

УДК 551.46

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ЦУНАМИ 2018 ГОДА НА ОСТРОВЕ СУЛАВЕСИ: ВОЗМОЖНЫЕ ОЧАГИ

А. И. Зайцев^{1,2,*}, Е. Н. Пелиновский^{1,2,3}, А. Ялченир⁴, Н. Сусморо⁵, Г. Прасетъя⁶,
Р. Хидаят⁷, академик РАН Г. И. Долгих⁸, С. Г. Долгих⁸, А. А. Куркин¹, Г. Доган⁴,
Н. Заибо⁹, П. И. Пронин¹

Поступило 10.12.2018 г.

Выполнено численное моделирование цунами 28 сентября 2018 г. на острове Сулавеси (Индонезия). Показано, что наблюдаемое распределение высот цунами на обширной территории может быть объяснено непосредственным действием сильного землетрясения, а в зоне очага (район г. Палу) — подводным оползнем.

Ключевые слова: цунами, численное моделирование, подводный оползень.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524863375-379>

ВВЕДЕНИЕ

28 сентября 2018 г. в центральной части о. Сулавеси (Индонезия) произошло землетрясение магнитудой 7,5. Его источник находился на расстоянии 77 км от административного центра провинции Палу (рис. 1) и ощущался на достаточно большом расстоянии, на Восточном Калимантане а также в Малайзии. В результате землетрясения возникли волны цунами (до 11 м высотой), достигшие город Палу, где погибло более 2 тысяч человек, большинство из них — на пляжах, куда приехали на фестиваль в честь Дня города. Подземные толчки разрушили взлётные

полосы аэродромов, и спасатели не смогли сразу вылететь к месту катастрофы.

К сожалению, почти все пункты регистрации уровня моря не работали из-за сбоя в питании электричеством после землетрясения. Исключением стал мареограф в посёлке Пантолан (Pantolan), зарегистрировавший приход волны цунами через 7 мин после основного толчка (рис. 2). Запись показывает, что цунами началось с понижения уровня воды приблизительно на 2 м от своего исходного положения, затем уровень воды поднялся на высоту более чем 1,5 м от нулевого уровня. Максимальная высота волны (от подошвы до пика) достигла почти 4 м и период колебаний составил приблизительно 5 мин. Как видно из мареограммы, землетрясение произошло примерно за час до максимального прилива в точке. Спустя неделю после цунами выполнено полевое обследование следов цунами [1–3], и измеренные высоты волн на берегу представлены на рис. 2 (справа). Сразу отметим, что цунами часто отмечаются на о. Сулавеси [4–8], но последнее цунами оказалось самым разрушительным из них.

Землетрясение было зарегистрировано лазерным деформографом, установленным на МЭС ТОИ ДВО РАН “м. Шульца”, на расстоянии почти 5000 км от эпицентра. Используя метод определения цунами-генности землетрясения [9], уже через несколько минут после регистрации можно было говорить о возможной опасности цунами.

¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

²Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Южно-Сахалинск

³Федеральный исследовательский центр прикладной физики Российской Академии наук, Нижний Новгород

⁴Middle East Technical University, Ankara, Turkey

⁵Naval Hydrographic and Oceanographic Centre of Republic of Indonesia, Jakarta, Indonesia

