

УДК 551.466

СИЛЬНЕЙШИЕ ЦУНАМИ В ЯПОНСКОМ МОРЕ ПО ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ

© 2025 г. Е. С. Цуканова*, А. Б. Рабинович, И. П. Медведев, А. Ю. Медведева

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

*e-mail: tsukanovaelizaveta@gmail.com

Поступила в редакцию 24.05.2024 г.

После доработки 27.07.2024 г.

Принята к публикации 08.08.2024 г.

Японское море является зоной высокой сейсмической активности и в серьезной степени подвержено угрозе волн цунами. Сильные цунами, происходящие в этом регионе, нередко приводят к значительным разрушениям и человеческим жертвам. В данном исследовании описаны важнейшие события, наблюдавшиеся в Японском море в XX–XXI вв. В общей сложности рассмотрены восемь цунами событий, включая одно вулканического происхождения: 1940 (M_w 7.5), 1964 (M_w 7.5–7.7), 1971 (M_w 7.3), 1983 (M_w 7.7–7.8), 1993 (M_w 7.7), 2007 (M_w 6.2), 2011 (M_w 9.0–9.1) и 2022 (вулканическое). Особое внимание в представленной статье уделено цунами 1983 г. и 1993 г. Для этих двух событий было выполнено численное моделирование цунами и проведено их сравнение с фактическими мареографными записями. Из рассмотренных восьми событий, для двух (Тохоку 2011 г. и Тонга 2022 г.) источники находились за пределами Японского моря, но они сгенерировали цунами непосредственно в акватории данного моря: (1) источник землетрясения Тохоку 2011 г. располагался в Тихом океане к востоку от Японии, но землетрясение привело к горизонтальной подвижке Японских островов, что, в свою очередь, возбудило цунами к западу от этих островов; (2) извержение вулкана Хунга–Тонга–Хунга–Хаапай в центральной части Тихого океана вызвало сильные атмосферные волны Лэмба, которые, достигнув Японского моря, сгенерировали в этом море волны цунами.

Ключевые слова: Японское море, цунами, землетрясение, извержение вулкана, метеоцунами, численное моделирование

DOI: 10.31857/S0030157425010048, EDN: DQNGHN

1. ВВЕДЕНИЕ

Японское море — крупное окраинное море, входящее в бассейн Тихого океана, которое соединяется проливами Татарским и Лаперуза с Охотским морем, Цугару (Сангарским) и Каммон — с Тихим океаном и Корейским проливом — с Восточно-Китайским морем. Побережье Японского моря так же, как и другие берега Тихоокеанского бассейна, подвержено угрозе волн цунами. Трансокеанские цунами могут проникать в Японское море через проливы, однако при этом они сильно ослабевают и не представляют существенной опасности для япономорского побережья [7, 28]. Основная угроза для побережья Японского моря связана с сильными цунами, вызванными землетрясениями, происходящими в акватории данного моря. Такие события наблюдались в этом море неоднократно и приводили к серьезным разрушениям и человеческим жертвам. Региональные цунами являются основным предметом настоящего исследования.

За последние 100 лет в Японском море произошло четыре сильных землетрясения: в 1940 (M_w 7.5), 1964 (M_w 7.5–7.7), 1983 (M_w 7.7–7.8) и 1993 гг. (M_w 7.7) [33, 61]. Их очаговые зоны располагались вблизи западного побережья островов Хонсю и Хоккайдо (Япония) (рис. 1). В этом же районе находится небольшой вулканический остров Осима (рис. 1), на котором в 1741 г. извержение вулкана и оползень вызвали разрушительное цунами и многочисленные человеческие жертвы [24, 40, 72].

В каталоге Соловьева и Го [15] упоминается еще целый ряд значительных исторических цунамигенных землетрясений с очагами у побережья Японии: 701, 887, 1614, 1644, 1793, 1833 и 1872 гг. В 1927 г. в южной части о. Хонсю, недалеко от Киото, произошло катастрофическое землетрясение (M_w 7.0), известное как “землетрясение Кита-Танго” (*Kita Tango earthquake*) [45]. Землетрясение привело к серьезным разрушениям и большому числу человеческих жертв

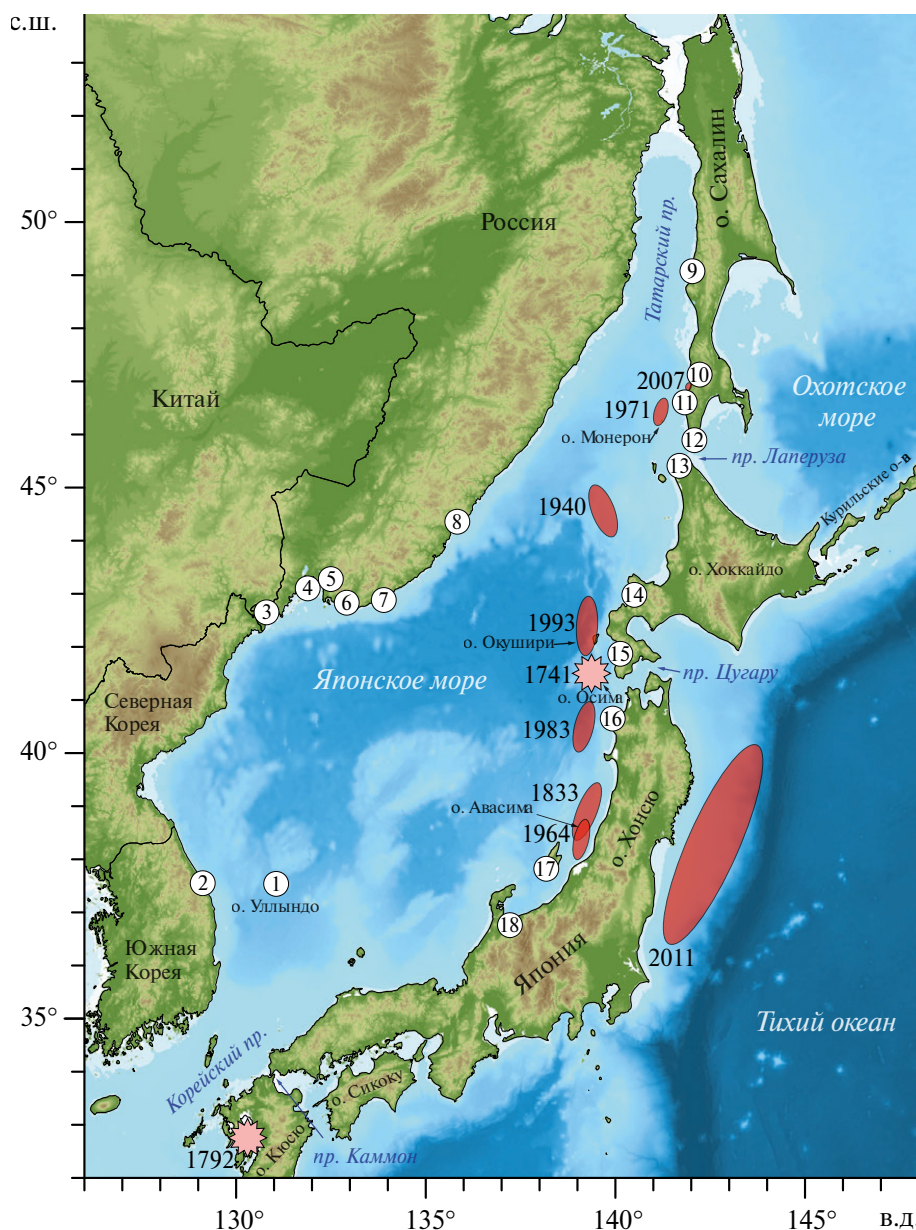


Рис. 1. Карта Японского моря с показанными очагами сильнейших землетрясений (красные овалы), цунамигенными извержениями вулканов (розовые многоугольники) и мареографными станциями (белые кружки), используемыми в настоящем исследовании; названия станций и их координаты указаны в табл. 1.

(~2.9 тыс. чел.) в префектуре Киото, но образовавшиеся волны цунами были сравнительно небольшими (высоты порядка 1.2–1.5 м) и не представляли серьезной опасности для побережья. Видимо, это связано с тем, что основная часть очага располагалась на суше.

В XXI в. произошло два трансокеанских цунами, которые наблюдались на всем побережье Тихого океана (и даже за его пределами), но для Японского моря обладали некоторыми свойствами регионального события:

(1) Тихоокеанское цунами 2011 г., вызванное сильнейшим землетрясением ($M_w \sim 9.1$) у северо-

восточного побережья о. Хонсю (рис. 1). Как показали результаты работы [60], горизонтальные подвижки континентального склона и смещение о. Хонсю привели к формированию волн цунами непосредственно в Японском море сразу после момента землетрясения;

(2) Тихоокеанское цунами 2022 г., вызванное извержением вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай в южной части Тихого океана (см., например, [8, 26, 53, 54]). Было установлено, что данное извержение породило два типа волн цунами [41, 55, 85]: “океанские” волны, сформировавшиеся непосредственно в зоне источника, и “атмосферные”

Таблица 1. Список используемых станций

№	Станция	Страна	Широта (° с.ш.)	Долгота (° в.д.)
1	Уллындо	Южная Корея	37.49	130.91
2	Мукхо	Южная Корея	37.55	129.12
3	Посъет	Россия	42.65	130.80
4	Владивосток	Россия	43.10	131.93
5	Большой Камень	Россия	43.10	132.34
6	Находка	Россия	42.83	132.92
7	Преображение	Россия	42.88	133.89
8	Рудная Пристань	Россия	44.36	135.83
9	Углегорск	Россия	49.07	142.03
10	Холмск	Россия	47.06	142.04
11	Невельск	Россия	46.66	141.85
12	Мыс Крильон	Россия	45.89	142.08
13	Вакканай	Япония	45.41	141.69
14	Иванай	Япония	42.98	140.50
15	Эсаси	Япония	41.87	140.13
16	Фукаура	Япония	40.65	139.93
17	Садо	Япония	38.32	138.52
18	Тояма	Япония	36.76	137.22

волны цунами («метеоцунами»), вызванные прохождением над поверхностью океана атмосферных волн Лэмба, образовавшихся при извержении. Как было показано в работе [83], в Японском море преимущественно наблюдались волны второго типа, т.е. сгенерированные в этом море, а не пришедшие извне.

Следует отметить еще два события, связанных с землетрясениями, которые произошли в северной части Японского моря (рис. 1) и вызвали цунами, зарегистрированные на побережьях о. Сахалин и о. Хоккайдо: Монеронское землетрясение 6 сентября 1971 г. (M_w 7.3) [19, 20] и Невельское землетрясение 2 августа 2007 г. (M_w 6.2) [9].

