

ТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА

УДК 550.345

ЦУНАМИ НА ДАЛЬНЕВОСТОЧНОМ ПОБЕРЕЖЬЕ РОССИИ:
ИСТОРИЧЕСКАЯ ПЕРСПЕКТИВА И СОВРЕМЕННАЯ ПРОБЛЕМАТИКА

В.К. Гусяков

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 6, Россия*

Институт вычислительных технологий СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 6, Россия

В Российской Федерации угрозе цунами подвержено в первую очередь Курило-Камчатское побережье, а также побережья Японского, Охотского и Берингова морей. Хотя цунами и цунамиподобные явления известны на Черном, Каспийском, Балтийском и Белом морях, а также на крупных внутренних водоемах (Байкал, Ладога и др.), их повторяемость, пространственные и энергетические масштабы несравнимы с дальневосточными цунами. Исторический каталог цунами для Дальневосточного региона включает в себя 110 цунамигенных событий, наблюдавшихся там с 1737 г. по настоящее время, 105 из которых были вызваны региональными источниками и 5 удаленными очагами. Среди 110 зарегистрированных цунами 95 имели сейсмогенный механизм генерации, 3 — вулканогенный, 2 — оползневый, 3 — были обусловлены метеорологическими причинами, в двух случаях природа источника осталась неизвестной. Всего за этот период наблюдалось 11 разрушительных цунами с высотами на берегу более 10 м, среди них было два мегацунами с высотами более 20 м (в 1737 и 1952 гг.), еще в 15 случаях цунами было опасным (высоты в диапазоне более 2.5—10 м), в 13 случаях наблюдаемые высоты волн находились в пределах приливных колебаний (порядка 1—2 м), в остальных случаях цунами было слабым и наблюдалось только на приборных записях. Таким образом, повторяемость разрушительных цунами у дальневосточных берегов РФ составляет в среднем 1 раз в 25 лет, опасных — 1 раз в 10—15 лет, слабые цунами наблюдаются практически ежегодно (по статистике за последние 60 лет, когда в регионе начала создаваться сеть мареографных станций). В работе анализируется полнота и степень достоверности исторических данных о проявлениях цунами на Дальневосточном побережье, распределение цунамигенных событий по географическим зонам и по типам источников, зависимость интенсивности цунами от магнитуды подводного землетрясения, даются оценки общей повторяемости цунами Дальневосточного региона. Обсуждаются проблемы оперативного прогноза цунами и предварительного цунамирайонирования побережья.

Природные катастрофы, очаги землетрясений, сейсмотектоника, цунами, цунамиопасность, цунамирайонирование.

TSUNAMIS ON THE RUSSIAN PACIFIC COAST: HISTORY AND CURRENT SITUATION

V.K. Gusiakov

The Pacific coast, including the Kamchatka Peninsula, the Kuriles, the Sea of Japan, the Sea of Okhotsk, and the Bering Sea, is the main tsunami-prone area in Russia. The Far East tsunamis are much more frequent, extensive, and devastating than those in the Black, Caspian, Baltic, and White Sea coasts, as well as in major inland lakes Baikal, Ladoga, etc. The tsunami catalog of the Russian Far East from 1737 to present lists 110 events with mainly near-field and few far-field sources (105 and 5 events, respectively). Most of the catalogued tsunamis (95 cases) were induced by earthquakes, and few events had volcanic (3), landsliding (2), meteorological (3), and unknown (2) triggers. Altogether there were eleven devastating tsunamis for the period of observations, with >10 m heights, two of which were great events in 1737 and 1952, when the waves exceeded 20 m. The wave heights were in the range 2.5–10 m in fifteen hazardous tsunami events and within the tidal range (~1–2 m) in thirteen cases; the other events were small and detectable only instrumentally. Thus, the average recurrence times for tsunamis of different magnitudes in the Russian Pacific coast are 25 years for devastating events and 10–15 years for hazardous tsunamis; small tsunamis occur almost every year, according to statistics for the last sixty years collected at the regional network of tide stations. The topics discussed in the paper concern the completeness and reliability of the Far East catalog; distribution of tsunami events in space and time; correlation between the intensity of tsunami and the magnitude of the causative undersea earthquake; tsunami recurrence; tsunami warning; and long-term hazard assessment and mapping.

Natural disaster, earthquake, seismotectonics, tsunami, tsunami hazard, tsunami risk mapping

ВВЕДЕНИЕ

Проблема оценки цунамиопасности подводных землетрясений является одной из важных практических задач сейсмологических исследований в Дальневосточном регионе, в котором сильнейшие (с магнитудой до 9.0) землетрясения происходят на островодужном склоне Курило-Камчатской сейсмогенной зоны и часто сопровождаются возникновением волн цунами. По числу жертв и суммарному ущербу цунами находятся на четвертом месте в ряду стихийных бедствий и катастроф, после землетрясений, наводнений и тайфунов. В мировой статистике жертв природных катастроф в XX столетии, унесших более 4 миллионов жизней [Tópics 2000, 2001], доля цунами была относительно невелика и составляла чуть более 1 %. Индонезийская катастрофа 2004 г., унесшая более 227 тыс. жизней [NGDC/WDS GHTDB, 2015], сразу вывела цунами в статистике жертв природных катастроф XXI в. на первое место.

Ущерб, наносимый цунами, усиливается их полной внезапностью, быстротечностью, тяжелыми разрушениями и высокой вероятностью фатальных исходов среди людей, оказавшихся в зоне воздействия этих волн. Проблема эффективной защиты от этого стихийного бедствия осложняется редкостью его проявления на отдельном участке побережья. Даже в наиболее цунамиактивных районах Тихого океана (таких как Япония, Чили, Перу) сильные цунами с жертвами среди населения происходят раз в 30—50 лет, катастрофические — раз в 100—150 лет. Эти периоды намного превышают повторяемость, например, ураганов и наводнений и сопоставимы с периодами повторяемости землетрясений и вулканических извержений. Благодаря особенностям механизма возникновения, а также ввиду наличия постоянных возмущений уровня моря, обусловленных ветровым волнением, штормами и приливами, цунами обладают некоторым естественным порогом (по высоте), ниже которого они практически ненаблюдаемы, а выше него сразу становятся опасными. Отчасти поэтому при возникновении этого стихийного бедствия степень готовности населения к нему оказывается недопустимо низкой.

В Российской Федерации угрозе цунами подвержено в первую очередь Дальневосточное побережье, включая побережье Японского, Охотского и Берингова морей. Цунами и цунамиподобные явления известны на Черном, Каспийском, Балтийском и Белом морях, а также на крупных внутренних водоемах (Байкал, Ладога и др.). Первый и достаточно подробный анализ проблематики цунами и ее значения для нашей страны был дан в работе С.Л. Соловьева [Соловьев, 1968], в которой были обобщены сведения об известных на тот момент проявлениях цунами на Курило-Камчатском побережье и дан достаточно полный обзор существовавших тогда представлений о физической природе этого опасного природного явления. В статье С.Л. Соловьева приведена таблица с данными об основных параметрах 39 исторических цунами, наблюдавшихся на побережье Камчатки и Курильских островов с 1737 по 1965 гг., рассмотрены возможные механизмы возбуждения цунами и основные математические модели, используемые для расчетов распространения в океане и наката на берег. В заключительной части этой работы проанализированы возможные пути решения двух главных научно-практических задач проблемы цунами — оперативного прогноза и предварительного цунамирайонирования побережья.

В отношении первой задачи указывалось, что одним из наиболее надежных путей повышения достоверности прогнозов является использование донных датчиков уровня океана, установленных на краю шельфа вблизи наиболее важных защищаемых береговых пунктов. По такому пути сейчас фактически идут Япония, Индия, Чили и другие страны, устанавливая кабельные и автономные донные датчики уровня вблизи своего побережья [Rabinovich, Eble, 2015]. В отношении второй задачи была в общих чертах описана методика вероятностного сейсмотектонического подхода к прогнозу цунамиопасности, к сожалению, не реализованная до сих пор в России. Спустя почти 40 лет фактически те же идеи были положены в основу методики РТНА (Probabilistic Tsunami Hazard Assessment), широко используемой сейчас в таких странах, как США, Канада, Австралия, Новая Зеландия, для создания обзорных и детальных карт цунамиопасности [Power, Downes, 2009; Gonzales et al., 2009; Power et al., 2011; Leonard et al., 2014; Knighton, Bastidas, 2015].

Эта статья С.Л. Соловьева, до сих пор сохраняющая свою актуальность, является одной из наиболее цитируемых русскоязычных работ по проблеме цунами. Однако со времени ее написания прошло уже почти полвека, в течение которого в Мировом океане произошло 430 новых цунамигенных событий, степень изученности и полнота данных по которым несравнимы с аналогичными показателями для событий прошлых лет. Дальневосточный каталог цунами практически удвоился как за счет новых, происшедших после 1968 г. региональных событий (около 45), так и за счет пополнения его исторической части новыми данными о проявлениях цунами XVIII и XIX веков, обнаруженными в архивах и в различных, неизвестных ранее публикациях. Объем знаний о природе цунами, механизмах их возбуждения, распространения и набега на берег значительно вырос вместе с объемом фактических данных о проявлениях цунами вблизи Дальневосточного побережья РФ. Все это требует нового обобщения сведений о дальневосточных цунами, их анализа с точки зрения современных представлений о природе цунами и использования для совершенствования оперативного прогноза, а также получения оценок цунамиопасности прибрежных территорий (цунамирайонирования побережья).