⁶Indonesian Tsunami Scientific Community, Jakarta, Indonesia

⁷Ministry for Maritime Affairs of the Republic of Indonesia, Jakarta, Indonesia

⁸Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Владивосток

⁹Université des Antilles, Pointe-à-Pitre, Guadeloupe

*E-mail: aizaytsev@mail.ru

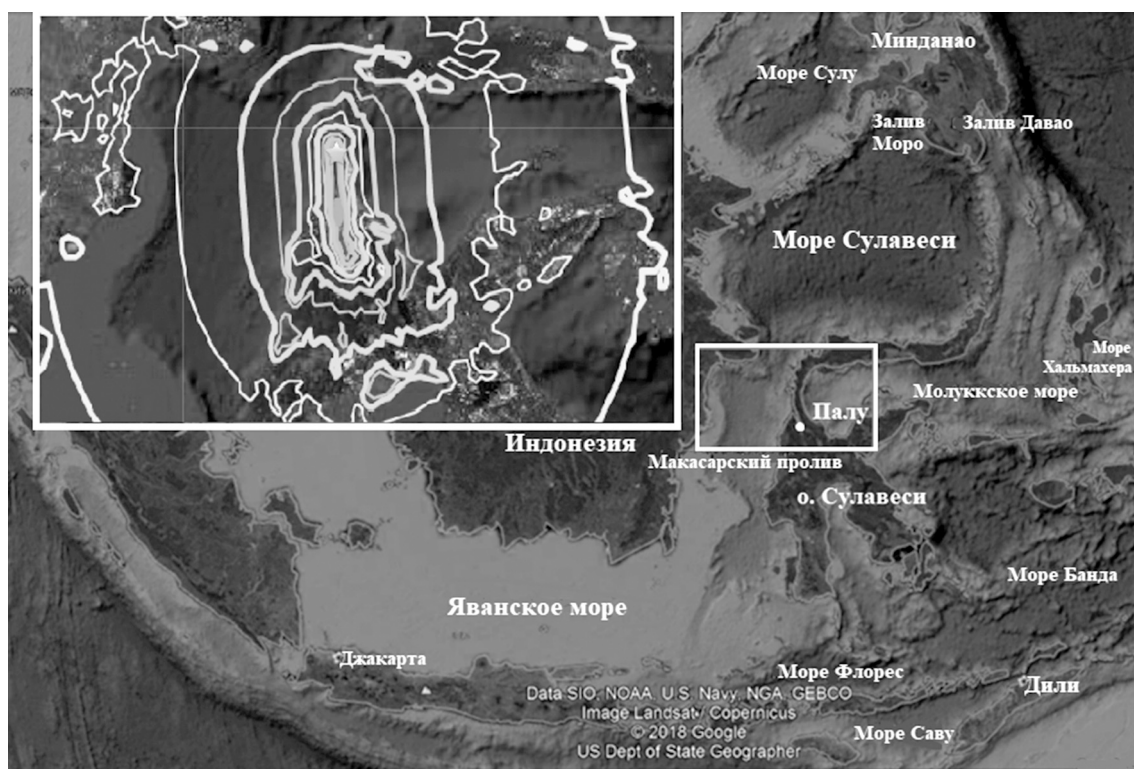


Рис. 1. Местоположение землетрясения 28 сентября 2018 г. (изолинии сотрясаемости в баллах).