2. СЕЙСМИЧНОСТЬ РЕГИОНА

Большинство землетрясений в Японском море происходит вдоль Японо-Сахалинской островной дуги (о. Сахалин – Японские острова), наиболее сильные из них – у западного побережья островов Хоккайдо и Хонсю. Вдоль побережья России и Кореи происходят в основном глубоководные землетрясения с глубиной гипоцентра более 100 км. На рис. 2 показаны очаги землетрясений

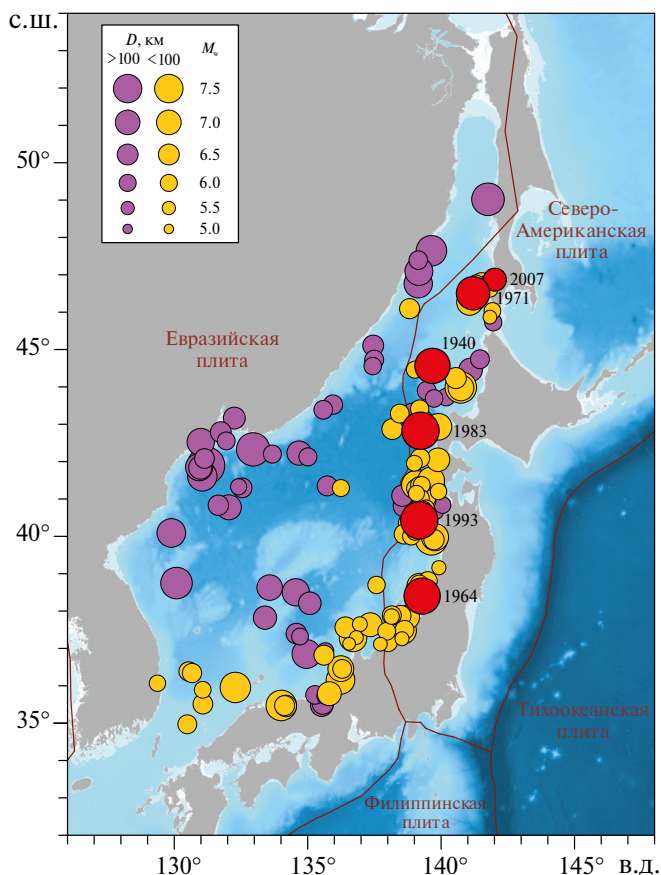


Рис. 2. Землетрясения в Японском море с 1904 по 2018 гг. по данным ISC-GEM с магнитудой $M_w > 5$, D – глубина гипоцентра. Землетрясения 1940, 1964, 1971, 1983, 1993 и 2007 гг. отмечены красным.

с 1904 по 2018 гг. из каталога ISC-GEM¹, распределенные по глубине гипоцентра. Землетрясения с глубиной гипоцентра более 50 км располагаются в центральной части акватории моря и у западного побережья, а мелкофокусные сгруппированы вблизи восточного побережья моря. В основном цунами генерируются землетрясениями с очагами, расположенными на глубинах менее 50 км, что объясняет, почему большинство цунами возникли именно в этой области.

В 1944 г. Ч. Гутенберг и Б. Рихтер [34] описали связь количества землетрясений с определенной магнитудой и их повторяемостью во времени в отдельном регионе (закон Гутенберга – Рихтера):

$$\log_{10} N_c = a - b M_w \quad (1)$$

где M_w – моментная магнитуда, N_c – частота землетрясений с магнитудой $\geq M_w$ в год, a и b – эмпирические коэффициенты. Данные коэффициенты определяются параметрами пород, механизмом и глубиной гипоцентра землетрясения

¹ Global Instrumental Earthquake Catalogue [30].

в конкретном регионе. Величина $T = 1/N_c$ определяет средний интервал (период) повторяемости землетрясений с магнитудой больше или равной M_w в рассматриваемом регионе.

Для оценки периода повторяемости потенциально цунамигенных землетрясений использовалось кумулятивное частотно-магнитудное распределение землетрясений с глубиной гипоцентра менее 50 км. Для моментной магнитуды M_w в Японском море параметры a и b были оценены как 4.02 ± 0.13 и 0.74 ± 0.02 , соответственно (рис. 3). Средний период повторяемости цунамигенных землетрясений с $M_w \geq 7.0$ в Японском море составляет 14.6 лет, а с $M_w \geq 7.5$ — около 34 лет.

3. ИСТОРИЧЕСКИЕ СОБЫТИЯ

В этом разделе рассмотрен ряд исторических событий, вызвавших сильнейшие волны цунами в акватории Японского моря за инструментальный период наблюдений.

3.1. Сейсмогенные цунами

Тетюхинское цунами 1 августа 1940 г.

1 августа 1940 г. в 15:08 UTC в Японском море произошло землетрясение с магнитудой $M_w 7.5$ (1940 *Shakotan-oki earthquake*). Очаг землетрясения располагался северо-западнее полуострова Сякотан (о. Хоккайдо) (рис. 1) и имел взбросо-сдвиговый механизм с глубиной гипоцентра по разным данным от 15 км (ISC-GEM) до 30 км [4, 32]. Землетрясение вызвало сильное цунами: на побережье о. Хоккайдо 10 человек погибло и еще 24 были ранены [36, 61]. Данное событие явилось первым инструментально зарегистрированным цунами в акватории Японского моря. Заплески цунами, достигавшие опасной высоты, были зафиксированы во многих пунктах Японии, на побережьях Кореи и СССР. На о. Хоккайдо максимальные вертикальные заплески достигали 3 м (о. Рисири и порт Томамаэ), но в основном не превышали 2 м [4, 36].

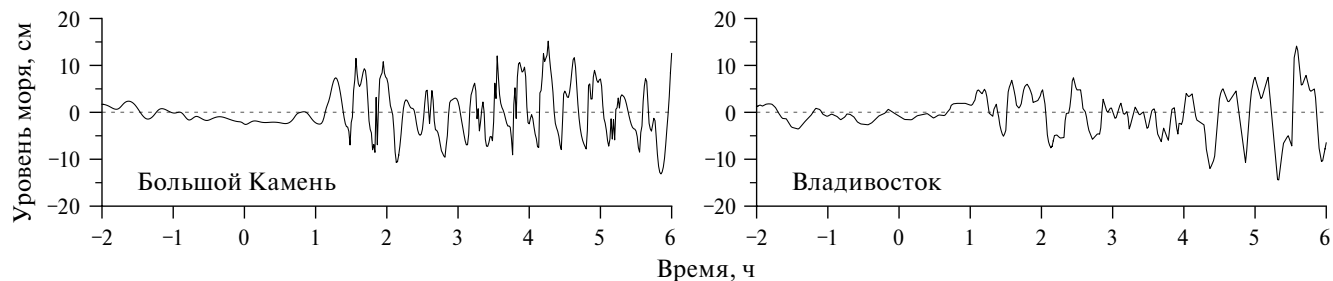


Рис. 4. Мареограммы Тетюхинского цунами 1940 г. для пунктов Большой Камень и Владивосток, относительно среднего уровня моря. Время отсчитывается от момента землетрясения.

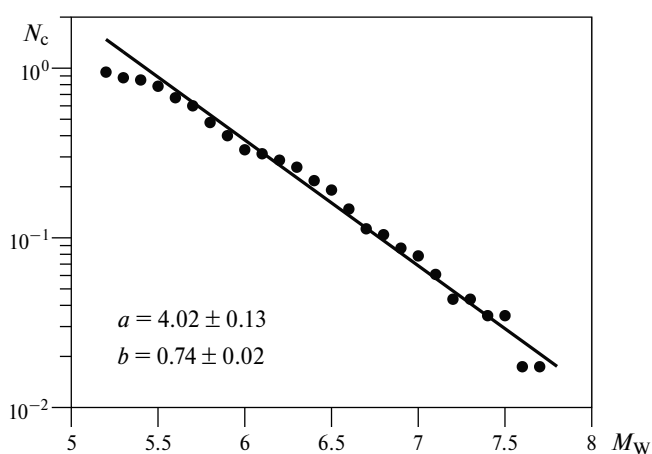


Рис. 3. Частотно-магнитудное распределение землетрясений с глубиной гипоцентра менее 50 км в Японском море по данным ISC-GEM с 1904 по 2018 гг. N_c — частота землетрясений в год; M_w — моментная магнитуда; a , b — эмпирические коэффициенты в уравнении (1).

Одна из особенностей данного цунами заключается в том, что наблюдавшиеся высоты заплесков в дальней зоне были больше, чем в ближней. Так, согласно данным, полученным в результате обследования побережья и показаний очевидцев [4, 36, 47], наибольшие высоты заплесков наблюдались в Приморье: в Тетюхе (Рудная Пристань) до 3.5 м, в пос. Каменка — до 5 м. По данным записей, полученных на некоторых мареографах и по свидетельствам очевидцев, можно видеть, что волны цунами достигли западного побережья Японского моря менее, чем через час после землетрясения (рис. 4). По мнению очевидцев², высота первой волны достигала 5 м, затем последовала серия волн с высотами до 3.5 м³ [4]. В СССР данное цунами получило название “Тетюхинское”, так как именно в этом районе оно ощущалось сильнее всего [13, 17].

² Свидетелем цунами в бухте Тетюхе (Рудная) был геолог В.А. Ярмолук [13], с 1966 по 1986 г. заместитель министра геологии СССР [1].

³ В [13] приводятся свидетельства очевидцев, что первая волна была 1.5–2 м, а вторая через 20–30 мин — 3.5 м.

Ниигатское цунами 16 июня 1964 г.

16 июня 1964 г. вблизи города Ниигата (западное побережье о. Хонсю, Япония) в 04:02 UTC произошло сильное землетрясение, магнитуда M_w которого по разным оценкам составляла от 7.5 до 7.7, глубина гипоцентра — около 15 км, механизм очага — взбросовый [21, 32, 35]. Землетрясение привело к сильным разрушениям на о. Хонсю: 3534 домов были полностью разрушены, еще более 11 тысяч сильно повреждены [50]. Землетрясение вызвало разжижение грунта («*liquefaction*») на обширной площади. Бор, вызванный волной цунами, распространился на несколько километров вверх по течению р. Синано (рис. 5а), где в результате сильных колебаний обрушился 307-метровый мост Шова (рис. 5б–в) [27].

В момент землетрясения о. Авасима, находящийся в 8 км к северу от эпицентра, в результате косейсмических деформаций поднялся более чем на 2 м относительно уровня моря [21]. Образовавшиеся волны цунами уже через 15 мин после начала землетрясения обрушились на город Ниигата. На побережье вблизи очага землетрясения (префектура Ниигата, пункты Ивафуне и Фуя) высоты заплеска достигали 4–4.5 м [35], а на некоторых песчаных участках берега — 5.8 м [15, 44]. В отличие от цунами 1940 г., Ниигатское цунами на побережье Кореи, Приморья и на юго-западном побережье Сахалина проявилось слабо: визуально не наблюдалось и регистрировалось только мареографами (рис. 5г). Характерные высоты волн были меньше 0.3 м [16].

Монеронское цунами 5 сентября 1971 г.

Описываемые выше цунами 1940 и 1964 гг. были вызваны землетрясениями, очаги которых располагались вблизи побережья Японских островов, т.е. в основной сейсмоактивной зоне региона (рис. 2). Северная часть этого моря менее активна, но в ней также могут происходить достаточно сильные землетрясения. Так, 5 сентября 1971 г. в 18:35 UTC (6 сентября в 05:35 по сахалинскому времени) в Татарском проливе, северо-восточнее о. Монерон, произошло землетрясение с магнитудой $M_w \sim 7.3$ и глубиной гипоцентра 15–20 км. Механизм очага также был взбросовый, но с малой сдвиговой компонентой [10].

Визуальные наблюдения показали, что первая волна пришла на побережье примерно в 19:00 UTC и была наибольшей: с высотой около 2 м [19, 20]. Мареографные записи Монеронского цунами были получены на о. Сахалин, в Приморье, на Курилах и в Японии. Максимальные высоты волн, 30–40 см, были зарегистрированы на станциях Невельск, Холмск и Вакканай, т.е. на трех ближайших к источнику станциях. Характерный период зарегистрированных колебаний составил 10–20 мин, их продолжительность — около суток. В Холмске цунами проявилось сильнее, чем в Невельске (рис. 6).