Точного научного определения, что такое цунами, до сих пор нет. В 60-х годах прошлого века под этими волнами понимались длиннопериодные (в диапазоне от 2 до 200 мин) колебания уровня океана, вызванные быстротечными процессами на дне или поверхности океана в основном тектонического характера, т.е. подводными землетрясениями, вулканическими извержениями, а также береговыми и подводными оползнями и обвалами [Соловьев, 1968]. В географическом отношении считалось, что главным цунамигенным регионом является побережье Тихого океана, цунами в других океанах могут возникать только при редких исключительных событиях, подобных Лиссабонскому землетрясению 1755 г. или извержению влк. Кракатау 1883 г. Считалось, что наилучшей математической моделью для описания цунами является модель длинных волн на мелкой воде. Однако уже тогда в каталоги цунами включались явления, подобные гигантскому (высотой в 525 м) заплеску в заливе Литуйя на Аляске, порожденному 10 июля 1958 г. сейсмогенным обвалом, возникшим на его восточном склоне после землетрясения магнитудой 7.9 [Miller, 1960]. Такого рода волну ни в каком приближении нельзя считать «длинной», однако ее аномальный и катастрофический характер не вызывает сомнения.

По мере дальнейшего изучения подобных явлений и накопления фактических данных стало понятно, что такие аномальные колебания уровня водных бассейнов, опасные для населения и береговых сооружений, могут происходить не только в океанах, морях и связанных с ними бухтах и заливах, но и во внутренних водных бассейнах, т.е. на озерах, водохранилищах и даже на крупных реках (см., например, [Никонов, 2004, 2007; Диденкулова, Пелиновский, 2009]). Периоды таких аномальных колебаний могут варьироваться от 1—2 мин до часа и более, заполняя таким образом частотный диапазон между ветровыми волнами и приливными колебаниями. Причинами цунами могут быть также и атмосферные процессы, причем известны обширные районы Мирового океана (например, восточное побережье США, Бенгальский залив, Болеарские острова, побережье Адриатики), где аномальные колебания уровня, вызванные именно атмосферными процессами, преобладают над всеми другими [Vilibić et al., 2014].

Поэтому сейчас в каталоги цунами включаются не только классические сейсмогенные цунами в морях и океанах, но также широкий круг цунамиподобных явлений, возникающих в любых водных бассейнах под действием внешних источников, общей чертой которых является внезапное и резкое изменение уровня воды вблизи берега, создающее опасность для находящихся там людей и сооружений.

При любом типе источника волна цунами есть возмущение, захватывающее всю толщу водного бассейна, при ее прохождении в движение приводятся огромные массы воды, что и делает цунами грандиозным катастрофическим явлением. В этом ее принципиальное отличие от ветровых волн, высоты которых на берегу при сильных штормах также могут достигать 8—10 м, но их разрушительный потенциал неизмеримо ниже.

ИСТОЧНИКИ ДАННЫХ О ЦУНАМИ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО РЕГИОНА РОССИИ

Источником сведений об исторических цунами, наблюдавшихся в Дальневосточном регионе РФ, являются каталоги землетрясений [Мушкетов, Орлов, 1893; Новый каталог..., 1977], специализированные каталоги цунами [Соловьев, Ферчев, 1961; Соловьев, Го, 1974, 1975; Соловьев, 1978; Соловьев и др., 1986; Заякин, 1996], научные публикации и отчеты об изучении конкретных исторических цунами в этом регионе, а также глобальные базы параметрических данных по цунами, поддерживаемые Национальным центром данных по геофизике НОАА в Боулдере, США [NGDC/WDS GHTDB, 2016] и лабораторией цунами ИВМиМГ СО РАН в Новосибирске [HTDB/WLD, 2016]. Данные в этих параметрических массивах в основном совпадают по объему и содержанию, различаясь по отдельным событиям оценками интенсивности цунами, баллом достоверности события, принятым разбиением по типам источников и др. В материалах настоящей статьи (в таблицах и графиках) в основном используются выборки, сделанные по Дальневосточному региону из глобальной базы данных, поддерживаемой лабораторией цунами ИВМиМГ СО РАН, с помощью графической оболочки WinITDB [WinITDB, 2007].

Формальным критерием для включения конкретного цунамигенного события из глобального каталога в региональный дальневосточный каталог является попадание его очаговой области в зону ответственности Дальневосточной службы предупреждения о цунами (СПЦ) или, в случае удаленных цунами, наличие хотя бы единичного наблюдения высоты цунами на Дальневосточном побережье РФ. Такой критерий де-факто был использован при составлении первых региональных каталогов цунами (например [Соловьев, 1978; Заякин, 1996]), в которые, наряду с региональными цунами, включались и удаленные события, вызвавшие ущерб или опасные колебания уровня у побережья РФ.

Такой критерий, однако, в настоящее время нуждается в уточнении. По мере развития региональной мареографной сети и совершенствования приборных средств регистрации цунами на Дальневосточном побережье РФ стали фиксироваться и небольшие колебания уровня, выделяемые только на приборных записях. С установкой современных цифровых регистраторов цунами в ряде пунктов Дальневосточного побережья РФ производится регистрация практически всех значительных цунами, возникающих

в различных регионах Тихого океана и даже за его пределами. Например, индонезийское цунами 26.12.2004 г. было записано мареографом в Северо-Курильске с высотой 29 см [Rabinovich et al., 2006]. При этом региональной сетью регистрируются, хотя и с небольшими амплитудами (порядка 5—10 см), не только цунами, сопровождавшиеся разрушениями вблизи очаговой области, такие как цунами Самоа 29.09.2009 г. с максимальным заплеском на ближайшем побережье 22.3 м или Чилийское цунами 27.02.2010 г. с максимальным заплеском 29 м, но и события, не вызвавшие ощутимых локальных последствий, подобные цунами в Папуа-Новая Гвинея 03.01.2009 г. или цунами Вануату 07.10.2009 г. [Shevchenko et al., 2013]. Следовательно, сейчас для включения события в региональный каталог цунами необходимо введение какого-то формального критерия по минимальной высоте волны, измеренной или наблюдавшейся на Дальневосточном побережье РФ, например 0.5 м. Это пороговое значение используется, в частности, при анализе эффективности оперативных прогнозов цунами [Воробьева и др., 1983; Гусяков, 2010]. При этом соотношение между местными и удаленными событиями в региональном каталоге будет существенно зависеть от выбранного значения этой пороговой высоты.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО КАТАЛОГА ЦУНАМИ

Исторический каталог цунами для Дальневосточного региона РФ, как и многие другие региональные каталоги, начинается с одного из сильнейших событий — катастрофического цунами, вызванного Камчатским землетрясением 6 октября 1737 г. Обычно для первого, т.е. наиболее древнего, события каталога информация очень ограничена, однако по камчатскому цунами 1737 г. имеется достаточно подробный набор сведений, благодаря тому, что оно произошло в период работы Второй Камчатской экспедиции (1735—1740 гг.). Натуралист этой экспедиции Степан Крашенинников высадился на западном побережье Камчатки в районе Большерецка спустя всего две недели после землетрясения, когда еще продолжались его интенсивные повторные толчки (во время некоторых, по его словам, «нельзя было устоять на ногах»). С. Крашенинников сразу понял и оценил значимость события и свои первые поездки по Камчатке посвятил сбору сведений о проявлениях цунами и землетрясения. Основываясь на приводимых в его фундаментальном труде «Описание земли Камчатки» [Крашенинников, 1994] данных о максимальных высотах заплеска (63 м для Парамушира и 31 м для района Авачинского залива), протяженности наиболее пострадавшего побережья (более 700 км), сопутствующих явлениях (осушение дна в проливах, изменения берегового рельефа), продолжительности и силе афтершоков землетрясения, активизации вулканической деятельности) можно заключить, что цунами 1737 г. является, возможно, сильнейшим региональным событием за весь исторический период наблюдений. Несомненно, оно сопровождалось жертвами среди населения Камчатки (коряков и камчадалов), однако оценить даже их примерное число сейчас не представляется возможным. Можно с большой долей уверенности предполагать, что цунами 1737 г. было трансокеанским, и по аналогии с камчатским цунами 1952 г. должно было наблюдаться не только в соседних регионах — на Алеутских и Японских островах, но и на Гавайях и, возможно, даже на побережье Южной Америки, где цунами 1952 г. имело высоту до 2—3 м [The tsunami, 1952; The Chilean tsunami..., 1953].

Вторым сильнейшим региональным событием является разрушительное камчатское цунами 4 ноября 1952 г., высоты заплеска которого на восточном побережье о. Парамушир достигали 18—20 м [Саваренский и др., 1958]. Это цунами, практически уничтожившее г. Северо-Курильск, со всей очевидностью показало, насколько опасным может быть это природное явление для Дальневосточного побережья России. Основной удар пришелся по островам Парамушир и Шумшу, которые только в 1945 г. вошли в состав СССР и где большинство населения было переселенцами с материка, незнакомыми с такой опасностью, как цунами. Отчасти этим объясняется большое количество жертв, вызванных этим событием. Точное число людских потерь, возможно, было подсчитано, но никогда не было опубликовано. Уже в 2000-х годах появилась цифра потерь среди гражданского населения — 2336 человек [Шевченко и др., 2012]. Однако учитывая то, что большинство населения Северных Курил в то время были военными, общие потери могли быть в несколько раз больше. Наиболее подробное изучение последствий цунами 1952 г. выполнено камчатским писателем, журналистом и краеведом А.А. Смышляевым. В его книге [Смышляев, 2003] приведена итоговая экспертная оценка, основанная на встречах и беседах с очевидцами и изучении местных архивов, от 10 до 14 тыс. человек, подавляющее большинство из которых стало жертвами именно цунами. В текущей версии базы данных [HTDB/WLD, 2015] принята цифра в 10 тыс. человек как показатель масштаба людских потерь и степени точности, с которой эти потери могут быть оценены в настоящее время.