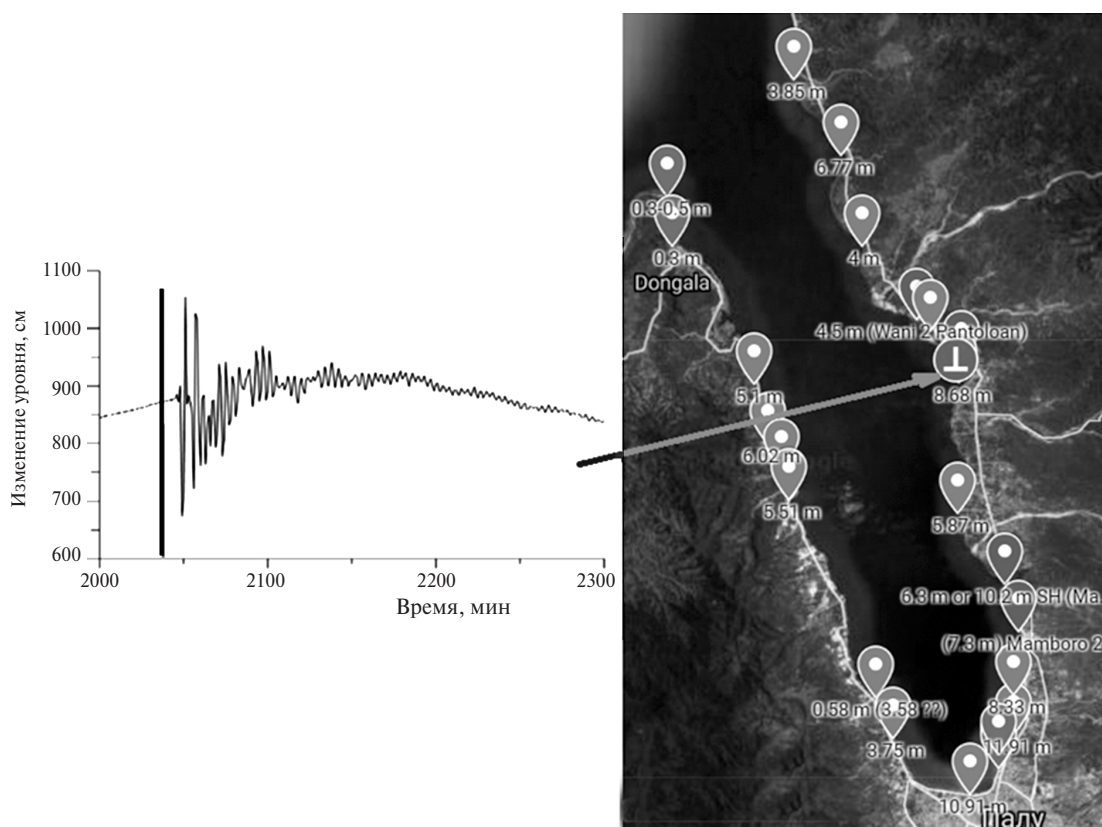


Рис. 2. Регистрация волны цунами на приливной станции Пантолан. Черной вертикальной линией показано время землетрясения, а стрелкой — положение мареографа в бухте.

В настоящее время обсуждаются возможные источники данного цунами. В качестве таковых рассматриваются землетрясение и оползень, возможно даже несколько. К сожалению, картирование положений оползней, особенно подводных, затруднено, и здесь методы математического моделирования могут помочь прояснить природу источника волн цунами. В данной работе представлены результаты моделирования цунами 2018 г. на о. Сулавеси и обсуждение возможных его источников.

ГЕНЕРАЦИЯ ЦУНАМИ СЕЙСМИЧЕСКИМ ИСТОЧНИКОМ

На первом этапе мы исследовали генерацию волн цунами сейсмическим источником, используя данные FFM (finite-fault model) модели. Эпицентр землетрясения имеет координаты $119,8401^\circ$ в.д. и $-0,1781^\circ$ ю.ш. и расположен на глубине 10 км. Длина разрыва 90 км, ширина 30 км, смещение по разрыву 2,3 м, угол разлома 350° , угол смещения плиты в глубь 17° , вдоль разлома 67° . На этой основе с помощью формулы Окады рассчитан очаг цунами [10]. Максимальная высота подъёма воды в источнике около 0,2 м, а опускание на 0,4 м.

Расчёты выполнялись с помощью комплекса NAMI-DANCE [11], решающего нелинейные уравнения мелкой воды на вращающейся Земле с учётом донного трения. Параметр трения (коэффициент Маннинга) был выбран 0,015. На берегу принимались граничные условия полного отражения. Батиметрия исследуемого района с шагом 200 м получена интерполяцией 30-секундной цифровой батиметрии GEBCO (Digital Atlas, British Oceanographic Data Centre). Шаг по пространству составлял 200 м, а по времени 0,5 с, удовлетворяя критерию Куранта. Расчёт проводился на протяжении 60 мин, что позволяет описать основные волны цунами. Рассчитанные максимальные высоты волн, однако, оказались малыми (не более 1 м), демонстрируя, что землетрясение не могло вызвать катастрофического цунами. Таким образом, известные в настоящее время параметры землетрясения не могут объяснить наблюдаемые характеристики цунами.

ГЕНЕРАЦИЯ ВОЛН ЦУНАМИ ПОДВОДНЫМ ОПОЛЗНЕМ

Используя первичные данные морской геологии, полученные индонезийскими соавторами Г. Прасетья (G. Prasetya) и Р. Хидаят (R. Hidayat) под руководством Н. Сусморо (N. Susmoro) во время обследования 8–13 октября 2018 г., для расчётов был вы-

бран оползень, который расположен приблизительно в 8 км на северо-западе от п. Пантолан. Оползень имеет размеры: ширина 5 км, длина 2 км и высота около 3,5 м (рис. 3).

Для численного моделирования цунами оползневой происхождения использован программный комплекс NAMI-DANCE_L, решающий уравнения двухслойного потока, один из которых, описывающий движение оползневой массы, является вязким [12]. Параметры численной схемы те же, что и в предыдущем разделе. Учитывая время прихода волны в точку Пантолан на реальной записи, мы сместили начало движения оползня на 5 мин после землетрясения, предполагая, что запаздывание может быть связано как с реологическими свойствами грунта, так и последующими афтершоками.

Рассчитанное максимальное распределение амплитуд показывает значительные заплески до 4 м по всему заливу, при этом самые большие высоты достигаются в районе схода оползня и в районе г. Палу в согласии с данными наблюдений. Приведём здесь рассчитанную мареограмму в точке п. Пантолан (рис. 4). По сравнению с сейсмическим источником здесь наблюдаются волны в более чем два раза выше. Максимальная высота достигает почти 2 м. Характерный период около 5 мин, как и в предыдущем сценарии. Как видим, наблюдается достаточно хорошее согласие между расчётами и измерениями, так что предположение, что цунами вызвано движением оползня, находит своё подтверждение.