В течение последующих трех недель в этом же районе произошли еще 4 сильных афтершока с $M_w > 6.2$; все они возбудили слабые цунами, наблюдавшиеся в Холмске (7–9 см) и Невельске (3–4 см).

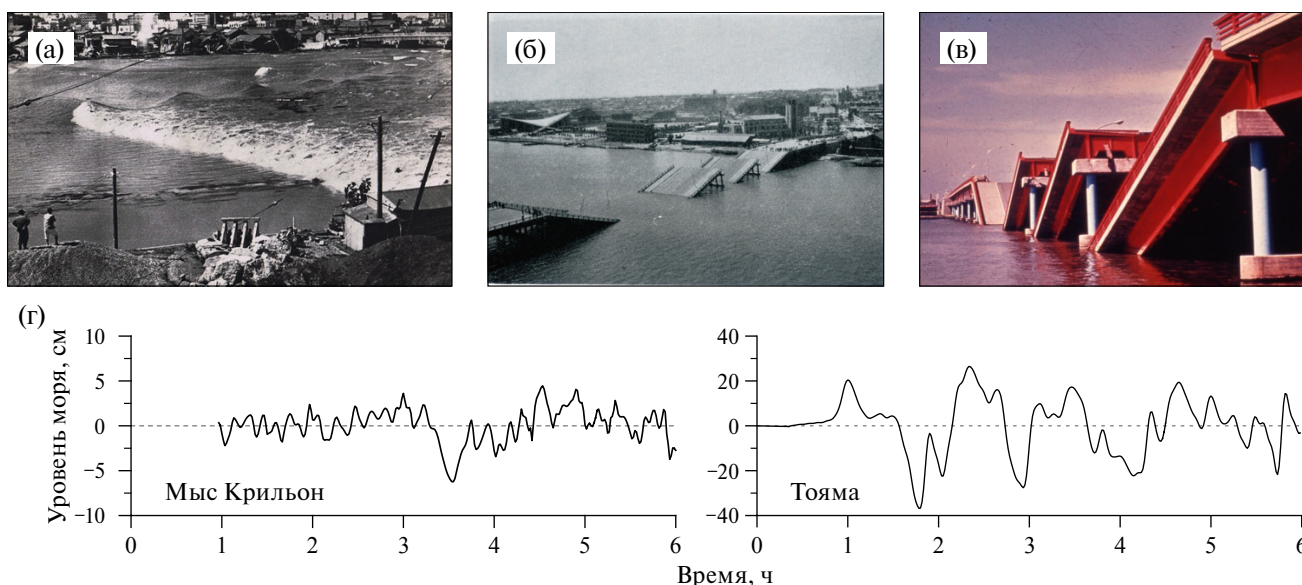


Рис. 5. Последствия Ниигатского цунами 1964 г.: (а) бор цунами на р. Синано (фото из газеты Niigata Nippo); (б–в) разрушенный в результате землетрясения мост Шова (<https://tsunami-dl.jp/document/145>; <http://homepage2.nifty.com/yoshimi-y/niigata1.htm>); (г) мареограммы Ниигатского цунами для пунктов Мыс Крильон и Тояма, относительно среднего уровня моря. Время отсчитывается от момента землетрясения.

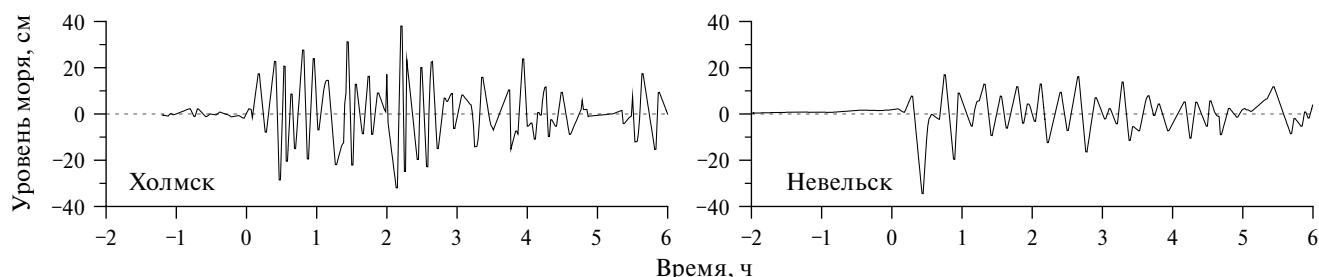


Рис. 6. Мареограммы Монеронского цунами 1971 г. для пунктов Холмск и Невельск, относительно среднего уровня моря. Время отсчитывается от момента землетрясения.

Япономорское цунами 26 мая 1983 г.

Одним из сильнейших цунами прошлого века в акватории Японского моря стало цунами, произошедшее 26 мая 1983 г. в 03:00 UTC в результате землетрясения с магнитудой M_w 7.7–7.8 (1983 *Nihonkai Chubu-oki earthquake*). Эпицентр находился к юго-западу от префектуры Аомори, о. Хонсю (рис. 1); глубина гипоцентра составляла 14 км, механизм очага — взбросовый [70]. Разрыв затронул два отдельных разлома, более северный из которых имеет простираание ССЗ—ЮЮВ, а более южный — ЮЮЗ—ССВ; разрыв начался на южном разломе, а затем продолжился на северном после десятисекундной задержки.

Землетрясение вызвало сильное цунами, распространившееся по всей акватории Японского моря. В Японии от волн цунами погибло около 100 человек, еще трое — на побережье Южной Кореи [23]. Первая волна была зафиксирована в городе Фукаура примерно через 7 мин (по данным мареографа) после землетрясения. Максимальные высоты наблюдавшихся волн цунами вблизи источника были более 10 м [74], а на побережье Акиты (деревня Минехамы) был зафиксирован максимальный заплеск высотой более 14 м [74]. Цунами было разрушительным не только для о. Хонсю, но и для островов Хоккайдо и Окушири, где заплески достигали 7 м [23]. Значительные высоты волн наблюдались на побережье Южной Кореи (максимальная высота цунами на одном из островов превысила 5 м [23]) и в Приморье. В некоторых пунктах Приморского края (например, в бухте Лидовка) высота волны была около 7 м [11]. Время добега волн до всех пунктов Приморского края составило менее 1 ч (рис. 7г). В заливах Восток и Находка отмечался перепад уровня до 2.5 м; в закрытой бухте Золотой Рог (порт г. Владивосток) высота волн цунами была до 0.7 м, а в заливе Посыет перепад уровня достигал 1–1.5 м [3]. В открытых бухтах Уссурийского залива отмечался перепад уровня до 4 м; в бухте Тихой (Владивосток) наблюдались волны цунами

высотой 5 м [3, 11]; были разрушены лодочные гаражи, унесены в море моторные лодки, повреждены стоявшие в бухте суда, в том числе и военные (рис. 7а–в).

Во многом эта трагедия повлияла на отношение людей к явлению цунами, и через 10 лет (Окуширское цунами 12 июля 1993 г.) часть людей поспешно эвакуировалась после первых толчков, зафиксированных на о. Окушири.

Окуширское цунами 12 июля 1993 г.

Самое разрушительное сейсмическое цунами в акватории Японского моря было вызвано землетрясением с M_w 7.7 (1993 *Hokkaido Nansei-oki earthquake*), произошедшим 12 июля 1993 г. в 13:17 UTC юго-западнее о. Хоккайдо, вблизи о. Окушири (рис. 1). Очаг землетрясения носил сложный характер с глубиной гипоцентра порядка 10 км [77]. Сложная структура очага в дальнейшем создала серьезные проблемы для ученых при построении численных моделей волн цунами, вызванных этим землетрясением (см., например, [61, 77, 80, 81]).

Землетрясение привело к образованию разрушительных волн цунами, которые менее чем через 5 мин после главного толчка обрушились на близлежащий о. Окушири (рис. 8г). Всего в результате землетрясения и цунами погибло или пропало без вести 230 человек, из которых 185 — на о. Окушири. Основной удар пришелся на южное и юго-западное побережье острова. Практически вдоль всего этого побережья высоты заплеска были около 16 м; в результате был полностью уничтожен поселок Аонае в южной части острова (рис. 8а–г). В небольшой долине Монаи (рис. 8б), в результате суперпозиции волн, обошедших небольшие о-ва Хира и Муэн на входе в долину, максимальный заплеск цунами составил 31.7 м [52, 75].

Серьезно пострадали западное и южное побережья о. Хоккайдо; максимальная высота заплеска на этих побережьях была свыше 10 м.

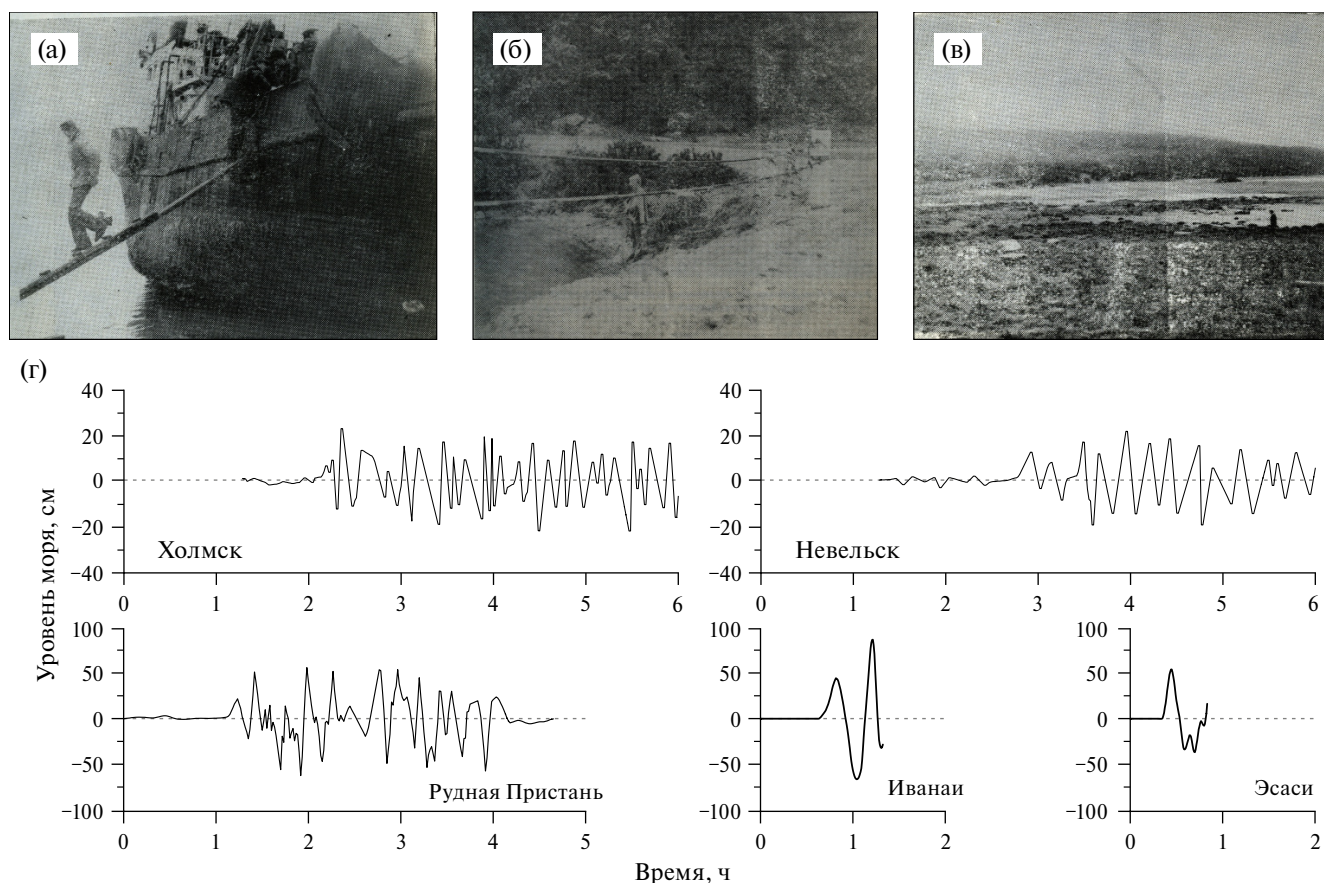


Рис. 7. Последствия Япономорского цунами 1983 г. на побережье Приморья: (а) б. Валентин: трап, лежащего на прибрежной каменной плите МРС, спущен прямо на берег (фото: [11]); (б) б. Лидовка: на леерах моста висит морская трава, оставленная приходящей волной цунами (фото: [11]); (в) б. Лидовка: в заболоченной низине видны разбросанные цунами железобетонные конструкции (фото: [11]); (г) мареограммы Япономорского цунами для пяти пунктов побережья России и Японии, относительно среднего уровня моря. Время отсчитывается от момента землетрясения.

