

УДК 550.345

ОЦЕНКА ЦУНАМИОПАСНОСТИ ПОБЕРЕЖЬЯ ОХОТСКОГО МОРЯ ОТ РЕГИОНАЛЬНЫХ И УДАЛЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ

© 2015 г. В. К. Гусяков^{1,2}, Л. Б. Чубаров², С.А. Бейзель²

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
630090 Новосибирск, просп. Академика М.А. Лаврентьева, 6,
e-mail: gvk@sscc.ru

²Институт вычислительных технологий СО РАН
630090 Новосибирск, просп. Академика М.А. Лаврентьева, 6,
e-mail: chubarov@ict.nsc.ru

Поступила в редакцию 15.07.2014 г.

Цунамиопасность побережья Охотского моря требует тщательного анализа ввиду планируемого включения этой акватории в число зон ответственности Службы предупреждения о цунами, действующей на Дальневосточном побережье РФ. Не имея в своих пределах сейсмогенных зон, способных порождать опасные цунами, Охотское море тем не менее открыто для проникновения волн цунами, порождаемых источниками в других цунамигенных зонах Курило-Камчатского региона, а также всего Тихого океана. Проблема цунамиопасности побережья Охотского моря рассматривается в работе на основе материалов анализа исторических наблюдений и результатов численного моделирования распространения цунами от модельных очагов близких и удаленных землетрясений. Показано, что среди региональных землетрясений реальную угрозу цунами создают только очаги подводных землетрясений с магнитудой 8.5 и выше, расположенные в Курило-Камчатской сейсмогенной зоне. Среди удаленных цунамигенных зон Тихого океана наиболее опасны очаги мега-землетрясений класса М9 из южно-американской зоны и из зоны Папуа-Новая Гвинея, способные вызвать колебания с размахом до 5 м по всему побережью Охотского моря.

DOI: 10.7868/S0203030615040045

ВВЕДЕНИЕ

Одним из заданий Федеральной целевой программы “Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в РФ до 2015 года” предусмотрено включение Охотоморского побережья в зону ответственности Службы предупреждения о цунами, действующей на Дальневосточном побережье РФ с 1958 года. Реализация связанных с ним мероприятий требует оценки цунамиопасности этого побережья как на основе имеющихся исторических данных, так и на материалах численного моделирования. Не имея в своих пределах сейсмогенных зон, способных порождать опасные цунами, Охотское море тем не менее открыто для проникновения волн цунами, порождаемых источниками в Курило-Камчатской сейсмогенной зоне, а также в других, удаленных сейсмогенных зонах Тихого океана. Проблема цунамиопасности побережья Охотского моря рассматривается в статье на основе материалов анализа исторических наблюдений и результатов численного моделирования распространения цунами от модельных очагов близких и удаленных цунамигенных землетрясений. Поскольку анализ содержания базы данных

[Integrated..., 2014] показывает, что за исторический период (с 1737 года) в Дальневосточном регионе свыше 95% всех случаев опасных цунами было вызвано подводными землетрясениями, рассмотрение здесь ограничивается случаем сейсмогенных цунами. Возможный вклад цунами другого происхождения (вулканогенных, обвальных) также кратко обсуждается ниже.

Охотское море является одним из окраинных морей Тихоокеанского бассейна и отделяется от Тихого океана на юге островом Хоккайдо, на востоке цепочкой Курильских островов и полуостровом Камчатка. Татарский пролив соединяет Японское и Охотское моря через пролив Невельского, Амурский лиман и Сахалинский залив на севере, а проливом Лаперуза Охотское море соединяется с Японским морем на юге, однако в силу узости и мелководности этих проливов водообмен с Японским морем незначителен [Гидрометеорология..., 1998]. С Тихим океаном Охотское море соединено многочисленными Курильскими проливами, которые являются более широкими (их суммарная ширина составляет около 500 км) и глубоководными (глубины до 2000 м), что обеспечивает интенсивный водообмен, а также создает