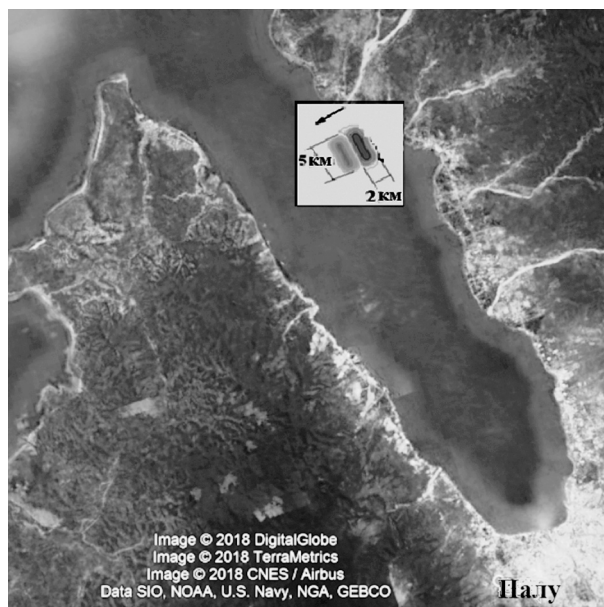


Рис. 3. Расположение и размеры предполагаемого оползня.

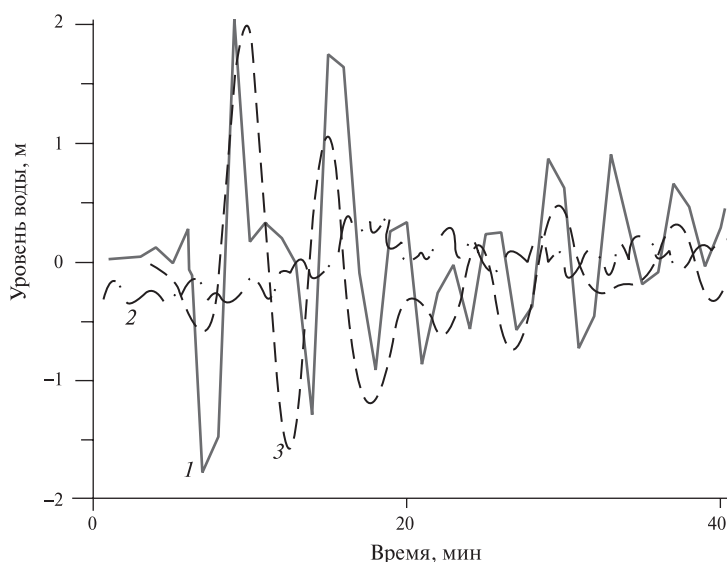


Рис. 4. Измеренная мареограмма (1) и рассчитанная от землетрясения (2) и от оползня (3).

ГЕНЕРАЦИЯ ЦУНАМИ СОВМЕСТНЫМ ДЕЙСТВИЕМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И ОПОЛЗНЯ

Учитывая тот факт, что цунами оказало воздействие не только в заливе Палу, но и в достаточно удалённых районах (рис. 2), необходимо принять во внимание оба источника цунами: сейсмический и оползневой. Для численного моделирования также был использован программный комплекс NAMIDANCE. Численные решения, полученные разными комплексами, складывались линейно через 2 мин (когда оползень уже остановился), и далее производился расчёт волн в рамках теории мелкой воды. В расчётах волна цунами сейсмического происхождения появилась в момент времени 0 (время землетрясения), а спустя 5 минут начал движение подводный оползень. Эти расчёты позволили получить оценки высот волн цунами в пунктах наблюдения (табл. 1). Как видим согласие очень хорошее практически во всех пунктах, за исключением г. Палу, где измеренная высота волны превышает рассчитанную на почти 3 м. Не исключено, что в г. Палу сошло несколько оползней, фокусирующих волну цунами, но это должно быть предметом отдельного рассмотрения.

Выполненные расчёты показали, что наблюдаемые волны цунами на о. Сулавеси (Индонезия) 28 сентября 2018 г. связаны как с источником сейсмического происхождения (в дальней зоне), так и сходом оползня (в ближней зоне). Не исключено, что оползней было больше, и этим объясняется различие в цифрах для г. Палу.