На западном берегу о. Хонсю максимальные высоты волн цунами были около 2 м. Общий ущерб в Японии от этого цунами составил 1.2 млрд долларов [73]. Окуширское цунами проявилось и на побережье Южной Кореи; волна дошла до побережья через 1.5–3 ч; максимальные высоты волн были зарегистрированы на станциях Мукхо (2.1 м), Сокчхо (1.3 м) и Пусан (1.0 м) [64].

По данным наблюдений на российском побережье, максимальная высота 4.3 м была зафиксирована в Глазковке (бухта Кит), в Рудной Пристани высота волны составила 3.8 м, в бухте Валентин — 4.0 м, в пос. Каменка — 2.8 м, в пос. Моряк-Рыболов — 2.0 м, в зал. Владимира — 1.2–2.0 м, в бухте Ольга максимальный заплеск достигал 1.2–2.0 м, а в Находке — 1.0 м [5]. Максимальная дальность заплеска, более 140 м, была зафиксирована в бухте Зеркальная [12]. На юге и севере Приморья наблюдавшиеся волны цунами были существенно меньше: от 0.6 м (б. Андреева) до 1.5 м (м. Де-Леврон) и от 0.5 м (пос. Светлая) до 1.3 м (бухта Пластун) [5]. Несколько мареограмм этого цунами

приведены на рис. 8д. Общий ущерб от Окуширского цунами для побережья России оценивался в 10 миллиардов рублей (в ценах 1993 г.) [5].

Невельское цунами 2 августа 2007 г.

2 августа 2007 г. в 02:37 UTC на юго-западном шельфе о. Сахалин, вблизи города Невельск произошло землетрясение с M_w 6.2 (рис. 1) и глубиной очага ~10 км. Несмотря на относительно небольшую магнитуду, землетрясение вызвало серьезные разрушения в Невельске и Холмске и привело к гибели двух человек, еще 14 были ранены, общий ущерб оценивается в 8.5 млрд руб. [6]. Землетрясение вызвало значительное цунами в северной части Японского моря с максимальной высотой заплеска в районе поселков Заветы Ильича и Ловецкое — 3.2 м, а в районе Ясноморского — 2 м. Высоты волн цунами в Холмске по данным мареографа (рис. 9) составили 40–50 см [9]. На западном побережье о. Хоккайдо волны высотой 10–20 см были зарегистрированы на станциях Румои и Вакканай.

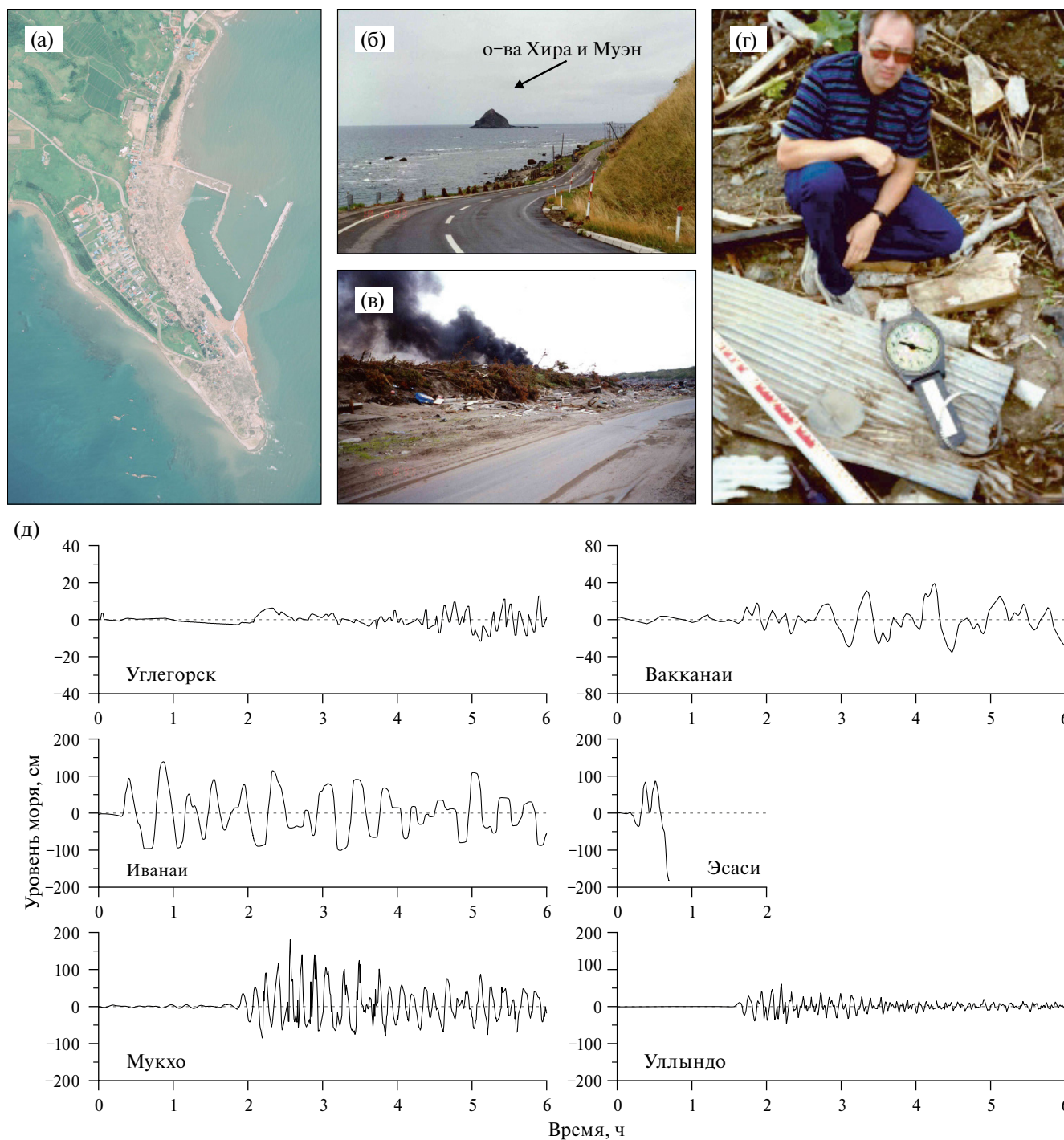


Рис. 8. Последствия Окуширского цунами 1993 г.: (а) разрушения в пос. Аонае на южном побережье о. Окушири (снимок The Geospatial Information Authority of Japan 14.07.1993); (б) южное побережье о. Окушири, о-ва Хира и Муэн (фото: А.Б. Рабинович, 1993); (в) разрушения на о. Окушири (фото: А.Б. Рабинович, 1993); (г) часы, найденные в долине Монаи на юго-западном побережье о. Окушири во время полевого обследования побережья острова: часы остановились через 5 мин после начала землетрясения, в момент прихода волны цунами (на фото А.Б. Рабинович, участвовавший в обследовании побережья острова; август 1993 г.); (д) мареограммы Окуширского цунами для шести пунктов побережья России, Японии и Южной Кореи, относительно среднего уровня моря. Время отсчитывается от момента землетрясения.

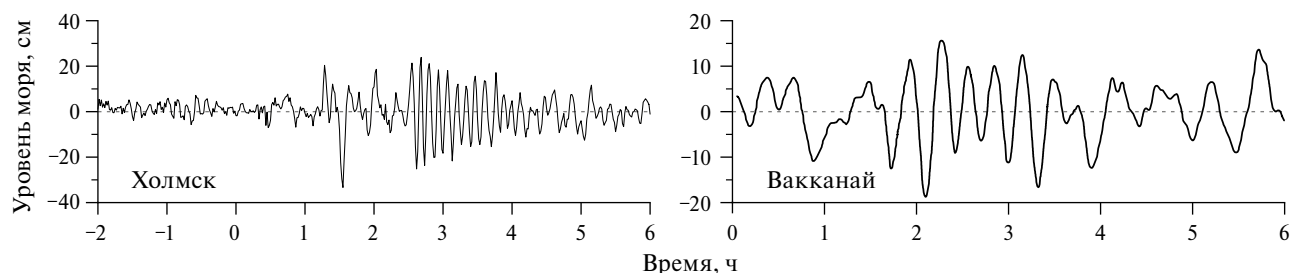


Рис. 9. Мареограммы Невельского цунами 2007 г. для пунктов Холмск и Вакканай, относительно среднего уровня моря. Время отсчитывается от момента землетрясения.

Тохоку цунами 11 марта 2011 г.

11 марта 2011 г. в 05:46 UTC у северо-восточного побережья о. Хонсю, в районе региона Тохоку, произошло катастрофическое землетрясение с M_w 9.0–9.1 (рис. 1), одно из сильнейших за всю историю инструментальных наблюдений. Землетрясение вызвало разрушительное цунами, которое обрушилось на близлежащее побережье о. Хонсю и распространилось по всему Тихому океану, выйдя даже за его пределы [66, 68, 79]. Данное событие стало известно под названиями “2011 Тохоку землетрясение и цунами” и “Великое восточно-японское землетрясение” (*Great East Japan Earthquake*). Максимальные высоты заплесков в регионе Тохоку достигли величины 42.1 м [59]. В настоящее время количество погибших и пропавших без вести вследствие цунами оценивается в 18428 человек (по данным [62], https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml). Несмотря на то, что землетрясение произошло в Тихом океане, оно вызвало цунами и в Японском море, не только за счет волн, прошедших через проливы, но непосредственно и из-за горизонтальных смещений о. Хонсю.