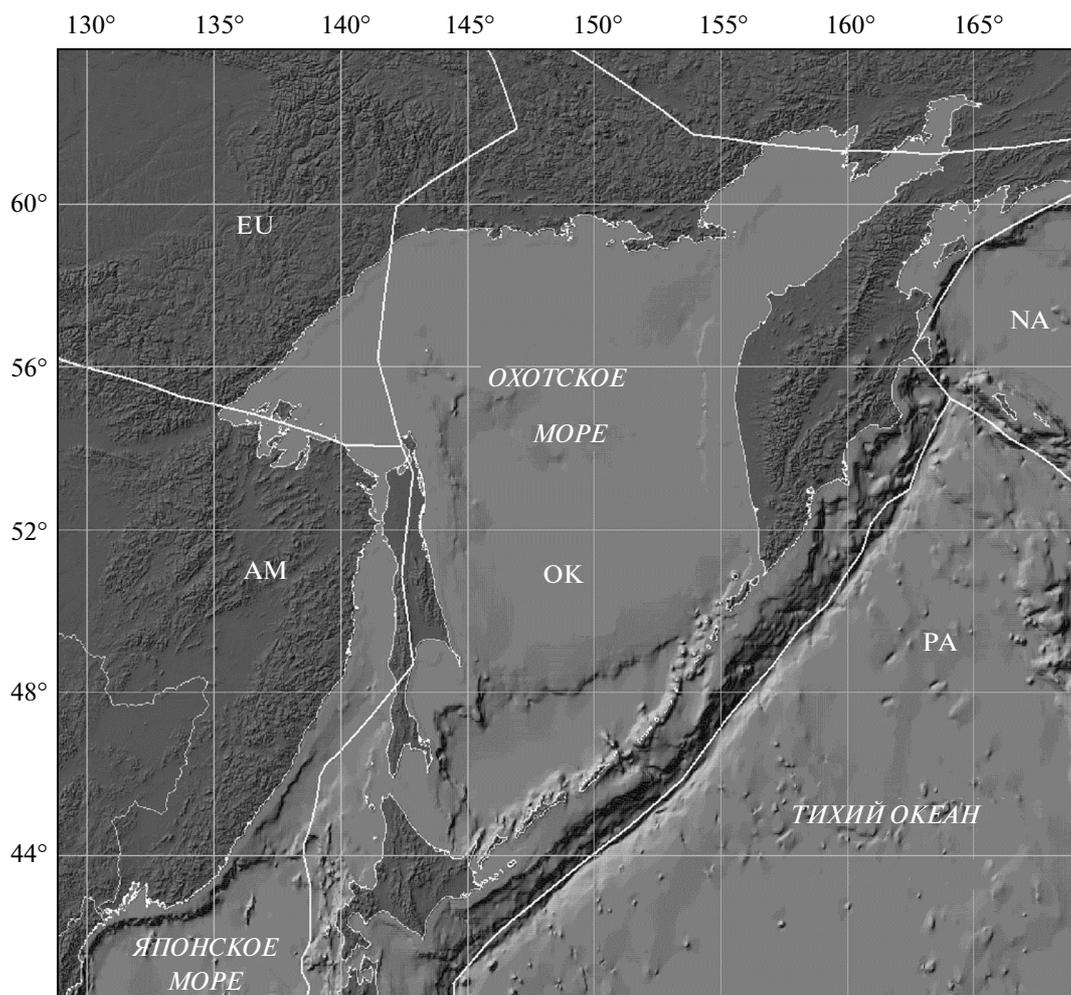


Рис. 1. Обзорная карта рельефа дна Охотского моря. Сплошные белые линии показывают границы плит (ПА – Тихоокеанская плита, NA – Северо-американская плита, ОК – Охотская плита, АМ – Амурская плита, EU – Евразийская плита).

возможность для достаточно свободного проникновения течений и волн цунами из Тихого океана в Охотоморский бассейн.

В тектоническом отношении море расположено на Охотской субплите, являющейся частью Евразийской плиты. Кора под большей частью Охотского моря континентального типа. Основными морфологическими элементами в рельефе дна Охотского моря являются шельф (глубины 0–200 м) и материковый склон (глубины 200–2000 м), на котором выделяются отдельные возвышенности и впадины, основной из которых является расположенная в его южной части Курильская глубоководная котловина, имеющая глубины более 2500 м (рис. 1).