Важно подчеркнуть, что с 1952 г. вплоть до настоящего времени (т.е. на протяжении уже более 60 лет) на всем Дальневосточном побережье РФ не было документально подтвержденных случаев гибели людей непосредственно от цунами. Однако сам по себе этот факт не служит гарантией отсутствия жертв в будущем. Сильные цунами относятся к классу катастрофических природных явлений, характеризующихся низкой повторяемостью (вероятностью возникновения в расчете на год), но тяжелыми по-

следствиями (высокой вероятностью фатальных исходов среди населения, оказавшегося в зоне их воздействия). В этом отношении они подобны метеоритным ударам, вероятность которых крайне низка, но последствия могут быть очень тяжелыми, вплоть до глобальной катастрофы, результатом которой может быть гибель значительной части населения Земли [Bobrowsky, Rickman, 2007]. В качестве примера можно привести статистику людских потерь от цунами в Японии, где на всем восточном (Тихоокеанском) побережье протяженностью более 2500 км не было жертв от цунами в течение 51 года — с 27 мая 1960 г., когда от чилийского цунами погибли 204 человека [The Chilean tsunami..., 1961], до цунами Тохоку 11 марта 2011 г., вызвавшего гибель 18.465 человек [National Police..., 2015]. При этом на восточном побережье Японии за этот период было зарегистрировано 66 цунами разной интенсивности, большинство из которых было вызвано местными региональными землетрясениями.

В целом во всем Дальневосточном регионе (включая побережье Японского и Охотского морей) за весь исторический период (с 1737 по 2015 г.) цунами от региональных источников наблюдалось 105 раз. В пяти случаях ощутимое (с высотой более 0.5 м) цунами было вызвано удаленными источниками

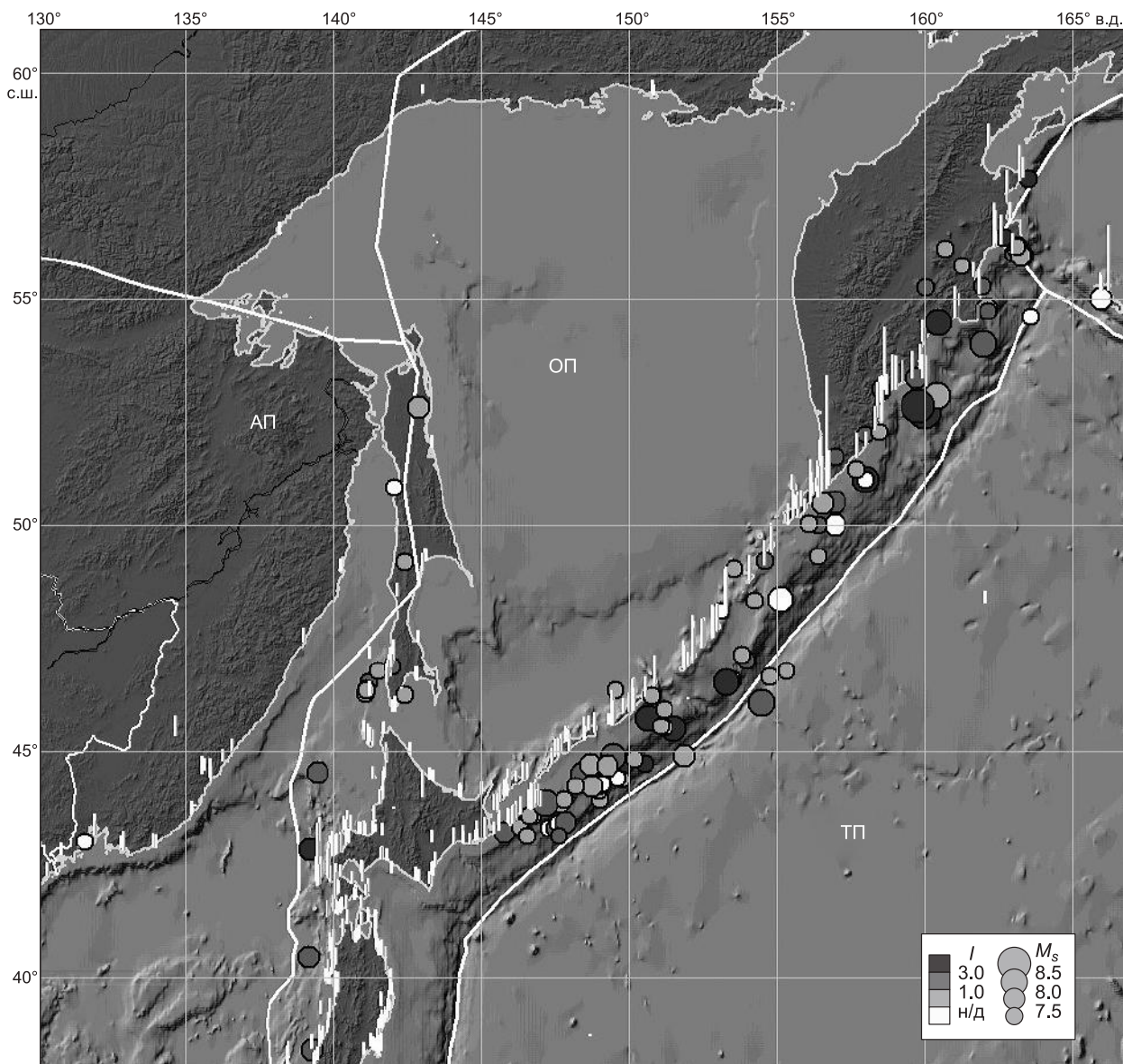


Рис. 1. Положение эпицентров 105 региональных цунамигенных событий, вызвавших зарегистрированные цунами на Дальневосточном побережье РФ с 1737 по 2015 г.

Размер кружков пропорционален магнитуде землетрясения, плотность серого тона отражает интенсивность цунами (по шкале Соловьева—Имамуры). Вертикальными белыми линиями показаны наблюдавшиеся высоты цунами от этих очагов. Сплошными ломаными линиями показаны границы плит (по цифровой модели, приведенной в [Bird, 2003]), ТП — Тихоокеанская плита, ОП — Охотская плита, АП — Амурская плита.

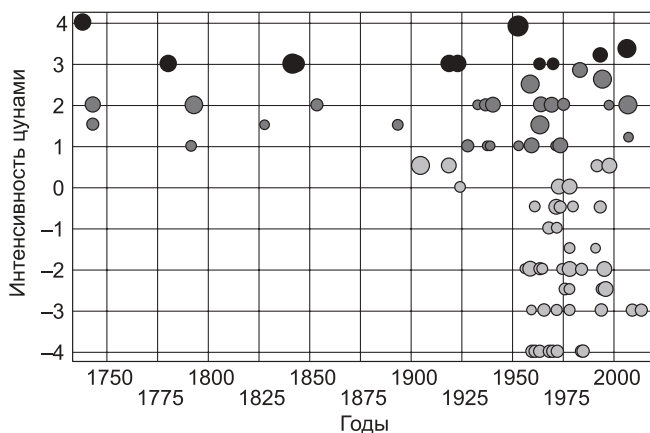


Рис. 2. Временная развертка цунамигенных событий Дальневосточного региона, имеющих оценки интенсивности цунами I , на интервале с 1737 по 2015 г.

Размер кружков пропорционален магнитуде землетрясения, тоном показана интенсивность события (в соответствии с легендой на рис. 1).

(чилийское 1960 г., аляскинское 1964 г., цунами Муэле, Чили 2010 г., цунами Тохоку, Япония 2011 г. и цунами Ильяпель, Чили 2015 г.), хотя случаев инструментальной регистрации цунами от удаленных источников гораздо больше и число

их непрерывно увеличивается по мере совершенствования технических средств наблюдений. Общая продолжительность дальневосточного каталога составляет таким образом 278 лет, при этом медианная дата, разделяющая каталог на две равные части, находится в районе 1963 г. Отсюда сразу следует определенный вывод о полноте и представительности регионального каталога цунами (подробнее об этом ниже).

Географическое распределение очагов дальневосточных цунами представлено на рис. 1, на котором показано положение эпицентров (инструментальных и макросейсмических) всех цунамигенных событий каталога. За весь период исторических наблюдений в Курило-Камчатской зоне возникло 91 цунами, в Японском море (включая Татарский пролив) — 10 (всего в Японском море за этот период возникло 32 цунами разной интенсивности, но только для 10 из них имеются достоверные данные о высотах волн на Дальневосточном побережье РФ), в Охотском море — 4 цунами (здесь и далее статистика цунамигенных событий дается по состоянию на 31.12.2015 г.).