Данные GPS-анализа [84] показывают, что землетрясение Тохоку привело к смещению этого острова в восточном направлении более чем на 5 м. В результате практически сразу после момента главного толчка в Японском море были сгенерированы волны цунами, вызванные горизонтальной подвижкой. Их амплитуды были сравнительно невелики, максимальная высота этих колебаний, около 30 см, была зарегистрирована на станции Ното [60]. Примерно через час-полтора в Японское море через проливы Цугару и Лаперуза пришли волны цунами “извне” (рис. 10), не превышавшие 20 см на российском побережье.

3.2. Вулканогенные цунами

При оценке опасности цунами в Японском море следует уделять внимание не только сейсмическим, но и вулканическим источникам. Прогноз цунами в результате извержения вулканов представляет большую сложность, так как магнитуда таких событий значительно меньше, чем у цунамигенных землетрясений, а современная служба цунами оценивает опасность каждого

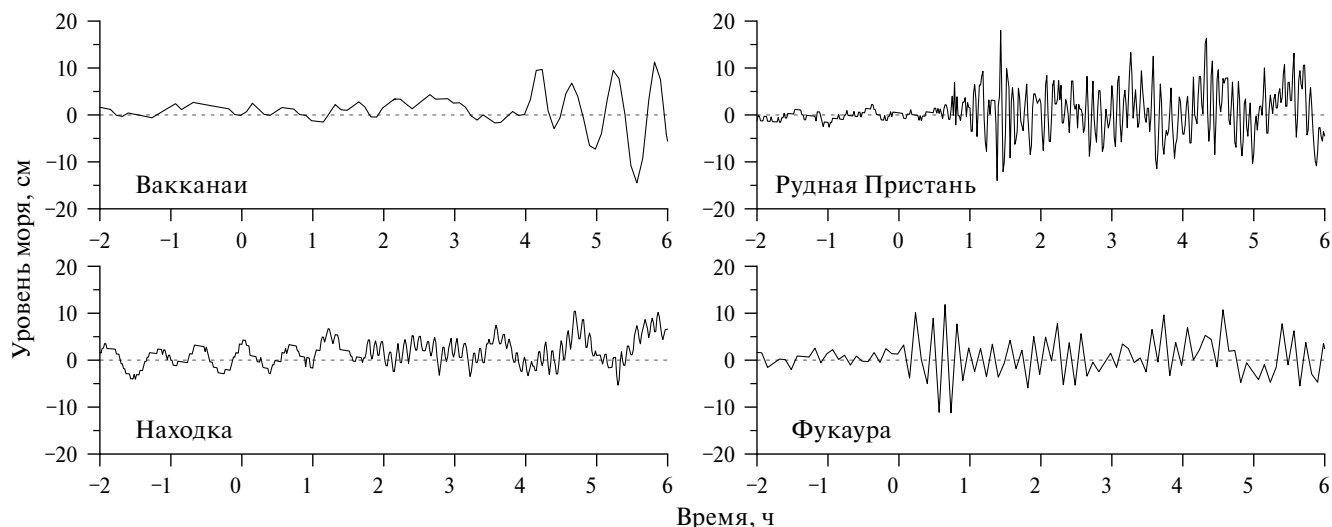


Рис. 10. Мареограммы Тохоку цунами 2011 г. для соответствующих пунктов побережья России и Японии, относительно среднего уровня моря. Время отсчитывается от момента землетрясения.

случая, основываясь прежде всего на магнитуде соответствующего события. Кроме того, образовавшиеся в результате вулканического взрыва волны цунами имеют сложный характер [65]. Даже большое количество близлежащих датчиков не всегда позволяет вовремя выявить возникновение подобных цунами. Примером является извержение подводного вулкана недалеко от Токио 9 октября 2023 г., когда тревога цунами не была объявлена, хотя, как выяснилось, волны цунами образовались и на близлежащих островах превысили 60 см [69].

В бассейне Японского моря находится несколько вулканов, проявлявших активность в голоцене. Примером является вулкан, расположенный на о. Уллындю, в 120 км от Корейского полуострова (рис. 1). Вулканологические и палеоисследования выявили как минимум пять исторических эпизодов извержения данного вулкана [51]. Вероятность извержения вулкана Уллындю нельзя исключать и в будущем.

Самые большие волны цунами в Японском море, вероятно, были вызваны извержением вулкана Осима-Осима в 1741 г., который до этого спал около 1500 лет. Остров располагается к юго-западу от о. Хоккайдо (рис. 1). Период активности вулкана продолжался с 1741 до 1790 гг. Наиболее сильное извержение произошло 18 августа 1741 г. и вызвало разрушительные волны цунами, приведшие к гибели около 1475 человек [49]. Заплески цунами на острове составили 15 м [38, 72], а по некоторым данным достигали даже 34 м⁴ [72]. На побережье Корейского полуострова высоты волн были д 3–4 м [72].

Извержение вулкана

Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15 января 2022 г.

15 января 2022 г. вблизи о-вов Тонга произошло извержение вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай, которое вызвало волны цунами, затронувшие весь Мировой океан. Было установлено, что эти волны имели два основных механизма генерации [41, 55, 85]:

(1) волны, вызванные непосредственно вулканическим взрывом и приходящие из района источника со скоростью длинных океанских волн (~200–220 м/с);

(2) волны, образовавшиеся под воздействием атмосферных волн Лэмба, вызванных извержением (см., например, [26, 54]), распространявшихся со скоростью звука (~315 м/с) и создававших при

движении отклик уровня океана, имевший характер волн цунами (метеоцунами).

Результаты работ [8, 83] показывают, что на побережье Японского моря реализовались оба механизма возбуждения волн цунами, т.е. наблюдались как волны, пришедшие “извне”, так и волны, сформировавшиеся непосредственно в этом море в результате прямого атмосферного воздействия на поверхность моря. Максимальные волны цунами наблюдались на станциях Преображение (34 см), Мукхо (34 см) и Рудная Пристань (44 см).

4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Япономорское цунами 1983 г. и Окуширское цунами 1993 г. были самыми заметными событиями, произошедшими в Японском море с начала XX в. (табл. 2). В частности, землетрясение 12 июля 1993 г. вызвало аномально высокие волны цунами, которые на о. Окушири достигли отметки 31.7 м [52, 75]. Это цунами явилось одним из первых, для которого было проведено тщательное обследование береговой зоны для двух наиболее пострадавших районов: острова Окушири и юго-западного побережья Хоккайдо, — и получены детальные оценки наблюдавшихся заплесков волн цунами (рис. 8а–г). Данное событие стало своеобразным “эталоном” (“*benchmark*”), который используется для проверки качества различных существующих численных моделей расчета цунами [76]. При этом основное внимание в предыдущих работах было уделено Японским островам, в особенности о. Окушири и станциям Эсаси и Иванаи на о. Хоккайдо [73, 80, 81].

Таблица 2. Сильнейшие цунамигенные землетрясения в Японском море и соответствующие максимальные зарегистрированные высоты или наблюдаемые заплески. Указаны координаты эпицентра землетрясения. Высоты заплесков указаны по каталогу В.К. Гусякова [63]

Дата	M_w	Широта (° с.ш.)	Долгота (° в.д.)	Максимальная высота заплеска, м
01.08.1940	7.5	44.561	139.678	5.0
16.06.1964	7.7	38.399	139.290	5.8
05.09.1971	7.3	46.505	141.199	2.0
26.05.1983	7.8	40.462	139.102	14.9
12.07.1993	7.7	42.851	139.197	31.7
02.08.2007	6.2	46.83	141.75	3.2
11.03.2011	9.1	38.297	142.373	0.3*

* В Японском море.

⁴ Профессор Кензи Сатаке [72] отмечает, что данное значение основано на устных преданиях и является ненадежным.

Именно в связи с важностью цунами 1983 и 1993 гг. было проведено их численное моделирование. Для расчета распространения волн цунами использовалась численная гидродинамическая модель [31, 57, 67], схожая с моделью TUNAMI [46]. В модели реализуется конечно-разностная аппроксимация уравнений мелкой воды (без учета вертикального ускорения). При моделировании был использован цифровой массив батиметрии GEBCO 2014 с пространственным шагом 30".

Япономорское цунами 26 мая 1983 г.

В качестве начальных условий использовалась модель источника, предложенная Аидой [24] (рис. 11а), состоящая из двух сегментов. Результаты расчетов показали, что основной поток энергии цунами был направлен на близлежащее побережье о. Хонсю и на Приморский край. Максимальная рассчитанная высота волн составила более 7 м (рис. 11б). Сравнение данных мареографов с результатами моделирования показыва-

ет достаточно хорошее совпадение (рис. 11в), что говорит о соответствии модельного сейсмического источника реальному. В частности, модель верно воспроизводит наблюдавшиеся амплитуды волн цунами. Некоторое несоответствие периодов, видимо, объясняется отсутствием надежных данных о батиметрии в районе рассматриваемых пунктов.

Окуширское цунами 12 июля 1993 г.

Для численного моделирования Окуширского цунами использовалась модель сейсмического источника DCRC-17а, разработанная Такахаши и др. [77]. Необходимо отметить, что данный источник имеет сложный характер, который при моделировании воспроизводится тремя сегментами с различными параметрами (рис. 12а). По результатам моделирования видно, что, как и для землетрясения 1983 г., заметная часть энергии цунами 1993 г. распространялась в сторону Приморского края. В целом, направленность энергии этих двух цунами имеет сходный характер