Важной особенностью Охотского моря является наличие ледового покрова в течение большей части года (в среднем 6–9 месяцев). Здесь встречаются как неподвижные льды (припай), так и плавучие, представляющие собой основную фор-

му льдов Охотского моря. В январе и феврале льды покрывают всю северную и среднюю часть акватории, занимая до 75% поверхности моря. Толщина нарастающих в течение зимы льдов достигает 0.8–1.0 м [Гидрометеорология..., 1998]. Сильные штормы, приливные течения взламывают ледяной покров во многих районах моря, образуя торосы и большие разводья. В обычные годы южная граница сравнительно устойчивого ледяного покрова проходит от пролива Лаперуза до мыса Лопатка на южной оконечности Камчатки. Хотя крайняя южная часть моря обычно не замерзает, в нее выносятся с севера значительные массы льда, которые северо-западными ветрами прижимаются к Курильским островам и забивают некоторые проливы.

Представленные в статье результаты ограничены, в основном, рассмотрением сейсмогенных цунами, которые, как показывает анализ исторических дан-

ных, дают основной вклад в цунамиопасность исследуемого региона. В силу морфологических особенностей существенной части охотоморского побережья значительную опасность для него могут представлять также обвальные цунами, возникающие при подводных и береговых оползнях и обвалах [Важенин, 2005; Важенин, Лебединцев, 2006].

Отдельную проблему для охотоморского побережья представляют также вулканогенные цунами, порождаемые взрывами и обрушениями кальдер подводных и островных вулканов [Важенин, 2006]. Такие обрушения могут как возникать вследствие сейсмического воздействия, связанного с общим сейсмотектоническим процессом рассматриваемой здесь зоны, так и порождаться непосредственно вулканическим извержением, причем необязательно происходящим на конкретном вулкане.

В историческое время отмечены три случая возбуждения вулканогенных цунами в Охотском море. В атласе [Тихий океан, 1974] имеется указание на такое цунами, возникшее в 1918 г. в средней части Курильской гряды. Сильное цунами было вызвано вулканическим взрывом 8 января 1933 г., который уничтожил верхнюю половину центрального конуса вулкана Севергина на острове Харимкотан [Важенин, 2006]. Волны на ближайших островах достигали высоты до 9 м [Соловьев, 1978], при этом наблюдались три волны, вынесшие на берег большие глыбы льда. В результате извержения вулкана Сарычева на острове Матуа 13 ноября 1946 г. возникли “гигантские волны” на северо-западном берегу острова [Соловьев, 1978]. Фактическая высота их остается неизвестной, так как в то время полевых обследований следов цунами не проводилось.

По сравнению с типичными сейсмогенными цунами, волны, порождаемые вулканическими взрывами, обрушениями кальдер, а также береговыми оползнями и обвалами, имеют совершенно другую диаграмму направленности и закон убывания высоты волны с расстоянием. Как правило, они опасны только в ближайших окрестностях очаговой области. Служба предупреждения цунами в ее настоящем виде не имеет средств оперативного прогноза таких цунами, однако возможность их возникновения должна учитываться при планировании защитных мероприятий для конкретных населенных пунктов.

СВЕДЕНИЯ ОБ ИСТОРИЧЕСКИХ ЦУНАМИ В ОХОТСКОМ МОРЕ

Данные о проявлениях в Охотском море весьма скудны, однако следует заметить, что их систематического поиска по первоисточникам до сих пор не проводилось. По-видимому, самым первым упоми-

нением о проявлении цунами в Охотском море следует считать сообщения С.П. Крашенинникова [1994] о катастрофическом Камчатском землетрясении 10 октября 1737 г., с которого начинается сейсмический каталог всего Дальнего Востока. Очаг землетрясения располагался у восточного побережья Камчатки, примерно в той же области, которая спустя 215 лет была активирована очагом Камчатского землетрясения 1952 г. Сведения С.П. Крашенинникова о цунами 1737 г. в основном относятся к тихоокеанскому побережью Северных Курил и Камчатки, где на острове Парамушир наблюдались максимальные высоты заливания, достигавшие 64 м (30 саженой). В районе Авачинского залива были замечены волны высотой до 30 м. На западной стороне Камчатки цунами было, конечно, существенно слабее. В 25 км южнее Большерецка волны свободно перекатывались в озеро, соединенное протокой с р. Большой. Возможная высота волн здесь находилась в пределах от 2 до 5 м.