В Курило-Камчатской зоне основная масса цунамигенных очагов располагается в полосе между осью глубоководной впадины и краем шельфа. В рамках представлений плитовой тектоники возникновения сильных землетрясений здесь обусловлено подвигом океанической плиты под перекрывающий ее островодужный выступ континентальной литосферы [Лобковский, Сорохтин, 1979]. В соответствии с этим, преобладающим механизмом Курило-Камчатских цунамигенных землетрясений должен быть пологий надвиг [Лобковский, Сорохтин, 1980], что, в общем, подтверждается имеющейся с 1976 г. статистикой определений механизмов очагов сильных землетрясений, например, по методике СМТ [Global СМТ Catalog..., 2016]. В Японском море цунамигенные землетрясения располагаются вдоль зоны контакта Охотской плиты, на юге которой некоторыми исследователями (например [Bird, 2003]), выделяется Японская микроплита, с Амурской плитой. Преобладающим механизмом этих землетрясений являются взбросы по крутопадающим плоскостям разрыва.

Более подробное представление о полноте и представительности дальневосточного каталога цунами дает рис. 2, на котором представлена временная развертка цунамигенных событий каталога, имею-

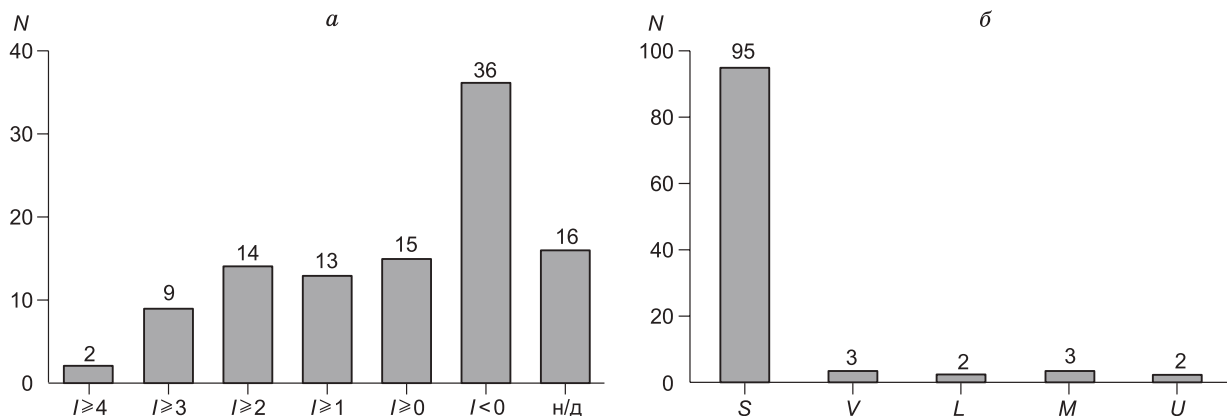


Рис. 3. Распределение числа цунамигенных событий Дальневосточного региона по интенсивности цунами I (а) и по типам источников цунами (б):

S — сейсмогенные, V — вулканогенные, L — обвальные, M — метеорологические, U — цунами неизвестной природы. Цифры над столбцами показывают число событий каталога в соответствующем диапазоне значений параметра распределения.

Таблица 1.

**Список значительных¹⁾ региональных цунами, наблюдавшихся
на Дальневосточном побережье РФ с 1737 по 2015 г.**

Дата	M	I	H_{\max} , м	N_G	N_R	F	REG
17.10.1737	8.3	> 4	63	4	4	н/д	Камчатка
29.06.1780	7.5	3	12	5	5	12	Средние Курилы
17.05.1841	8.4	3	15	7	3	1	Камчатка
25.04.1843	8.4	3	> 5	8	1	н/д	о. Итуруп
07.09.1918	$8.2M_s$	3	8	26	12	24	Средние Курилы
03.02.1923	$8.3M_s$	3	14	17	3	2	Камчатка
13.04.1923	$7.2M_s$	3	14	10	3	35	»
04.11.1952	$8.5M_w$	4.1	18.6	343	22	~10 000	»
06.11.1958	$8.4M_w$	2.5	5.0	56	12	0	о. Итуруп
20.10.1963	$7.2M_w$	3.0	15.0	47	31	0	о. Уруп
22.11.1969	$7.3M_w$	3.0	15.0	19	10	0	Камчатка
27.05.1983	$7.7M_w$	2.8	5.0	138	48	1?	Японское море
12.07.1993	$7.7M_w$	3.2	5.5	190	15	0	»
04.10.1994	$8.1M_w$	2.6	10.4	116	30	0	о. Шикотан
15.11.2006	$8.1M_w$	3.5	22.4	254	120	0	о. Симушир

Примечание. M — магнитуда (макросейсмическая, если тип не указан), I — интенсивность цунами по шкале Соловьева—Имамуры, H_{\max} — максимальная высота заплеска на ДВ побережье РФ, N_G — общее число имеющихся наблюдений высот, N_R — число наблюдений высот на ДВ побережье РФ, F — число жертв цунами на ДВ побережье РФ (н/д — нет данных о жертвах), REG — область очага цунами.

¹⁾ Согласно подходу, принятому при составлении баз данных по землетрясениям и цунами Национального центра данных по геофизике NGDC/WDS, к значительным (significant) относятся события, вызвавшие большой (более 1 млн долл.) материальный ущерб, или сопровождавшиеся человеческими жертвами (более 10 чел), или имевшие магнитуду источника более 7.5, или интенсивность цунами более 2.5.

Эти определения интенсивности цунами I по шкале Соловьева—Имамуры [Соловьев, 1972]. В основе этой шкалы лежат усредненные значения высот заплеска цунами на ближайшем к очагу побережье, при этом точность определения интенсивности прямо зависит от числа имеющихся измерений заплеска.

Представленные на рис. 2 данные показывают, что дальневосточный каталог цунами можно считать более или менее полным только с середины 50-х годов XX в., когда в регионе начала формироваться стационарная мареографная сеть. За период XIX и XVIII веков в каталоге присутствуют только сильные и разрушительные цунами с интенсивностью $I > 1$, причем вполне возможны пропуски даже таких сильных событий. Общая же продолжительность исторического каталога цунами (278 лет) едва превышает продолжительность одного сейсмического цикла, характеризующего повторяемость сильнейших (с магнитудами $M \geq 7.7 \pm 0.2$) землетрясений в пределах северо-западной окраины Тихого океана, равного 200 ± 50 лет [Викулин, 1990, 2003], и, очевидно, не может считаться достаточной для надежной оценки как повторяемости таких событий, так и их предельно возможных магнитуд.

Распределение цунамигенных событий по интенсивности цунами I , определенной по шкале Соловьева—Имамуры, показано на рис. 3, а. Всего за период исторических наблюдений в регионе произошло два катастрофических мегацунами с интенсивностью $I > 4$, вызвавших на побережье волны высотой более 20 м (в 1737 и 1952 г.), девять случаев разрушительных цунами с интенсивностью $3 \leq I < 4$ и высотами более 10 м, в 27 случаях интенсивность цунами была в диапазоне $1 \leq I < 3$, т.е. цунами было опасным (высоты более 2—3 м), в 15 случаях наблюдаемые высоты волн находились в пределах приливных колебаний (порядка 1—2 м). В остальных 36 случаях цунами было слабым и наблюдалось только на приборных записях. Таким образом, повторяемость разрушительных цунами у дальневосточных берегов РФ составляет в среднем 1 раз в 25 лет, опасных — 1 раз в 10—15 лет, слабые цунами наблюдаются практически ежегодно (по статистике за последние 60 лет, когда в регионе начала создаваться сеть мареографных станций).

Следует отметить, что для значительного числа (15 %) имеющихся в каталоге цунамигенных событий интенсивность не может быть определена. Основную долю среди них представляют собой старые события, происшедшие в доинструментальный период, для которых часто отсутствуют какие-либо количественные данные о высотах волн. Здесь необходим тщательный поиск дополнительных данных по всем возможным источникам, который, как показывает опыт некоторых недавних работ по исторической сейсмологии [Никонов, 1997; Никонов, Флейфель, 2014], может быть успешным и продуктивным.

Весьма важным является распределение цунамигенных событий по типу источников, показанное на рис. 3, б. Подавляющее большинство (95) событий имело сейсмогенную природу, в трех случаях