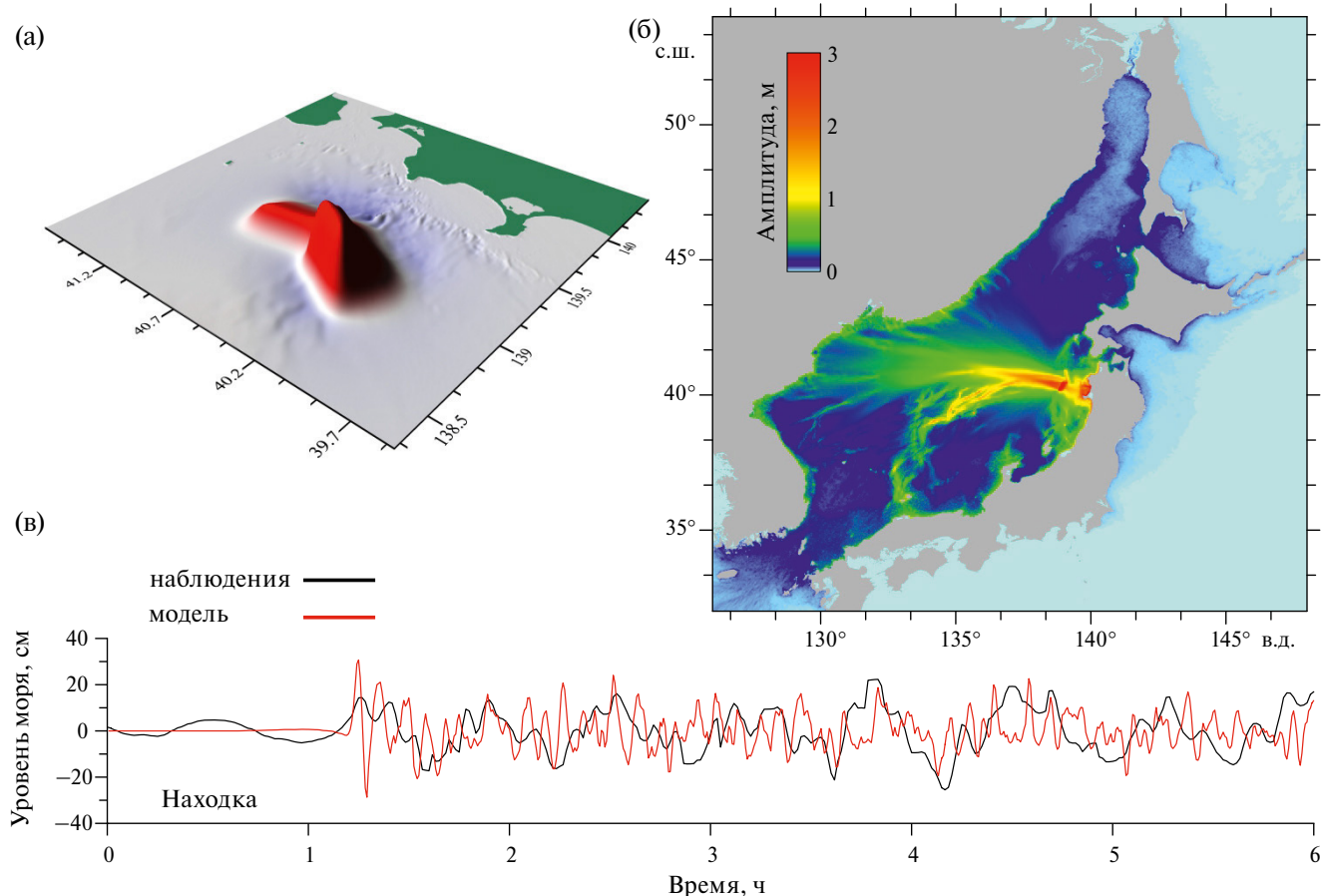


Рис. 11. (а) Деформация дна для Япономорского землетрясения 1983 г. согласно модели И. Аида [24]; (б) карта максимальных амплитуд волн цунами по результатам моделирования; (в) сравнение результатов моделирования (красная линия) и записей мареографов (черная линия) на станции Находка, относительно среднего уровня моря. Время отсчитывается от момента землетрясения.

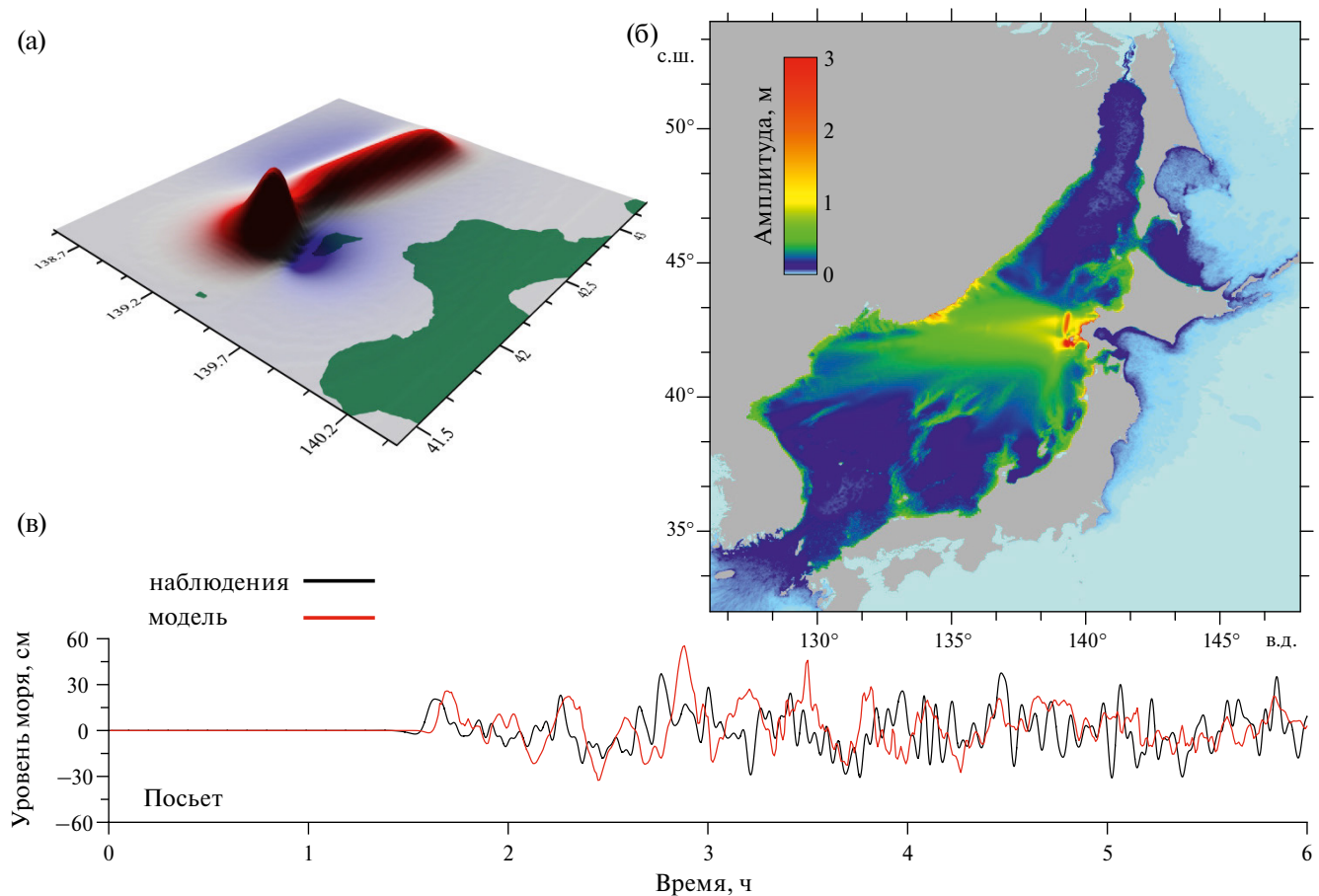


Рис. 12. (а) Деформация дна для Окуширского землетрясения 1993 г. согласно модели DCRC-17a [77]; (б) карта максимальных амплитуд волн цунами по результатам моделирования; (в) сравнение результатов моделирования (красная линия) и записей мареографов (черная линия) на станции Посыет, относительно среднего уровня моря. Время отсчитывается от момента землетрясения.

(рис. 11б и рис. 12б). На побережье России максимальная высота волн цунами составила ~6 м (рис. 12б). Было получено хорошее совпадение амплитуд и фаз зарегистрированных волн и результатов моделирования (рис. 12в). Помимо ближней зоны, высокие волны цунами были зафиксированы на побережьях Приморского края, а также региона Тююку (Япония), что, вероятно, связано с захватом волн возвышенностью Ямато.

5. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Анализ наблюдавшихся волн цунами в Японском море показывает, что это явление представляет серьезную угрозу для прибрежных стран, в частности, для побережья России. За 120 лет (1904–2023 гг.) в Японском море были зарегистрированы шесть сильных цунами с высотами более 2 м. При этом на примере проанализированных событий можно сделать вывод, что цунами, сгенерированные землетрясениями в Японском море, сильнее, чем вызванные субдукционными

землетрясениями в Тихом океане с аналогичным сейсмическим моментом [22, 37, 71]. По мнению Хатори [37], это объясняется особенностями соответствующих сейсмогенерирующих разломов. Для Японского моря, по сравнению с Тихим океаном, характерен больший угол падения, а так как цунами преимущественно генерируется вертикальными смещениями дна, Японское море является более “эффективным” для образования цунами [48]. В работе [22] автор говорит об отличии в модуле сдвига: в Японском море преобладают землетрясения с меньшей глубиной гипоцентра (до 30 км), а значит, и с меньшим модулем сдвига, чем в Тихом океане. Для соответствующих сейсмических моментов величина смещения площадки разлома становится больше, что, согласно формуле:

$$M_0 = \mu \bar{D} S, \quad (2)$$

где M_0 – сейсмический момент, μ – модуль сдвига, $\bar{D}$ – смещение площадки разлома, S – площадь разлома, приводит к увеличению вертикальных смещений.

На величину смещения площадки разлома также влияют пространственные параметры очага. В Японском море величина площадки в среднем в 1.5 раза больше, чем в Тихом океане, что обусловлено более вытянутой формой очага. Для этого региона соотношение длины площадки к ее ширине $L/W = 3$, в то время как в Тихом океане, в среднем, $L/W = 2$ [71].

Одно из сильнейших исторических цунами в Японском море было вызвано землетрясением 7 декабря 1833 г. примерно в 14:00 UTC (1833 *Shonai-oki earthquake*). Очаг землетрясения располагался на северо-востоке от о. Садо. Магнитуда M_w была около 8.0 [25, 29, 39, 78]. В результате цунами погибло около 150 человек, а также было разрушено 475 домов в поселке Шонай [39]. В префектуре Ниигата высота волн была 9 м, также волны достигли и побережья о. Хоккайдо [15, 40]. По результатам исследований отложений цунами волны достигли и побережья Приморского края: на о. Русский высота заплеска превысила 1 м [2].

Определенную угрозу для акватории Японского моря представляют также и вулканические цунами. При этом волны цунами могут быть вызваны извержениями вулканов, расположенных как непосредственно в этом море (Уллындо, Осима), так и на близлежащих островах, примыкающих к этому морю. Так, в 1792 г. на юго-западном побережье о. Кюсю, на входе в Японское море, произошло извержение вулкана Ундзен-Маюяма (рис. 1); в результате извержения и сопутствующего оползня образовалась катастрофическая волна цунами: максимальная высота заплеска достигла 57 м, общее число жертв превысило 15 тыс. человек [43, 82]. Через Корейский пролив цунами зашло в Японское море и затронуло южную часть о. Хонсю.

Катастрофические извержения вулканов Осима-Осима (1741 г.) и Ундзен (1792 г.), так же как и недавние события в других районах Мирового океана (Анак-Кракатау — 2018 г. и Тонга — 2022 г.), показывают опасность, которую представляют подобные извержения и связанные с ними цунами.

Помимо вулканических, еще одним видом опасных несейсмических волн цунами являются метеоцунами [58]. В акватории Японского моря метеоцунами могут образовываться при прохождении тайфунов, атмосферных фронтов, шквальных ветров и других видов атмосферных возмущений. Так, тайфуны Майсак и Хайшен в сентябре 2020 г., кроме низкочастотного штормового нагона, вызвали также интенсивные высокочастот-

ные сейши (типа “метеоцунами»), наблюдавшиеся в отдельных портах Японского моря [14, 56]. Особую опасность представляет суперпозиция различных волновых процессов, в частности, совпадение пика штормового нагона, полной воды прилива и интенсивных высокочастотных флуктуаций уровня моря. На юго-западном побережье Японии регулярно наблюдаются катастрофические метеоцунами, известные под местным названием “абики» [42]. Высота этих волн в порту Нагасаки может достигать 5 м [58]. Возникновение этого явления обусловлено подходом к побережью Японии длинных волн, вызванных атмосферными процессами в Восточно-Китайском море и усиленных в результате резонанса Праудмена [58]. Значительное возрастание высот подходящих волн происходит на западном шельфе о. Кюсю (Япония), а их дальнейшее усиление — как при резонансном совпадении собственных частот колебаний бухт и частот барических возмущений («бухтовый» резонанс, см., например, [58]). Аналогичное явление, хотя и менее сильное, наблюдается в ряде портов российского побережья Японского моря, например, в порту Холмска, о. Сахалин [18].