Данных о проявлениях в Охотском море Камчатского землетрясения 4 ноября 1952 г., моментная магнитуда которого сейчас оценивается величиной 9.0, несколько больше, но и они являются далеко не полными. На западной стороне мыса Лопатка высота волн достигала 5 м, при этом на океанском побережье мыса наблюдались волны высотой 10 м. В пос. Озерное — от 3 до 5 м, в пос. Колпаково — 0.5 м [Исторические сведения..., 1998].

На западном побережье мыса Васильева (о. Парамушир) наблюдались волны высотой до 4.5 м (с океанической стороны при этом — до 6.6 м), в пос. Шелехово на северном побережье острова — от 3 до 6 м, на острове Алаид высота волн достигала 1.5 м, на Сахалине (Корсаков) — 1 м, в Магадане — 2 м [Соловьев, 1978]. Согласно сведениям, приведенным в работе [Саваренский и др., 1958], последнее наблюдение относится к максимальной амплитуде волны, записанной мареографом в Магадане, и оно является очень важным, как с точки зрения оценки возможных высот на континентальном Охотском побережье при сильнейших региональных землетрясениях, так и с точки зрения проверки адекватности численных моделей региональных цунами.

Чилийское цунами 22 мая 1960 г. было вызвано сильнейшим ($M_w = 9.5$) за весь инструментальный период сейсмологических наблюдений землетрясением у побережья Чили [The Chilean Tsunami..., 1961]. Землетрясение вызвало трансокеанское цунами, которое распространилось на весь Тихий океан и достигло его противоположных берегов, сохранив свой разрушительный потенциал. На Дальневосточном побережье РФ максимальные высоты заплеска, достигавшие 7 м, были измерены

на восточном побережье Камчатки, в бухтах Моржовая и Русская [Заякин, 1996]. Сквозь курильские проливы цунами проникло в Охотское море и вызвало значительные колебания его уровня, продолжавшиеся более двух суток. В бухте Нагаева в течение двух суток (24 и 25 мая) происходили колебания уровня с периодом собственных колебаний бухты (около 1 ч 10 мин) и амплитудой до 2 м [Важенин, 2010]. Стоявшие на якорях в морском порту катера и баржи поднимались и опускались на грунт. Был отмечен неестественно быстрый дрейф льда в сторону вершины бухты, несмотря на отлив и отсутствие ветра, в результате чего бухта и порт оказались заполнены крупнобитым льдом до 8 баллов [Исторические сведения..., 1998]. Мареограф в бухте Нагаева зафиксировал несколько последовательных цугов. Первый из них включал 10 крупных колебаний, продолжавшихся около 12 часов, максимальный размах которых достиг 2.67 м [Ким, Рабинович, 1990]. Высота волн этого цунами на побережье Сахалина оказалась существенно меньшей и составила в Корсакове 1.2 м, в Поронайске — 0.8 м, в Катангли — 0.6 м, на мысе Крильон — 0.4 м, в Холмске — 0.1 м [Соловьев, 1978].

Второе сильнейшее трансокеанское цунами XX века — Аляскинское 28 марта 1964 г. — имело слабое проявление на дальневосточном побережье России. Максимальная высота подъема уровня составила 1 м (в пос. Подгорном, на восточном побережье острова Парамушир), в г. Северо-Курильске мареограф записал волны высотой 0.8 м, в пос. Бабушкино на острове Шумшу — 0.7 м [Соловьев, 1978]. На Сахалине максимальная высота волн этого цунами была зарегистрирована в Корсакове (0.4 м). По охотоморскому побережью данных о проявлениях этого цунами нет.