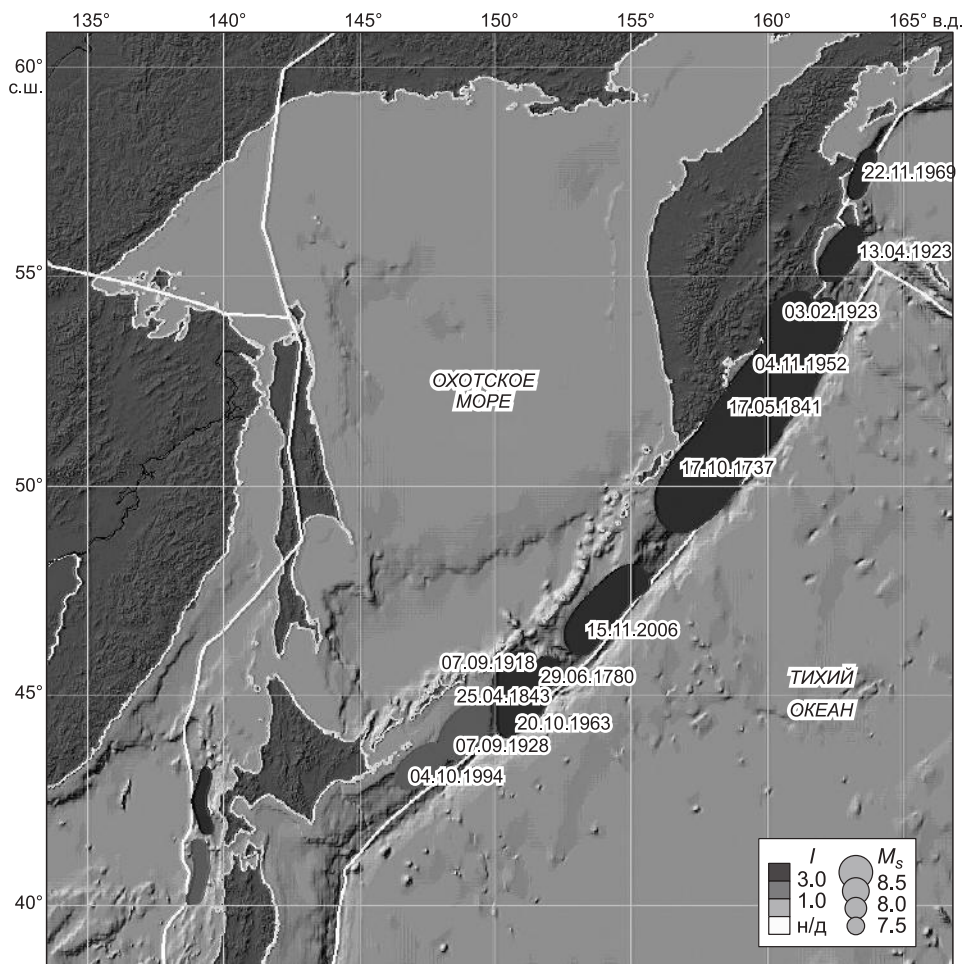


Рис. 4. Положение очагов значительных цунами, указанных в табл. 1.

цунами было вызвано вулканическими взрывами, в двух — береговыми обвалами, как метеорологические были классифицированы три события. В двух случаях природа источника цунами остается неизвестной. Данное распределение показывает, что почти 90 % дальневосточных цунами имеют сейсмогенную природу, из чего следует, что построение службы предупреждения на основе сейсмического метода прогноза является вполне оправданным.

Список 15 наиболее значительных региональных цунами, наблюдавшихся на Дальневосточном побережье РФ, приведен в табл. 1, положение их очагов показано на рис. 4. Именно такие события создают основную угрозу для безопасности людей в прибрежной зоне и вносят наибольший вклад в цунамиопасность Дальневосточного побережья РФ.

ЗАВИСИМОСТЬ ИНТЕНСИВНОСТИ ЦУНАМИ ОТ МАГНИТУДЫ ПОДВОДНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Важнейшим вопросом как для оперативного прогноза цунами, так и для цунамирайонирования побережья является связь интенсивности цунами с магнитудой порождающего его подводного землетрясения. Данные исторического каталога цунами и средства анализа, встроенные в графическую оболочку WinITDB, позволяют выполнить исследование зависимости интенсивности цунами как от магнитуды M_s , определяемой по 20-секундным поверхностным волнам, так и от магнитуды M_w , определяемой по величине сейсмического момента. Графики зависимостей $I(M_s)$ и $I(M_w)$, построенные для всего периода исторических наблюдений в Дальневосточном регионе, представлены на рис. 5. Из их рассмотрения следует весьма важный для работы службы предупреждения вывод о том, что по магнитуде землетрясения очень трудно, если вообще возможно, прогнозировать интенсивность возникшего цунами. Можно только констатировать общую тенденцию роста интенсивности цунами с увеличением магнитуды. Раз-

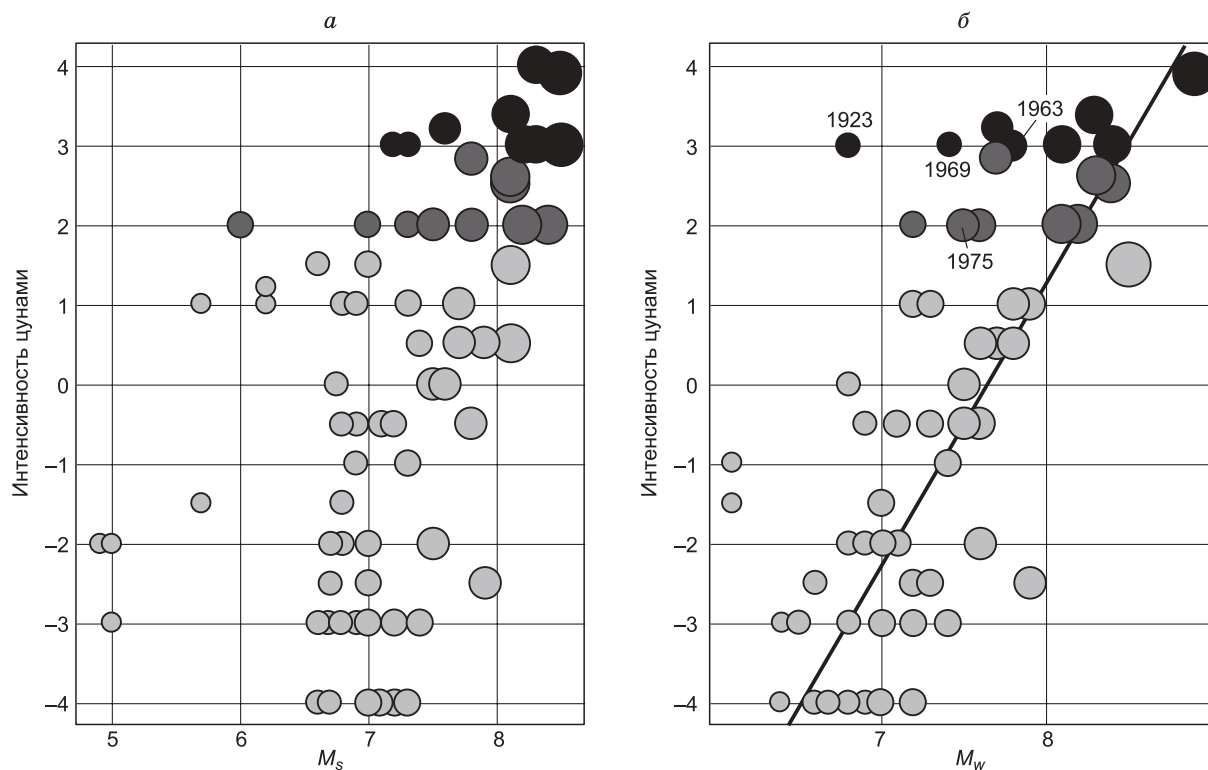


Рис. 5. Зависимость интенсивности цунами (по шкале Соловьева—Имамуры) от магнитуды M_s (а) и M_w (б) для цунамигенных событий, происшедших в Дальневосточном регионе РФ с 1737 по 2015 г.

На рисунке (б) сплошной линией показана теоретическая зависимость $I = -27.1 + 3.6M_w$, полученная в работе [Гусяков, Чубаров, 1987]. Датой промаркированы цунами-землетрясения, указанные в табл. 2.

брос фактических данных оказывается слишком велик и для интервала магнитуд 7—8, которому принадлежит большинство цунамигенных землетрясений, он превышает 6 баллов по шкале интенсивности, что соответствует различию в 64 раза в средних высотах цунами на побережье. Причем подобный разброс существует не только для магнитуды M_s , но и для существенно более длиннопериодной магнитуды M_w .

Можно указать несколько причин такого разброса:

1. Различия глубин воды в эпицентральной области. На это впервые было указано в работе К. Ииды [Iida, 1970], в которой на материале японских землетрясений было продемонстрировано влияние глубины воды над очагом подводного землетрясения на итоговую интенсивность цунами. Землетрясения, происходящие в глубоком океане, приводят в движение больший объем воды, что увеличивает начальную энергию цунами.

2. Различие в механизмах очагов. Результаты численного моделирования показывают, что наиболее цунамиопасными являются крутые разломы с преимущественно взбрособросовыми подвижками по ним [Алексеев, Гусяков, 1984; Comer, 1984]. Несколько меньшей цунамиэффективностью обладают пологие надвиги. В основном это обусловлено большей средней глубиной очагов с таким механизмом. При наличии в очаге землетрясения существенной сдвиговой компоненты интенсивность цунами снижается в несколько раз.

3. Различие в глубине очага землетрясения. Увеличение глубины с 30 до 60 км снижает интенсивность цунами вдвое [Гусяков, 1976]. Очаги с глубинами более 80 км практически не возбуждают сильных цунами.

Однако наиболее существенным фактором является на наш взгляд вовлеченность вторичных механизмов в процесс генерации цунами, в частности, подводных оползней и обвалов. Подробно этот вопрос применительно к цунамигенным землетрясениям Тихоокеанского сейсмического пояса разбирается в работе [Gusiakov, 2001]. По данным, полученным в ней, до 30 % Тихоокеанских цунамигенных землетрясений имели значительный вклад оползневого механизма в процесс генерации цунами, для некоторых из них (например, для цунами в Папуа-Новая Гвинея 17.07.1998 г.) он был преобладающим.