Благодарности. Авторы благодарят Д.С. Выдрина, О.И. Яковенко, В.М. Кайстренко и В.К. Гусякова за ценные советы и полезную информацию о волнах цунами в Японском море, а также П.Д. Ковалева за предоставленные дополнительные данные наблюдений.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках Госзадания ИО РАН FMWE-2024-0018 и при поддержке гранта РНФ № 24-17-00313.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виктор Андреевич Ярмолук (к 90-летию со дня рождения) // Тихоокеанская геология. 2005. Т. 24. № 2. С. 111–112.
2. Ганзей Л.А., Разжигиева Н.Г., Гребенникова Т.А. и др. Проявление исторических цунами на о. Русский, Японское море // Успехи современного естествознания. 2016. № 5. С. 116–124.
3. Го Ч.Н., Иващенко А.И., Симонов К.В., Соловьев С.Л. Проявления Япономорского цунами 26 мая 1983 года на побережье СССР // Накат цунами на берег. Горький: ИПФ АН СССР, 1985. С. 171–180.
4. Го Ч.Н., Леонидова Н.И., Леонов Н.Н. Некоторые данные о цунами 1 августа 1940 г. в Японском море // Волны цунами. Южно-Сахалинск: СахКНИИ, 1972. С. 279–283.
5. Горбунова Г.В., Диденко Г.В., Дьяченко В.Д. и др. Обследование проявления цунами 12–13 июля 1993 года на побережье Приморского края //

- Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. Т. 8. С. 7–28.
6. Коновалов А.В., Нагорных Т.В., Сафонов Д.А., Ломтев В.Л. Невельские землетрясения 2 августа 2007 г. и сейсмическая обстановка на юго-западной окраине о. Сахалин // Тихоокеанская геология. 2015. Т. 34. № 6. С. 57–73.
 7. Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Чой Б.Х., Ли Д.С. Сравнительная оценка цунамиопасности япономорского побережья России на основе численного моделирования // Океанология. 2004. Т. 44. № 2. С. 179–188.
 8. Медведев И.П., Ивельская Т.Н., Рабинович А.Б. и др. Наблюдение волн цунами на тихоокеанском побережье России, возникших при извержении вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15 января 2022 года // Океанология. 2024. Т. 64. № 2. С. 163–180.
 9. Невельское землетрясение и цунами 2 августа 2007 года, о.Сахалин / под ред. Б.В. Левина и И.Н. Тихонова. М.: Янус-К, 2009. 204 с.
 10. Нечаев Г.В., Шестаков Н.В. Актуальность использования ГНСС-технологий для целей раннего предупреждения о цунами в Японском море // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. 2017. С. 226–230.
 11. Полякова А.М. Цунами в Приморье 26 мая 1983 года и его последствия // Владивосток: ТОИ ДВНЦ, 1988. 40 с.
 12. Поплавский А.А., Поплавская Л.Н., Нагорных Т.В. и др. Сейсмотектонические условия возникновения очагов цунами в северной части Японского моря и Окуширское цунамигенное землетрясение 12 июля 1993 года // Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. 1997. Т. 8. С. 29–44.
 13. Святловский А.Е. Цунами. Разрушительные волны, возникающие при подводных землетрясениях в морях и океанах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 55 с.
 14. Смирнова Д.А., Медведев И.П. Экстремальные колебания уровня Японского моря, вызванные прохождением тайфунов Майсак и Хайшен в сентябре 2020 г. // Океанология. 2023. Т. 63. № 5. С. 718–732.
<https://doi.org/10.31857/S0030157423050179>
 15. Соловьев С.Л., Го Ч.Н. Каталог цунами на западном побережье Тихого океана. М.: Наука, 1974. 309 с.
 16. Соловьев С.Л., Милитеев А.Н. Проявление Ниигатского цунами 1964 г. на побережье СССР и некоторые данные об источнике // Проблема цунами. Вопросы образования и распространения морских разрушительных волн от землетрясений и их оперативный прогноз. М.: Наука, 1968. С. 213–231.
 17. Соловьев С.Л., Ферчев М.Д. Сводка данных о цунами в СССР // Бюлл. Совета сейсмологии АН СССР. 1961. № 9. С. 23–55.
 18. Шевченко Г.В., Ивельская Т.Н. Цунами и другие опасные морские явления в портах Дальневосточного региона России (по инструментальным измерениям). Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2013. 44 с.
 19. Щетников Н.А. Цунами, вызванное Монеронским землетрясением 1971 г. // Изучение цунами в открытом океане. М.: Наука, 1978. С. 137–144.
 20. Щетников Н.А. Цунами. М.: Наука, 1981. 88 с.
 21. Abe Ka. Re-examination of the fault model for the Niigata earthquake of 1964 // Journal of Physics of the Earth. 1975. V. 23. № 4. P. 349–366.
<https://doi.org/10.4294/jpe1952.23.349>
 22. Abe Ka. Quantification of major earthquake tsunamis of the Japan Sea // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1985. V. 38. № 4. P. 214–223.
[https://doi.org/10.1016/0031-9201\(85\)90069-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(85)90069-X)
 23. Abe Ku, Ishii H. Distribution of maximum water levels due to the Japan Sea tsunami on 26 May 1983 // Journal of the Oceanographical Society of Japan. 1987. V. 43. P. 169–182. <https://doi.org/10.1007/BF02109217>
 24. Aida I. A source model of the tsunami accompanying the 1983 Nihonkai-Chubu earthquake // Bulletin of the Earthquake Research Institute, Univ. Tokyo. 1984. V. 59. P. 93–104.
 25. Aida I. Numerical experiments related to the 1833 Shonai-oki earthquake tsunami / In: Hagiwara T. (ed.) Paleo Earthquakes Continued (Zoku-Kojishin). Tokyo, Univ. Tokyo Press, 1989. P. 204–214.
 26. Amores A., Monserrat S., Marcos M. et al. Numerical simulation of atmospheric Lamb waves generated by the 2022 Hunga-Tonga volcanic eruption // Geophysical Research Letters. 2022. V. 49(6). e2022GL098240.
<https://doi.org/10.1029/2022GL098240>
 27. Bhattacharya S., Tokimatsu K., Goda K. et al. Collapse of Showa Bridge during 1964 Niigata earthquake: A quantitative reappraisal on the failure mechanisms // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2014. V. 65. P. 55–71.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.05.004>
 28. Chung J.Y., Go C.N., Kaistrenko V.M. Tsunami hazard estimation for eastern Korean coast // Tsunami '93, Proceedings of the IUGG/IOC International Tsunami Symposium, Wakayama, Japan, 23–27 August 1993. 1993. P. 409–422.
 29. Daicho A., Hagiwara T. The 1833 Shonai-oki earthquake: A new aspect of buried historical documents / Hagiwara T. (ed.) Paleo Earthquakes Continued (Zoku-Kojishin). Tokyo, Univ. Tokyo Press, 1989. P. 165–203.
 30. Di Giacomo D., Engdahl E.R., Storchak D.A. The ISC-GEM earthquake catalogue (1904–2014): Status after the extension project // Earth System Science Data. 2018. V. 10. № 4. P. 1877–1899.
<https://doi.org/10.5194/essd-10-1877-2018>
 31. Fine I.V., Kulikov E.A., Cherniawsky J.Y. Japan's 2011 tsunami: Characteristics of wave propagation from

- observations and numerical modelling // *Pure and Applied Geophysics*. 2013. V. 170. P. 1295–1307.
<https://doi.org/10.1007/s00024-012-0555-8>
32. *Fukao Y., Furumoto M.* Mechanism of large earthquakes along the eastern margin of the Japan Sea // *Tectonophysics*. 1975. V. 26. № 3–4. P. 247–266.
[https://doi.org/10.1016/0040-1951\(75\)90093-1](https://doi.org/10.1016/0040-1951(75)90093-1)
 33. *Gusiakov V.K.* Global occurrence of large tsunamis and tsunami-like waves within the last 120 years (1900–2019) // *Pure and Applied Geophysics*. 2020. V. 177. № 3. P. 1261–1266.
<https://doi.org/10.1007/s00024-020-02437-9>
 34. *Gutenberg B., Richter C.F.* Frequency of earthquakes in California // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1944. V. 34. № 4. P. 185–188.
 35. *Hatori T.* On the tsunami which accompanied the Niigata earthquake of June 16, 1964. Source deformation, propagation and tsunami run-up // *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*. 1965. V. 43. P. 129–148.
 36. *Hatori T.* A study of the wave source of tsunami generated off West Hokkaido on Aug. 2, 1940 // *Bulletin of the Earthquake Research Institute, Univ. Tokyo*. 1969. V. 47. P. 1063–1072.
 37. *Hatori T.* The tsunami associated with an aftershock of the 1983 Nihonkai-Chubu earthquake, and the source mechanism of the main tsunami // *Bulletin of the Earthquake Research Institute, Univ. Tokyo*. 1984. V. 59. P. 105–113.
 38. *Hatori T.* Reexamination of wave behavior of the Hokkaido-Oshima (the Japan Sea) tsunami in 1741 – their comparison with the 1983 Nihonkai-Chubu tsunami // *Bulletin of the Earthquake Research Institute, Univ. Tokyo*. 1984. V. 59. P. 115–125.
 39. *Hatori T.* Magnitudes of the 1833 Yamagata-Oki Earthquake in the Japan Sea and its tsunami // *Zisin*. 1990. V. 43. P. 227–232.
 40. *Hatori T., Katayama M.* Tsunami behavior and source areas of historical tsunamis in the Japan Sea // *Bulletin of the Earthquake Research Institute, Univ. Toyo*. 1977. V. 52. P. 49–70.
 41. *Heidarzadeh M., Gusman A.R., Ishibe T. et al.* Estimating the eruption-induced water displacement source of the 15 January 2022 Tonga volcanic tsunami from tsunami spectra and numerical modelling // *Ocean Engineering*. 2022. V. 261. P. 112165.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112165>
 42. *Hibiya T., Kajiura K.* Origin of the Abiki phenomenon (a kind of seiche) in Nagasaki Bay // *Journal of the Oceanographical Society of Japan*. 1982. V. 38. P. 172–182.
<https://doi.org/10.1007/BF02110288>
 43. *Higaki D., Hirota K., Dang K. et al.* Landslides and countermeasures in western Japan: historical largest landslide in Unzen and earthquake-induced landslides in Aso, and rain-induced landslides in Hiroshima // In: *Progress in Landslide Research and Technology*. 2022. V. 1. № 2. Cham: Springer International Publishing, 2023. P. 287–307.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-18471-0_22
 44. *Iida K.* Catalog of tsunamis in Japan and its neighboring countries // *Bulletin of Aichi Institute of Technology, Special Rep.* 1984. P. 1–52.
 45. *Imamura A.* On the Destructive Tango Earthquake of March 7, 1927 // *Bulletin of the Earthquake Research Institute, Tokyo Imperial University*. 1928. V. 4. P. 179–202.
 46. *Imamura F.* Review of tsunami simulation with a finite difference method // In: *Long-Wave Runup Models.* / Eds. Yeh H. et al. World Scientific Publ., Singapore, 1996. P. 25–42.
 47. *Kaistrenko V.M., Razjigaeva N.G., Ganzey L.A. et al.* The manifestation of tsunami of August 1, 1940 in the Kamenka settlement, Primorye (new data concerning the old tsunami) // *Geosystems of Transition Zones*. 2019. V. 3. № 4. P. 417–422.
 48. *Kajiura K.* Tsunami energy in relation to parameters of the earthquake fault model // *Bulletin of the Earthquake Research Institute, Univ. Tokyo*. 1981. V. 56. P. 415–440.
 49. *Katsui Y., Yamamoto M.* The 1741–1742 activity of Oshima-Ōshima Volcano, north Japan // *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University*. 1981. V. 19. № 4. P. 527–536.
 50. *Kawasumi H.* General report on the Niigata Earthquake of 1964. Tokyo, Japan: Electrical Engineering College Press. 1968. 550 p.
 51. *Kim G.B., Cronin S.J., Yoon W.S., Sohn Y.K.* Post 19 ka BP eruptive history of Ulleung Island, Korea, inferred from an intra-caldera pyroclastic sequence // *Bulletin of Volcanology*. 2014. V. 76. P. 1–26.
<https://doi.org/10.1007/s00445-014-0802-1>
 52. *Kim K.O., Kim D.C., Choi B.H. et al.* The role of diffraction effects in extreme run-up inundation at Okushiri Island due to 1993 tsunami // *Natural Hazards and Earth System Science*. 2015. V. 15. № 4. P. 747–755.
 53. *Kubota T., Saito T., Nishida K.* Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb waves on the 2022 Tonga eruption // *Science*. 2022. V. 377. P. 91–94.
<https://doi.org/10.1126/science.abo4364>
 54. *Kulichkov S.N., Chunchuzov I.P., Popov O.E. et al.* Acoustic-gravity Lamb waves from the eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Hapai Volcano, its energy release and impact on aerosol concentrations and tsunami // *Pure and Applied Geophysics*. 2022. V. 179. P. 1533–1548.
<https://doi.org/10.1007/s00024-022-03046-4>
 55. *Lynett P., McCann M., Zhou Z. et al.* Diverse tsunami-genealogy triggered by the Hunga Tonga-Hunga Ha’apai eruption // *Nature*. 2022. V. 609(7928). P. 728–733.
<https://doi.org/10.1038/s41586-022-05170-6>
 56. *Medvedev I.P., Rabinovich A.B., Šepić J.* Destructive coastal sea level oscillations generated by Typhoon