Таблица. 1. Сопоставление измеренных и рассчитанных высот волн, м

Пункт	Рассчитанная высота	Измеренная высота
Северная Нгапа	2	2,1
Пантолан порт	3,2	4,9
Вани	4	4,5
Палу	8	10,9
Лабуан	2	2,3

Источники финансирования. Представленные результаты получены в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (задание № 5.4568.2017/6.7 и задание № 5.5176.2017/8.9) и при финансовой поддержке грантов РФФИ 18–05–80019 и 18–05–80011 (Программа “Опасные явления”), а также гранта Президента Российской Федерации по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации НШ-2685.2018.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arikawa T., Muhari A., Okumura Y., Dohi Y., Afriyanto B., Sujatmiko K.A., Imamura F. Coastal subsidence during the 2018 Sulawesi earthquake causing several tsunamis // J. Disaster Res. 2018.
2. Muhari A., Imamura F., Arikawa T., Hakim A.R., Afriyanto B. Solving the Puzzle of the September 2018 Palu, Indonesia, Tsunami Mystery: Clues from the Tsunami Waveform and the Initial Field Survey Data // J. Disaster Res. 2018. V. 13, Disaster Letter: sc20181108.

3. Schiermeier Q. Clash over tsunami access // *Nature*. 2018. V. 562. P. 317–318.
4. Pelinovsky E., Yuliadi D., Prasetya G., Hidayat R. The 1996 Sulawesi Tsunami // *Natural Hazards*. 1997. V. 16. № 1. P. 29–38.
5. Pelinovsky E., Yuliadi D., Prasetya G., Hidayat R. The January 1, 1996 Sulawesi Island Tsunami // *Int. J. Tsunami Soc.* 1997. V. 15. № 2. P. 107–123.
6. Gomez J.M., Madariaga R., Walpersdorf A., Chalard E. The 1996 Earthquakes in Sulawesi, Indonesia // *Bull. Seismol. Soc.* 2000. V. 90. № 3. P. 739–751.
7. Prasetya G.S., De Lange W.P., Healy T.R. The Makassar Strait Tsunamigenic Region, Indonesia // *Natural Hazards*. 2001. V. 24. P. 295–307.
8. Løvholt F., Kühn D., Bungum H., Harbitz C.B., Glimsdal S. Historical Tsunamis and Present Tsunami Hazard in Eastern Indonesia and the Southern Philippines // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. B09310. doi:10.1029/2012JB009425
9. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Овчаренко В.В., Чупин В.А., Швеиц В.А., Яковенко С.В. Деформационный метод определения цунамигенности землетрясений // *ДАН*. 2007. Т. 417. № 1. С. 109–112.
10. Okada Y. Surface Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space // *Bull. Seismol. Soc.* 1985. V. 75. № 4. P. 1135–1154.
11. Программный комплекс NAMI DANCE MANUAL. <http://skbsami.tr/namidance>; <http://lmnad.nntu.ru/ru/projects/namidance/>
12. Imamura F., Imteaz M.A. Long Waves in Two Layer: Governing Equations and Numerical Model // *Sci. of Tsunami Hazards*. 1995. V. 13. № 1. P. 3–24.

GENERATION OF THE 2018 TSUNAMI ON SULAWESI ISLAND: POSSIBLE SOURCES

**A. I. Zaytsev^{1,2}, E. N. Pelinovsky^{1,2,3}, A. Yalciner⁴, H. Susmoro⁵, G. Prasetya⁶,
R. Hidayat⁷, Academician of the RAS G. I. Dolgikh⁸, S. G. Dolgikh⁸, A. A. Kurkin¹,
G. Dogan⁴, N. Zahibo⁹, P. I. Pronin¹**

¹*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

²*Special Research Bureau for Automation of Marine Researches, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation*

³*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

⁴*Middle East Technical University, Ankara, Turkey*

⁵*Naval Hydrographic and Oceanographic Centre of Republic of Indonesia, Jakarta, Indonesia*

⁶*Indonesian Tsunami Scientific Community, Jakarta, Indonesia*

⁷*Ministry for Maritime Affairs of the Republic of Indonesia, Jakarta, Indonesia*

⁸*Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation*

⁹*Universite des Antilles, Pointe-a-Pitre, Guadeloupe*

Received December 10, 2018

Numerical modeling of a 28th September Tsunami on the Sulawesi Island (Indonesia) is executed. It is shown that observed distribution of a Tsunami heights in the extensive territory can be explained direct action of a strong earthquake, and in a center zone (the district of Palu) — submarine landslide.

Keywords: tsunami, numerical modeling, submarine landslide.