсутствуют



Рис. 1. Схема сейсмогравитационных деформаций южного склона Северо-Западного Кавказа.

 населенные пункты; 2 – водоразделы и абсолютные отметки высот; 3 – береговая линия и тальвеги ущелий; 4 – наиболее крупные сейсмогравитационные деформации

Попков и др 2015

Средний Мурман. Окрестности пос. Териберка. Наверху выход к берегу молодого разлома Крупный скальный сейсмооползень на переднем плане, с обновлением в нижней части (слева).



Usoi-Dam • Lake Sarez



Карта и аэрофотоснимок Сарезского озера на Памире (Таджикистан), возникшего после землетрясения М=8 1911 года. Объем накопленной воды составляет 16,5 км3, макс. глубина 480 м и растет на 0,2 м в год. Озеро находится на 3250 м над уровнем моря. Пять миллионов человек живут вдоль долины р.Мургаб.



Плотина Ингурской ГЭС (на границе Абхазии и Грузии). Проектная мощность 1.3 млн. квт. Высота 272 м (6-я в мире). Вероятный объем уже начавшего двигаться оползня Хоко 11-21 млн куб м., при вовлечении двух соседних потенциально опасных участков склона – до 57 млн. куб. м.

Метеорологические цунами



Метеоцунами 21 июня 1978 г. в г.Вела Лука (Хорватия). Максимальная высота заливания бухты превысила 6 м.

27.06.2014, Одесса, пляж Черноморка

Одесское цунами 27 июня 2014 года 11:50 местного времени тихий солнечный день Две одиночные волны с высотой у кромки пляжа 1.0 – 1.5 м, дальность заливания 40-50 м

Жертв не было, но по сообщениям СМИ около 10 человек получило травмы разной степени тяжести (Никонов, Флейфель, 2015)

AB TH





Meteotsunami hit the Praia do Cassino, the longest beach in the world, on Sunday February 9, 2014 in the middle of the day when it was full of people. There were no fatalities but many people lost their beingings and several tens of cars were damaged. According to locals, this isn't the first time that such a tsunami has been observed in the area.

People running to their cars parked too close to the water

0:12 / 0:40

Cassino 09.02.2014



Карта очагов 235 подтвержденных или предполагаемых метеоцунами. Цвет представляет достоверность события: красный для V = 4 (подтвержденные), пурпурный для V = 3 (вероятные), зеленый для V = 2 (предполагаемые), голубой для V = 1 (сомнительные). Размер символа пропорционален высоте волны: большой для H ≥ 4 м), средний для 2 м ≤ H<4 м, малый для H<2 м. На врезке – распределение событий по достоверности.

Rabinovich A.B. (2020), Twenty-seven years of progress in the science of meteorological tsunamis following the 1992 Daytona Beach event, Pure and Applied Geophysics, 177(3), 1193-1230;



Районы наиболее частого возникновения метеоцунами (Балеарские о-ва, Адриатика, Желтое море, атлантическое побережье США, Великие озера

Typical mechanism of amplification of initial small water disturbance through several amplification and resonance effects ("Abiki" event of 31 March 1979 in Nagasaki Bay)



Rabinovich A.B., Šepić J. Meteorological tsunamis – what it is? // Priroda, 2016, N 1, 12-26 (in Russian)



A chain of meteotsunami-like events observed in the Mediterranean region on June 23-27 2014.

Šepic[J., Vilibic[I., Rabinovich A., Monserrat S. Widespread tsunamilike waves of 23—27 June in the Mediterranean and Black seas generated by highaltitude atmospheric forcing // Sci. Rep. 2015. V.5. №11682. P.1—5.



Запись мареографа в Северо-Курильске (о-в Парамушир) за 21 марта 2010 г. Никакой сейсмической активности в этот день на Курилах зарегистрировано не было.

Сравнительные характеристики тектонических цунами, метеоцунами, штормовых нагонов, сейш и волн-убийц

| | Tectonic tsunamis | Meteo- tsunamis | Storm surges | Seiches | Rogue waves |
|----------------------------|--|----------------------------|---|---|--|
| Source | Submarine earthquakes, volcanos, landslides | Atmospheric disturbance | Tropical storms and hurricanes | Forcing from outside basin | Re-distribution of energy already existing in upper ocean – low atmosphere system |
| Typical period | From 2 min to 1-2 hours | From 2 min to 1-2 hours | Aperiodic | Tens of minutes to several hours | Typically observed as a single wave |
| Typical duration | From one to tens of hours | Several hours | From several hour to several days | From several hours to several days | From few to 20 sec |
| Max observed run-up height | 40-45 m (E) 35-40 m (V) 525 m (L) | 7-8 m (21m?) | 7-8 m | ~1 m | 25.6 m |
| Max in-land flooding | Up to 5-10 km | 1 to 5 km | Up to 50 km | Small or no flooding | Coastal flooding is rare |
| Spatial manifestation | From 1 to 18,000 km | From 1 to 1,000 km | Hundred of km | From one to several tens of km | Less than 1 km |
| Area of impact | Coastline areas | Coastline areas | Coastline areas | Closed and semi-closed water basins | Mostly in deep open ocean |

Г.И.ПОПОВ

ОБ УСЛОВИЯХ ОБРАЗОВАНИЯ ЦУНАМИ

Термин «цунами» обычно означает внезапно возникающие длинные морские волны с большой скоростью распространения и значительной энергией. Эти особенности волн цунами обусловливают их глубокое проникновение на сушу, где они деформируются (и могут получить сходство с приливным бором), порождая громадные разрушения.