ПРОБЛЕМА ЦУНАМИ-ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

При анализе эффективности магнитудно-географического критерия прогнозирования цунами отдельного рассмотрения заслуживает проблема так называемых «цунами-землетрясений». Этот термин был введен Х. Канамори в начале 70-х годов прошлого века для обозначения землетрясений, возбуждающих аномально сильные волны цунами сравнительно с величиной их магнитуды M_s [Kanamori, 1972]. Так, например, одно из сильнейших в прошлом столетии алеутское цунами 1.04.1946 г. с максимальной высотой более 40 м было вызвано землетрясением весьма умеренной магнитуды, первоначальное и длительное время сохранявшееся в сейсмологических каталогах значение которой было всего 7.4 (по шкале M_s). Макросейсмическая магнитуда землетрясения, породившего сильнейшее японское цунами в округе Санрику в 1896 г. с высотами до 38 м, жертвами которого стали более 27 тыс. человек, оценивается величиной 7.4—7.6. Анализируя эти события, Х. Канамори предложил термином «цунами-землетрясение» (tsunami-earthquake) называть события, возбуждающие аномально большие волны цунами по сравнению с 20-секундными поверхностными волнами, по которым определяется магнитуда M_s . Согласно его предположению, это события с аномально большим временем развития процесса в очаге, достигающему 100 с и более, что ослабляет излучение поверхностных сейсмических волн, но в то же время способствует более эффективному возбуждению цунами.

В Курило-Камчатской зоне к этому типу могут быть отнесены четыре землетрясения: 13.04.1923 г. в Камчатском заливе, 20.10.1963 г. вблизи о. Уруп, 22.11.1969 г. на мысе Озерной (Северо-Восточная Камчатка) и 10.06.1975 г. вблизи о. Шикотан. Их параметры приведены в табл. 2.

И. Фукао [Fukao, 1979], рассматривая курильские землетрясения 20.10.1963 г. и 10.06.1975 г., предложил свою трактовку их механизма, основанную на учете сеймотектонических особенностей данной зоны и детальном анализе процесса развития разрывов в очагах. Согласно его предположению, повышенная цунамиэффективность этих землетрясений объясняется присутствием вторичного субвертикального разрыва, ответвляющегося от главной плоскости (соответствующей пологому надвигу) и достигающему дна в районе западного борта глубоководной впадины. Большая глубина воды в этой области, увеличение угла падения разрыва, наличие мощной толщи слабоконсолидированных донных осадков, приводящее к большим деформациям дна — все эти факторы способствуют увеличению амплитуд цунами и уменьшению излучения сейсмической энергии именно в том диапазоне поверхностных волн, который используется для определения магнитуды M_s .

Такого рода события отчетливо выделяются из общей массы цунамигенных землетрясений на графике зависимости $I(M_w)$, представленном на рис. 5, б, повышенным значением интенсивности относительно ее ожидаемого значения. Однако помимо четырех цунами-землетрясений, указанных выше, на этом графике имеются и другие события с повышенным значением интенсивности. Каждый такой случай требует тщательного рассмотрения, так как явное несоответствие интенсивности цунами значению магнитуды землетрясения (как M_s , так и M_w) может быть вызвано и другими причинами, например, наличием обвальной компоненты в очаге цунами.

ОПЕРАТИВНЫЙ ПРОГНОЗ ЦУНАМИ НА ДАЛЬНЕВОСТОЧНОМ ПОБЕРЕЖЬЕ РФ

Задачей службы предупреждения о цунами является заблаговременное извещение о времени подхода и возможной высоте волн цунами на побережье. Принципиальная возможность такого прогноза заключается в существенном различии скоростей распространения сейсмических волн в земной коре (4—7 км/с) и волн цунами в океане (0.1—0.2 км/с), благодаря чему создается некоторый небольшой (порядка 15—20 мин) запас времени между регистрацией подводного землетрясения и приходом цунами к побережью.

Служба предупреждения о цунами на Дальневосточном побережье СССР была создана в 1958 г. и впервые задействована при Урупском землетрясении 6(7) ноября 1958 г. ($M_s = 8.1$). При создании службы учитывались такие обстоятельства, как большая разобщенность островов Курило-Камчатской гряды и близкое расположение очаговых зон подводных землетрясений, исключающее возможность

Таблица 2. Параметры цунами-землетрясений Дальневосточного региона РФ

Дата и область очага	M_s	M_w	I	H_{\max} , м	N_G	N_R
13.04.1923, Камчатка	7.2	6.8	3.0	20.0	17	3
20.10.1963, о. Уруп	7.2	7.8	3.0	15.0	47	31
22.11.1969, м. Озерной	7.3	7.4	3.0	15.0	19	10
10.06.1975, о. Шикотан	7.0	7.5	2.0	5.5	116	30

Примечание. M_s — магнитуда по поверхностным волнам, M_w — моментная магнитуда.

использования береговых мареографных установок для обнаружения цунами. За основу был принят сейсмический метод прогноза, базирующийся на регистрации сейсмических волн, опережающих на 15—20 мин приход цунами. Каждая из первоначально входивших в службу трех сейсмостанций — в Южно-Сахалинске, Курильске и Петропавловске-Камчатском — вырабатывала сигнал тревоги цунами автономно, пользуясь показаниями только своего комплекта приборов, что являлось вынужденным следствием отсутствия оперативной связи между ними [Соловьев, 1968]. Критерием для выпуска тревоги по местным землетрясениям являлось попадание эпицентра в зону ответственности СПЦ и превышение магнитудой M_s порогового значения, принятого равным 7.0. Для удаленных землетрясений из других цунамигенных регионов Тихого океана тревога объявлялась на основании сообщений Международного центра предупреждения о цунами в Гонолулу (США) о регистрации опасного цунами тихоокеанской мареографной сетью.

Принципиальная недостаточность сейсмического метода прогноза цунами со всей очевидностью вытекает из анализа фактической зависимости интенсивности цунами от магнитуды подводного землетрясения, представленной на рис. 5. Магнитудный метод прогноза неизбежно носит вероятностный характер, при котором соотношение между ложными тревогами и пропусками цунами определяется выбранным пороговым значением магнитуды. Теоретическая оценка эффективности магнитудного метода прогноза была дана в работе [Соловьев, 1972], в которой было показано, что для значения пороговой магнитуды 7.0 соотношение между оправдавшимися, ложными и пропущенными тревогами должно быть порядка 150:500:1. Анализ 50-летней практики применения магнитудно-географического критерия прогнозирования региональных цунами, выполненный в работе [Гусяков, 2010], подтвердил эту оценку. Среди выпущенных службой за этот период 67 тревог ложными по принятому критерию превышения высотами волн пороговой величины 0.5 м, оказалось 50 (т.е. 75 %).

В целом же служба предупреждения о цунами на Дальневосточном побережье вполне надежно (т.е. без пропусков опасных цунами) функционировала все эти годы, накопила определенный опыт в прогнозировании местных и удаленных цунами. Единственным, но весьма серьезным недостатком службы является высокий процент ложных тревог, что снижает доверие населения к сигналам тревоги цунами и ведет к увеличению риска гибели людей при опасном цунами. Именно в снижении числа ложных тревог (при сохранении на разумно низком уровне риска пропуска сильного цунами) и кроется главный резерв совершенствования службы.

Вместе с тем, по-видимому, возможен и другой путь улучшения оперативного прогноза цунами, указанный, как отмечалось выше, еще в работе С.Л. Соловьева [Соловьев, 1968]. Тихоокеанское побережье страны заселено крайне неравномерно, причем в последнее время концентрация населения в многих крупных поселках усиливается, взамен его равномерного распределения по побережью в мелких поселениях. Угрозе цунами подвержены прежде всего поселки Усть-Камчатск, Никольское на о. Беринга, Северо-Курильск на о. Парамушир, Южно-Курильск на о. Кунашир, Малокурильск и Крабовоудск на о. Шикотан. Если бы удалось наладить надежное современное оповещение жителей этих пунктов о приближении цунами, проблему краткосрочного прогноза цунами для них можно было бы считать решенной. Перечисленные пункты прикрыты со стороны океана довольно протяженным шельфом, который преодолевается цунами за время порядка 15 мин. Донные датчики уровня океана, установленные на краю шельфа или несколько дальше от берега и связанные с поселками подводным кабелем или по радиоканалу, могут обеспечить вполне однозначный прогноз цунами, причем с неменьшей степенью заблаговременности, чем по сейсмическим данным.

Еще один резерв для совершенствования работы службы заключается в переходе от бинарного (угроза цунами/нет угрозы цунами) метода прогнозирования к оценке возможных высот цунами в конкретных пунктах побережья. На первом этапе это могло бы осуществляться путем разбиения угрозы на три уровня — сильное цунами/цунами/возможное (слабое) цунами с соответствующей модификацией действий служб МЧС и местных властей при угрозе разного уровня. Такое разбиение могло бы осуществляться на основе предвычисления ожидаемых высот с использованием хорошо развитых в настоящее время средств моделирования цунами, а также алгоритмов коррекции прогноза по мере поступления сведений о фактической регистрации цунами региональной мареографной сетью с учетом возросших возможностей оперативного получения информации с приборов регистрации уровня.