Чилийское цунами 27 февраля 2010 года, вызванное землетрясением с магнитудой $M_w = 8.8$, было записано мареографом в Магадане с максимальной высотой около 0.8 м [Шевченко, Ивельская, 2013], что всего в полтора раза меньше, чем максимальная высота этого цунами (1.19 м), записанная мареографом на восточном побережье Камчатки в бухте Водопадная [Шевченко и др., 2012].

Последнее по времени трансокеанское цунами — Тохоку 11 марта 2011 г. — вызвало опасные колебания уровня на восточном побережье Курильских островов и Камчатки, продолжавшиеся в ряде мест более суток. Максимальные высоты волн (до 3 м) отмечены в бухте Крабовая на западном берегу острова Шикотан, при этом на его восточном побережье уровни заливания не превышали 1.5 м. В Мало-Курильске мареограф записал колебания с размахом до 2.3 м. Максимальное заливание в Северо-Курильске достигало 2.5 м, в Буревестнике (о-в Итуруп) — 2 м. На побережье Сахалина наблюдались

только фоновые колебания уровня — максимальные высоты волн по записям мареографов были 0.47 м (Корсаков), 0.33 м (Стародубское), 0.38 м (Поронайск) [Кайстренко и др., 2011]. Мареограф в Магадане, однако, записал существенно более сильные колебания с амплитудой до 1.0–1.1 м, причем эти максимальные колебания с размахом до 2 м наблюдались спустя 7–9 часов после прихода первой волны [Тюрнин, 2014].

Проникновение в акваторию Охотского моря колебаний уровня, порожденных обычными цунамигенными землетрясениями, возникающими на континентальном склоне Курильской островной дуги, по-видимому, носит ограниченный характер, включая даже те из них, которые вызвали опасные (с высотами более 5 м) цунами на ближайшем побережье. Одно из сильнейших таких землетрясений произошло 7 ноября 1958 г. в районе острова Итуруп. Несмотря на значительную магнитуду ($M_s = 8.1$), максимальная высота заплеска на ближайшем берегу составила лишь 5 м [Соловьев, 1978]. Мареограф в Корсакове записал колебания уровня с размахом до 0.2 м. По охотоморскому побережью данных нет.

Следующие сильные подводные землетрясения произошли возле острова Уруп 13 и 20 октября 1963 г. Магнитуда M_s первого оценивается величиной 8.1, оно вызвало 5-метровое цунами на ближайшем берегу. Сейсмический эффект второго землетрясения был гораздо ниже ($M_s = 7.2$), но цунами на ближайшем берегу достигло 15-метровой отметки. В Курильске от первого землетрясения мареограф зафиксировал подъем уровня до 0.7 м, на Сахалине колебания с амплитудой 0.4 м были записаны в Корсакове, Катангли, на мысе Крильон. Волны были также зарегистрированы мареографами в Магадане (0.1 м) и в Аяне (0.2 м). Волны от второго землетрясения (20 октября) в тех же пунктах были существенно ниже — в Курильске 0.3 м, в Корсакове, Катангли и на мысе Крильон — 0.1 м [Соловьев, 1978]. По магаданскому побережью данных нет.

В районе Южных Курил два сильных цунамигенных землетрясения произошли к востоку от острова Шикотан 11 августа 1969 г. ($M_w = 8.2$) и 4 октября 1994 г. ($M_w = 8.3$). Максимальные высоты заплеска на ближайшем побережье (восточный берег острова Шикотан) при этом составили 5 м и 10.4 м соответственно. Оба эти события также вызвали только фоновые колебания уровня Охотского моря. В 1969 г. мареограф Курильска записал волну с высотой 0.6 м, мареографы Корсакова — 0.25 м, Крильона — 0.3 м. В 1994 г. максимальная высота волн на записях в Курильске составила 0.2 м, в Корсакове мареограф не работал, данных по м. Крильон обнаружить не удалось. По

охотоморскому побережью данных об этих двух событиях нет.