Название «цунами» (и другие) применяется одинаково к волнам, образовавшимся от различных причин. Однако волны, возникшие при разных условиях, должны обладать, очевидно, неодинаковыми свойствами. Сбивчивость терминологии, несомненно, отражает неполноту и противоречивость наших знаний цунами¹.

Ф. Омори (Омори, 1918) приводит схемы мареограмм цунами, связанных с подводными землетрясениями, а также цунами, порождаемых тайфунами (рис. 1). Вид этих кривых показывает, что они отражают явления разного рода.

Попов Г.И. Об условиях образования цунами // Бюллетень совета по сейсмологии, 1961, №9.



Рис. 1. Схемы мареограмм цунами *I* — сейсмического происхождения; *II* — вызванного

Приморье, пос.Рудная Пристань, 07.09.2011г., подъем до 2.5 м

Пос.Рудная Пристань, 25.07.2013г., подъем уровня до 3 м





Цунами от землетрясений в Японском море в пос.Рудная Пристань наблюдались в 1940 году - 3.5 м 1983 году - 4.8 м 1993 году - 3.8 м

Цунами и цунами-подобные явления в других морях, омывающих побережье России

| | Интервал наблюд. | Макс. магн. | Макс. высота |
|-----------------------------|---------------------|-------------|------------------|
| Черное море | | Mmax = 9.1 | $Hmax = 7.9 \mu$ |
| 51 сооблие Коренийские с | -900 - 201411. | w = 0.1 | ппах = 7- о м |
| каспииское м | оре | | |
| 5 событий | 1608 — 2000гг. | Mmax = 7.7 | Hmax = 2-3 м |
| Балтийское м | юре | | |
| 21 событие | 1000 — 2004гг. | Mmax ~6 | Hmax = 4-5 м |
| Белое море | | | |
| 4 события | 1542 — 1967гг. | Mmax ~? | Hmax = 1.5 м |
| Баренцово мо | оре | | |
| 5 событий | ~500 — 1883гг. | Mmax ~? | Hmax = 5 м |
| Оз. Байкал | | | |
| 5 событий | 1771 — 1963гг. | Mmax = 7.5 | Hmax = 2-3 м |

Табл. 1. Последняя регистрация опасных (> 3 м) цунами на побережьях РФ

| Камчатка и Сев. Курилы | 1969 | 48 лет |
|------------------------|------|----------|
| Центральные Курилы | 2006 | 11 лет |
| Южные Курилы | 1994 | 23 года |
| Сахалин | 2007 | 10 лет |
| Японское море | 1993 | 24 года |
| Черное море | 1875 | 142 года |
| Балтийское море | 1869 | 148 лет |
| Баренцово море | 1503 | 515 лет |

Последние документированные жертвы от цунами на побережье РФ были в 1952 году, более 65 лет тому назад. При цунами 4 ноября 1952 года в Северо-Курильске погибло от 10 до 15 тыс. чел. (современная оценка). Предыдущие жертвы были в 1923 году (Усть-Камчатск).



Восточное побережье Камачатки: Постоянный прибой с высотой до 1.5 м. Размах прилива до 1.8 м

Черноморское побережье РФ: Отсутствие заметного прибоя. Максимальных размах приливов 18 см





Пример небольшого крымского пляжа. Цунами с высотой 1 метр на подобном пляже будет чрезвычайно опасным. 2-метровое цунами вызовет неизбежные жертвы. При 3-метровом цунами большинство из находящихся на пляже людей погибнет.



Объявление тревоги на подобном пляже само по себе опасно, т.к. отсутствует возможность для быстрой эвакуации людей. 2-метровое цунами вызовет неизбежные жертвы. При 3-метровом цунами большинство из находящихся на пляже людей погибнет.

Заключение

 Цунами несейсмического происхождения (в первую очередь, обвальные и метеорологические) могут играть ведущую роль во многих водных бассейнах

 Существующие СПЦ достаточно надежно решают задачу оперативного прогноза сейсмогенных цунами (при высоком числе ложных тревог), но не способны своевременно прогнозировать вулканогенные, оползневые и метеорологические цунами

 Оперативный прогноз оползневых и метеорологических цунами технически возможен, но требует четкого предварительного выделения мест вероятного возникновения таких событий

 Карты цунамиопасности побережья, построенные при учете только сейсмогенных цунами могут значительно недооценивать реальную опасность цунами, в особенности, для участков побережье, не имеющих перед собой зон субдукции.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