Что касается прогнозирования удаленных цунами, то здесь реально опасными, по-видимому, являются только трансокеанские цунами, возбужденные мегаземлетрясениями класса $M9$ из определенных цунамигенных зон Тихого океана. Цунами Тохоку 2011 г. вызвало на западном побережье о. Шикотан (бухта Крабовая) колебания уровня с высотами до 3.5 м [Шевченко и др., 2012]. За предыдущее столетие значительное проявление на российском побережье имели только два случая удаленных цунами — чилийское 1960 г. (высоты до 3—4 м по всему Охотскому побережью, 5—6 м на Курилах и восточном побережье Камчатки) и аляскинское 1964 г. (высота до 1 м на о. Парамушир). Два других сильнейших тихоокеанских цунами XX столетия, возникших на Алеутах в 1946 и в 1957 гг., никак не

проявились на нашем побережье. Между тем тревоги цунами от удаленных землетрясений за период с 1958 по 2000 год объявлялись 9 раз, при этом 7 из них оказались ложными. Эта статистика показывает, что проблема удаленных цунами требует специального рассмотрения с привлечением всех доступных материалов исторических наблюдений и численного моделирования (первая такая попытка сделана в работе [Бейзель и др., 2014]. Частью этой проблемы является корректное установление восточной (в районе Командорских островов) и южной (в районе о. Хоккайдо) границ географической области, принадлежности очага цунами к которой определяет его включение в региональный курило-камчатский каталог цунами. Здесь необходимо тщательное изучение исторических событий, происшедших в этих районах и численные расчеты возбуждения и распространения цунами на реальном рельефе дна, показывающие степень убывания высот цунами по мере удаления очага от границ региона.

ПРОБЛЕМЫ ЦУНАМИРАЙОНИРОВАНИЯ ПОБЕРЕЖЬЯ

В заключение необходимо кратко коснуться проблемы предварительной оценки долгосрочной цунамиопасности (цунамирайонирования побережья). Предварительное цунамирайонирование побережья — это получение и картирование долговременных оценок максимальных ожидаемых высот цунами на участках побережья и их обеспеченности (повторяемости). Оценки опасности цунами необходимы для 1) обеспечения безопасной и рациональной жизнедеятельности на угрожаемой территории; 2) перспективного планирования ее развития; 3) выполнения оперативных мероприятий по защите населения при угрозе цунами (выбор безопасных убежищ и маршрутов эвакуации).

Задача оценки долгосрочной цунамиопасности является во многом аналогичной задаче оценки сейсмоопасности. Последняя во всех странах решается сейчас по методике PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Assessment), положенной также в основу проекта создания карты общего сейсмического районирования территории России ОРС-2012 [Уломов, 2013]. При выполнении этого проекта такая опасность подводных землетрясений, как цунами, к сожалению, не принималась во внимание, хотя она является основной для Дальневосточного региона, где происходит 90 % всех сильных землетрясений России. Однако результаты большой работы, выполненной в рамках проекта ОРС-2012 по уточнению каталогов исторических землетрясений, изучению строения их очагов, картированию зон возникновения землетрясений (зон ВОЗ) в цунамиопасных районах, могут и должны быть использованы для оценки цунамиопасности Дальневосточного и других побережий России.

В настоящее время существует современная, достаточно детально разработанная методика РТНА для вероятностной оценки цунамиопасности [Gonzales et al., 2009]. Она широко используется в США, Канаде, Австралии, Новой Зеландии, в Западной Европе [Power, Downes, 2009; Power et al., 2011; Leonard et al., 2014; Knighton, Bastidas, 2015]. На ее основе выполняется как обзорное цунамирайонирование побережья целых стран, так и рассчитываются детальные карты заливания для отдельных населенных пунктов, а также гаваней и портов. При всех имеющихся недостатках этой методики (как принципиальных, так и технических) она после необходимой адаптации может быть использована при создании карты цунамиопасности побережья России.

В основе методики РТНА лежит построение вероятностной сеймотектонической модели основных цунамигенных зон, угрожающих защищаемому побережью и применение численных моделей возбуждения и распространения цунами для расчета ожидаемых высот цунами в конкретных пунктах побережья. Поскольку изменчивость высот волн цунами вдоль берега является достаточно сильной, особенно для сложных изрезанных побережий, карты цунамиопасности, пригодные для практического использования, должны строиться в достаточно крупных масштабах (1:10 000—1:100 000). Как следствие покрываемые ими территории будут достаточно ограниченными (1—10 км). В этой ситуации наличие обзорной карты цунамирайонирования для крупных участков побережья, построенной в масштабе порядка 1:4 000 000, является совершенно необходимым. Помимо того, что такая карта позволит количественно сравнивать различные побережья в смысле их цунамиопасности, она послужит основой для построения карт детального цунамирайонирования, поскольку при ее построении должен быть выполнен основной объем работ по созданию сеймотектонической модели цунамигенного региона.

Представляется, что создание такой карты должно стать необходимым первым этапом в большом комплексе работ по получению карт заливания конкретных населенных пунктов, необходимых для осуществления защитных мероприятий при оперативном прогнозе цунами и для регулирования строительства в цунамиопасных зонах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Волны цунами представляют реальную угрозу для многих участков Дальневосточного побережья России. В наибольшей степени этой угрозе подвержено восточное (океаническое) побережье Камчатки и Курильских островов, где в историческое время (последние 250 лет) неоднократно наблюдались вол-

ны с заплесками 15—20 м и более. На побережье Приморья опасные колебания уровня с заплесками до 5—7 м могут возникать при подводных землетрясениях в восточной части Японского моря. Охотское море существенно менее цунамиопасно, однако на значительной части его побережья могут наблюдаться колебания уровня с размахом до 4—5 м при сильнейших тихоокеанских цунами, порожденных, в частности, очагами у берегов Чили.

Дальневосточный каталог исторических цунами, покрывающий период с 1737 г. и включающий на данный момент 110 событий, является достаточно полным в отношении разрушительных и сильных цунами и может служить основой для оценки повторяемости региональных цунами различной силы. Его дальнейшее улучшение должно проводиться в основном в направлении уточнения положения и энергетических характеристик очагов цунами, а также поиска новых архивных данных о проявлениях цунами на побережье.

Гораздо менее полным является каталог наблюдений высот волн на Дальневосточном побережье, содержащий около 580 измерений высот. Достаточное количество высот (10 и более), необходимых для надежной количественной оценки интенсивности, имеют только 10 % событий. Около 35 событий не имеют каких-либо количественных данных о высотах, их интенсивность можно оценить только экспертным путем на основании косвенных данных. Эта часть каталога нуждается в дальнейшем пополнении и коррекции с использованием всех возможных источников.

Принятое в службе предупреждения о цунами разделение всего Дальневосточного региона на три отдельные зоны (Курило-Камчатская зона, Японское море, Охотское море) выглядит достаточно рациональным. За весь период наблюдений не было зарегистрировано случаев выхода опасного цунами за пределы его зоны зарождения.

Главной проблемой оперативного прогноза цунами является высокая доля ложных тревог, достигающая 75 % от всех поданных. Основной путь снижения числа ложных тревог лежит в использовании дополнительной гидрографической информации от подводных кабельных и буйковых регистраторов цунами, которыми должны быть защищены, по крайней мере, основные населенные пункты Дальневосточного побережья.

Повышение эффективности оперативных прогнозов цунами также может быть достигнуто путем пересмотра географических границ для выпуска тревоги цунами в пределах отдельной цунамигенной зоны. Такой пересмотр должен быть сделан на основе анализа фактических наблюдений высот цунами и результатов численного моделирования распространения цунами внутри каждой из зон при различных положениях и размерах очагов.

В береговых зонах, подверженных воздействию волн цунами, любое хозяйственное освоение прибрежных территорий требует наличия оценок долгосрочного цунами-риска, которые могут быть получены на основе детальных карт цунамиопасности конкретных участков побережья и карт заливания для отдельных населенных пунктов, гаваней и бухт. Основой для всех этих работ должна быть обзорная карта цунамирайонирования всего Дальневосточного побережья РФ в масштабе 1:2 000 000—1:4 000 000, которая в настоящее время отсутствует. Методология и технологические средства (базы данных по цунами и землетрясениям и вычислительные комплексы по моделированию цунами), необходимые для ее создания, существуют и могут быть использованы для выполнения этой масштабной задачи.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ 14-17-00219.

ЛИТЕРАТУРА

Алексеев А.С., Гусяков В.К. Об оценке цунамиопасности подводных землетрясений // Землетрясения и предупреждение стихийных бедствий (Труды 27-го Международного геологического конгресса, Москва, 4—14 августа 1984 г., Т. 6). М., Наука, 1984, с. 127—133.

Бейзель С.А., Гусяков В.К., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И. Оценка воздействия удаленных цунами на Дальневосточное побережье России на основе результатов математического моделирования // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 2014, т. 90, № 5, с. 578—590.

Викулин А.В. Феноменологическая волновая модель сейсмического процесса // Докл. АН СССР, 1990, т. 310, № 4, с. 821—824.

Викулин А.В. Физика волнового сейсмического процесса. Петропавловск-Камчатский, КГПУ, 2003, 151 с.

Воробьева Е.А., Го Ч.Н., Иващенко А.И., Непоп К.И., Оскорбин Л.С., Поплавский А.А., Соловьев С.Л. Об уточнении магнитудно-географического критерия оперативного прогноза цунами на Дальнем Востоке // Оперативный и долгосрочный прогноз цунами. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1983, с. 6—24.

Гусяков В.К. Расчет энергии волн цунами // Некорректные задачи математической физики и проблемы интерпретации геофизических наблюдений. Новосибирск, ВЦ СО АН СССР, 1976, с. 46—64.