- Maysak in the Sea of Japan in September 2020 // Scientific Reports. 2022. V. 12. № 1. P. 1–12.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-12189-2>
57. *Medvedeva A., Medvedev I., Fine I. et al.* Local and trans-oceanic tsunamis in the Bering and Chukchi seas based on numerical modeling // Pure and Applied Geophysics. 2023. V. 180. P. 1639–1659.
<https://doi.org/10.1007/s00024-023-03251-9>
 58. *Monserat S., Vilibić I., Rabinovich A.B.* Meteotsunamis: atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2006. V. 6. № 6. P. 1035–1051.
<https://doi.org/10.5194/nhess-6-1035-2006>
 59. *Mori N., Takahashi T., Yasuda T., Yanagisawa H.* Survey of 2011 Tohoku earthquake tsunami inundation and run-up // Geophysical Research Letters. 2011. V. 38. L00G14.
<https://doi.org/10.1029/2011GL049210>
 60. *Murotani S., Iwai M., Satake K. et al.* Tsunami forerunner of the 2011 Tohoku Earthquake observed in the Sea of Japan // Pure and Applied Geophysics. 2015. V. 172. P. 683–697.
<https://doi.org/10.1007/s00024-014-1006-5>
 61. *Murotani S., Satake K., Ishibe T., Harada T.* Reexamination of tsunami source models for the twentieth century earthquakes off Hokkaido and Tohoku along the eastern margin of the Sea of Japan // Earth, Planets and Space. 2022. V. 74. P. 52.
<https://doi.org/10.1186/s40623-022-01607-4>
 62. National Geophysical Data Center / World Data Service: NCEI/WDS Global Historical Tsunami Database. NOAA National Centers for Environmental Information.
<https://doi.org/10.7289/V5PN93H7>
 63. NTL/ICMMG SD RAS. 2024. Novosibirsk Tsunami Laboratory of the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of Siberian Division of Russian Academy of Sciences. Global Tsunami Database, 2100 BC to Present,
<https://tsun.sccc.ru/nh/tsunami.php>
 64. *Oh I.S., Rabinovich A.B.* Manifestation of Hokkaido Southwest (Okushiri) tsunami, 12 July, 1993, at the coast of Korea // Science of Tsunami Hazards. 1994. V. 12. P. 93–116.
 65. *Paris R., Switzer A.D., Belousova M. et al.* Volcanic tsunami: A review of source mechanisms, past events and hazards in Southeast Asia (Indonesia, Philippines, Papua New Guinea) // Natural Hazards. 2014. V. 70. P. 447–470.
<https://doi.org/10.1007/s11069-013-0822-8>
 66. *Rabinovich A.B., Candella R.N., Thomson R.E.* The open ocean energy decay of three recent trans-Pacific tsunamis // Geophysical Research Letters. 2013. V. 40. № 12. P. 3157–3162.
<https://doi.org/10.1002/grl.50625>
 67. *Rabinovich A.B., Lobkovsky L.I., Fine I.V. et al.* Near-source observations and modeling of the Kuril Islands tsunamis of 15 November 2006 and 13 January 2007 // Advances in Geosciences. 2008. V. 14. P. 105–116.
<https://doi.org/10.5194/adgeo-14-105-2008>
 68. *Saito T., Ito Y., Inazu D., Hino R.* Tsunami source of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, Japan: Inversion analysis based on dispersive tsunami simulations // Geophysical Research Letters. 2011. V. 38. L00G19.
<https://doi.org/10.1029/2011GL049089>
 69. *Sandanbata O., Satake K., Takemura S. et al.* Enigmatic tsunami waves amplified by repetitive source events near Sofugan volcano, Japan // Geophysical Research Letters. 2024. V. 51. № 2. P. e2023GL106949.
<https://doi.org/10.1029/2023GL106949>
 70. *Satake K.* The mechanism of the 1983 Japan Sea earthquake as inferred from long-period surface waves and tsunamis // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1985. V. 37. № 4. P. 249–260.
[https://doi.org/10.1016/0031-9201\(85\)90012-3](https://doi.org/10.1016/0031-9201(85)90012-3)
 71. *Satake K.* Re-examination of the 1940 Shakotan-oki earthquake and the fault parameters of the earthquakes along the eastern margin of the Japan Sea // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1986. V. 43. № 2. P. 137–147.
[https://doi.org/10.1016/0031-9201\(86\)90081-6](https://doi.org/10.1016/0031-9201(86)90081-6)
 72. *Satake K.* Volcanic origin of the 1741 Oshima-Oshima tsunami in the Japan Sea // Earth, Planets and Space. 2007. V. 59. P. 381–390.
<https://doi.org/10.1186/BF03352698>
 73. *Satake K., Tanioka Y.* Tsunami generation of the 1993 Hokkaido Nansei-Oki earthquake // Pure and Applied Geophysics. 1995. V. 144. P. 803–821.
<https://doi.org/10.1007/BF00874395>
 74. *Shuto N.* Tsunami caused by the Japan Sea earthquake of 1983 // Disasters. 1983. V. 7. № 4. P. 255–258.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.1983.tb00832.x>
 75. *Shuto N., Matsutomi H.* Field survey of the 1993 Hokkaido Nansei-Oki earthquake tsunami // Pure and Applied Geophysics. 1995. V. 144. P. 649–663.
<https://doi.org/10.1007/BF00874388>
 76. *Synolakis C.E., Bernard E.N., Titov V.V. et al.* Standards, criteria, and procedures for NOAA evaluation of tsunami numerical models // NOAA Technical Memorandum OAR PMEL-135. 2007. P. 1–55.
 77. *Takahashi To, Takahashi Ta, Shuto N. et al.* Source models for the 1993 Hokkaido Nansei-Oki earthquake tsunami // Pure and Applied Geophysics. 1995. V. 144. P. 747–767.
<https://doi.org/10.1007/BF00874393>
 78. *Takashimizu Y., Kawakami G., Urabe A.* Tsunamis caused by offshore active faults and their deposits // Earth Science Reviews. 2020. V. 211. P. 103380.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103380>
 79. *Tang L., Titov V.V., Bernard E.N. et al.* Direct energy estimation of the 2011 Japan tsunami using deep-ocean pressure measurements // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2012. V. 117. C08008.
<https://doi.org/10.1029/2011JC007635>

80. Titov V.V., Synolakis C.E. Extreme inundation flows during the Hokkaido-Nansei-Oki tsunami // *Geophysical Research Letters*. 1997. V. 24. № 11. P. 1315–1318. <https://doi.org/10.1029/97GL01128>
81. Titov V.V., Synolakis C.E. Numerical modeling of tidal wave runup // *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 1998. V. 124. № 4. P. 157–171. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1998\)124:4\(157\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1998)124:4(157))
82. Tsuji Y., Murakami Y. Inundation height of the 1792 Mayuyama landslide tsunami in the Shimabara Peninsula side // *Historical Earthquake*. 1997. № 13. P. 135–197.
83. Tsukanova E., Medvedev I. The observations of the 2022 Tonga-Hunga tsunami waves in the Sea of Japan // *Pure and Applied Geophysics*. 2022. V. 179. № 12. P. 4279–4299. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03191-w>
84. Wang R., Parolai S., Ge M. et al. The 2011 M_w 9.0 Tohoku earthquake: Comparison of GPS and strong-motion data // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2013. V. 103. № 2B. P. 1336–1347. <https://doi.org/10.1785/0120110264>
85. Zaytsev O., Rabinovich A.B., Thomson R.E. The 2022 Tonga tsunami on the Pacific and Atlantic coasts of the Americas // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2024. V. 129, e2024JC020926. <https://doi.org/10.1029/2024JC020926>

MAJOR TSUNAMIS IN THE SEA OF JAPAN BASED ON INSTRUMENTAL OBSERVATIONS

E. S. Tsukanova*, A. B. Rabinovich, I. P. Medvedev, A. Yu. Medvedeva

*e-mail: tsukanovaelizaveta@gmail.com

The Sea of Japan is a seismically active zone that is under high risk from tsunami waves. The destructive tsunamis that occur in this region can cause severe damage and loss of life. An overview of the most important tsunami events observed in this region in 20–21 centuries is presented. Eight events in the Sea of Japan were selected for consideration, including one volcanogenic tsunami: 1940 (M_w 7.5), 1964 (M_w 7.5–7.7), 1971 (M_w 7.3), 1983 (M_w 7.7–7.8), 1993 (M_w 7.7), 2007 (M_w 6.2), 2011 (M_w 9.0–9.1) and 2022 (volcanogenic). Particular attention was paid to the tsunamis of 1983 and 1993. Numerical simulations of the tsunami waves arising from these two events were compared to the corresponding waveforms derived from actual tide gauge records. Of the eight tsunami events examined, the 2011 Tohoku and 2022 Tonga events had external sources located outside of the Sea of Japan but generated tsunamis directly within the sea: (1) The 2011 Tohoku earthquake had its source area in the Pacific Ocean east of Japan, but caused a horizontal displacement of the Japanese islands, which, in turn, created tsunami waves westward from these islands; (2) The Hunga–Tonga–Hunga–Ha’apai volcanic eruption in the central Pacific produced strong atmospheric Lamb waves that induced tsunami waves upon arrival in the Sea of Japan.

Keywords: Sea of Japan, tsunami, earthquake, volcanic eruption, meteotsunami, numerical modelling