- Гусьяков В.К.** Магнитудно-географический критерий прогнозирования цунами: анализ практики применения за 1958—2009 гг. // *Сейсмические приборы*, 2010, т. 46, № 3, с. 5—21.
- Гусьяков В.К., Чубаров Л.Б.** Численное моделирование возбуждения и распространения цунами в прибрежной зоне // *Физика Земли*, 1987, № 11, с. 53—64.
- Диденкулова И.И., Пелиновский Е.Н.** Цунамиподобные явления в российских внутренних водоемах // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*, 2009, № 3 (5), с. 52—64.
- Крашенинников С.П.** Описание земли Камчатки, т. 1. Санкт-Петербург, Наука, 1994, 438 с.
- Лобковский Л.И., Сорохтин О.Г.** Деформация литосферных плит в зонах поддвига // *Океанология. Геофизика океана*. М., Наука, 1979, т. 2, с. 194—203.
- Лобковский Л.И., Сорохтин О.Г.** Тектоника литосферных плит и происхождение цунамигенных землетрясений // *Докл. АН СССР*, 1980, т. 251, № 5, с. 1092—1095.
- Мушкетов И.В., Орлов А.В.** Каталог землетрясений Российской империи. Записки Русского географического общества по общей географии. СПб., Типография Императорской АН, 1893, т. XXVI, 580 с.
- Никонов А.А.** Проблема представительности и качества каталогов землетрясений Сибири и Дальнего Востока // *Геологическая среда и сейсмический процесс*. Иркутск, ИЗК СО РАН, 1997, с. 127—128.
- Никонов А.А.** Признаки палеоцунами в раннеголоценовом озере Кунда (южное побережье Финского залива) // *ДАН*, 2004, т. 39, № 1, с. 81—84.
- Никонов А.А.** Цунами в глубине Кольского полуострова? // *Природа*, 2007, № 1, с. 35—38.
- Никонов А.А., Флейфель Л.Д.** Забытые сведения И.Г. Гмелина о землетрясениях Сибири (XVII—XVIII вв.) // *Геология и геофизика*, 2014, т. 55 (4), с. 669—677.
- Заякин Ю.А.** Цунами на Дальнем Востоке России. Петропавловск-Камчатский, Камчат, 1996, 88 с.
- Новый каталог** сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Под ред. Н.В. Кондорской, Н.В. Шебалина. М., Наука, 1977, 535 с.
- Саваренский Е.Ф., Тищенко В.Г., Святловский А.Е., Добровольский А.Д., Живаго А.В.** Цунами 4—5 ноября 1952 г. // *Бюл. Совета по сейсмологии АН СССР*, 1958, № 4, с. 1—63.
- Смышляев А.А.** Время красной рыбы. Петропавловск-Камчатский, «Новая книга», 2003, 425 с.
- Соловьев С.Л.** Проблема цунами и ее значение для Камчатки и Курильских островов // *Проблема цунами*. М., Наука, 1968, с. 7—50.
- Соловьев С.Л.** Повторяемость землетрясений и цунами в Тихом океане // *Тр. СахКНИИ*, вып. 29, 1972, с. 7—47.
- Соловьев С.Л.** Основные данные о цунами на Тихоокеанском побережье СССР, 1937—1976 гг. // *Изучение цунами в открытом океане*. М., Наука, 1978, с. 61—136.
- Соловьев С.Л., Ферчев М.Д.** Сводка данных о цунами в СССР // *Бюл. Совета по сейсмологии АН СССР*, 1961, № 9, с. 23—55.
- Соловьев С.Л., Го Ч.Н.** Каталог цунами на западном побережье Тихого океана. М., Наука, 1974, 310 с.
- Соловьев С.Л., Го Ч.Н.** Каталог цунами на восточном побережье Тихого океана. М., Наука, 1975, 203 с.
- Соловьев С.Л., Го Ч.Н., Ким Х.С.** Каталог цунами в Тихом океане, 1969—1982. М., МГК АН СССР, 1986, 163 с.
- Уломов В.И.** Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации — ОРС-2012 // *Вопросы инж. сейсмологии*, 2013, т. 40, № 4, с. 5—20.
- Шевченко Г.В., Ивельская Т.Н., Кайстренко В.М.** Цунами на Курильских островах. Особенности проявления и меры по снижению риска. Южно-Сахалинск, ФГБУН ИМГиГ ДВО РАН, 2012, 44 с.
- Bird P.** An updated digital model of plate boundaries // *G3 Electr. J. Earth Sci.*, 2003, v. 4, № 3, doi: 10.1029/2000GC000252.
- Bobrowsky P., Rickman H.** Comet/asteroid impacts and human society. An interdisciplinary approach. Berlin — Heidelberg, Springer-Verlag, 2007, 546 p.
- Comer R.P.** The tsunami model of a flat earth and its excitation by earthquake sources // *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 1984, v. 77, № 1, p. 1—27.
- Fukao Y.** Tsunami earthquakes and subduction processes near deep-sea trenches // *J. Geophys. Res.*, 1979, v. 84, № 5, p. 2303—2314.
- Global CMT Catalog**, 1976 to Present, 2016, <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>
- Gonzalez F., Geist E., Jaffe B., Kanoglu U., Mofjeld H., Synolakis C., Titov V., Arcas D., Bellomo D., Carlton D., Horning T., Johnson J., Newman J., Parsons T., Peters R., Peterson C., Priest G., Ventu-**

rato A., Weber J., Wong F., Yalciner A. Probabilistic tsunami hazard assessment at Seattle, Oregon, for near- and far-field sources // *J. Geophys. Res.*, 2009, v. 114, C11023, doi: 10.1029/2008JC005132.

Gusiakov V.K. «Red», «green» and «blue» Pacific tsunamigenic earthquakes and their relation with conditions of oceanic sedimentation // *Tsunamis at the end of a critical decade* / Ed. G. Hebenstreit. Dordrecht—Boston—London, Kluwer Academic Publishers, 2001, p. 17—32.

HTDB/WLD (Historical Tsunami Database for the World Ocean), 2000 BC to Present, Tsunami Laboratory, ICMMG SD RAS, Novosibirsk, 2016, <http://tsun.sccc.ru/nh/tsunami.php>

Iida K. The generation of tsunamis and the focal mechanism of earthquakes // *Tsunamis in the Pacific Ocean*, Honolulu, East-West Center Press, 1970, p. 3—18.

Kanamori H. Mechanism of tsunami earthquakes // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1972, v. 6, p. 346—359.

Knighton J., Bastidas L. A proposed probabilistic seismic tsunami hazard analysis methodology // *Nat. Hazards*, 2015, v. 78, p. 699—723, doi 10.1007/s11069-015-1741-7.

Leonard L., Roger G., Mazotti S. Tsunami hazard assessment of Canada // *Nat. Hazards*, 2014, v. 70, p. 237—274, doi: 10.1007/s11069-013-0809-5.

Miller D.J. Giant waves in Lituya Bay, Alaska // *Geological Survey Professional Paper 354-C*, U.S. Government Printing Office, Washington, 1960. p. 50—85.

National Police Agency of Japan, Emergency Disaster Countermeasures Headquarter, September 10, 2015, https://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higaijokyo_e.pdf

NGDC/WDS GHTDB (Global Historical Tsunami Database), 2000 BC to Present, 2016, NOAA National Geophysical Data Center, Boulder, USA, 2015, http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml

Power W., Downes G. Tsunami hazard assessment / Volcanic and tectonic hazard assessment for nuclear facilities / Eds. C. Connor, N. Chapman, L. Connor. Cambridge Univ. Press., 2009, p. 276—306.

Power W., Wallace L., Wang R., Reyners M. Tsunami hazard posed to New Zealand by the Kermadec and Southern New Hebrides subduction margins: an assessment based on plate boundary kinematics, interseismic coupling, and historical seismicity // *Pure Appl. Geophys.*, 2011, doi: 10.1007/s00024-011-0299-x.

Rabinovich A.B., Eble M.C. Deep-ocean measurements of tsunami waves // *Pure Appl. Geophys.*, 2015, doi 10.1007/s00024-015-1058-1.

Rabinovich A.B., Thomson R.E., Stephenson F.E. The Sumatra tsunami of 26 December 2004 as observed in the North Pacific and North Atlantic oceans // *Surv. Geophys.*, 2006, v. 27, p. 647—677.

Shevchenko G., Ivelskaya T., Loskutov A., Shishkin A. The 2009 Samoan and 2010 Chilean tsunamis recorded on the Pacific coast of Russia // *Pure Appl. Geophys.*, 2013, v. 170, p. 1511—1527, doi 10.1007/s00024-012-0562-9.

The tsunami of November 4, 1952 as recorded at tide stations, US Department of Commerce, Coast and Geodetic Survey, Special Publication № 300, 1953, 15 p.

The Chilean Tsunami of May 24, 1960 as observed along the coast of Japan // *Committee for Field Investigation of the Chilean Tsunami of 1960*, 1961, 397 p.

Topics 2000. Natural catastrophes — the current position. Special Millennium Issue // *Munich Re Group*, 2001, 126 p.

Vilibić I., Monserrat S., Rabinovich A.B. Meteorological tsunamis on the US East coast and in the other regions of the World Ocean // *Pure Appl. Geophys.*, 2014, v. 74, № 1, p. 1—9. doi:10.1007/978-3-310-12712-5_1.

WinITDB (Graphic shell for the Integrated Tsunami Database for the World Ocean), Version 5.16 of July 31, 2007, CD-ROM, Tsunami Laboratory, ICMMG SD RAS, Novosibirsk, Russia, 2007.

*Рекомендована к печати 1 декабря 2015 г.
В.С. Селезневым*

*Поступила в редакцию
8 октября 2015 г.*