Наконец, последние по времени сильные цунамигенные землетрясения произошли в центральной части Курильской гряды. Это Симуширские землетрясения 15 ноября 2006 г. ($M_w = 8.3$) и 11 января 2007 г. ($M_w = 8.1$). В этот период постоянного населения на ближайших к очагам островах (Симушир, Кетой, Расшуа, Матуа) уже не было, поэтому данные о накатах волн были получены только в результате экспедиционного обследования, выполненного летом 2007 г. [Левин и др., 2008]. Наиболее высокие заплески, достигавшие 20 м, были выявлены на восточном побережье острова Матуа. По ряду признаков они были ассоциированы с цунами от первого землетрясения (15 ноября 2006 г.). Считается, что волны от второго землетрясения были в несколько раз слабее и на ближайших островах не превышали по высоте нескольких метров [Лобковский и др., 2009].

Волны цунами от землетрясения 15 ноября 2006 г. были четко записаны мареографом в Магадане в виде цуга из 8–10 волн, имевших период около 1 ч и максимальный размах 0.63 м [Лобковский и др., 2009]. Второе цунами на записях мареографа Магадана идентифицировать не удалось из-за низкого соотношения сигнал/шум. На северо-восточном побережье Сахалина из-за отсутствия работающих мареографов инструментальных записей обоих Симуширских цунами получено не было.

Рассмотрим теперь случаи возникновения цунами от сейсмических источников, расположенных собственно в бассейне Охотского моря. Несмотря на то, что Курило-Камчатская сейсмофокальная зона продолжается далеко вглубь Охотского моря, ее наклонное положение приводит к тому, что уже в ближайшей задуговой части зоны глубины очагов возрастают до 80–100 км, что резко снижает их цунамигенный потенциал. Фактически, достоверные случаи возникновения цунами от подводных землетрясений с очагами на западной стороне Курильской островной дуги в Дальневосточном каталоге цунами отсутствуют.

Непосредственно внутри акватории Охотского моря сильнейшее за всю историю инструментальных наблюдений глубокофокусное (глубина гипоцентра, по данным Геологической службы США, 630 км) землетрясение с магнитудой $M_s = 8.3$ произошло 24 мая 2013 г. Сейсмические колебания от этого землетрясения ощущались на огромной территории, в западном направлении вплоть до Нижнего Новгорода и Москвы. Хотя тревога при этом событии была первоначально объявлена Саха-

линским центром цунами, заметных его проявлений на берегу не было.

Единственный известный случай генерации цунами собственно в Охотском море упомянут в японском каталоге цунами [Iida, 1984]. Он связан с землетрясением, имевшим магнитуду $M_s = 6.2$, 5 марта 1956 г. на глубине 20 км вблизи северного побережья острова Хоккайдо. Высота волны цунами, зарегистрированная при этом мареографом Абашири, составила 0.4 м, данных о регистрации мареографами на Сахалине нет.

В базе данных по цунами, поддерживаемой ИВ-МиМГ СО РАН (ITDB/WLD, 2014), имеются всего два события, связанных с сахалинскими землетрясениями, очаги которых могут быть отнесены к акватории Охотского моря. Первое из них с магнитудой $M_s = 6.8$ случилось 15 марта 1924 г. в районе Углегорска, когда было отмечено “сильное волнение воды в реке” [Соловьев, 1978]. Второе – разрушительное Нефтегорское землетрясение 27 мая 1995 г. с $M_s = 7.5$, после которого были зафиксированы колебания уровня с высотой до 0.1 м.

Инструментально зарегистрированная сейсмичность собственно охотоморского шельфа является весьма слабой. Наивысшая магнитуда, зарегистрированная здесь за весь период инструментальных наблюдений, не превышает 6.6 (землетрясение 15 июля 1931 г. в районе Магадана). Землетрясения такой магнитуды сами по себе не способны вызывать опасное цунами, однако они могут инициировать подводный оползень или береговой обвал, результатом которого могут быть локальные цунами с заплесками практически любой высоты.

При рассмотрении сейсмичности, основанном на макросейсмических наблюдениях, в более широком временном интервале выясняется, что в прошлом в районе охотоморского побережья происходили значительно более сильные землетрясения. Например, Ямское землетрясение 27 ноября 1851 г. с магнитудой, равной 6.5 ± 0.5 [Новый каталог..., 1977], произошедшее в 150 км к востоку от Магадана. Еще более сильные голоценовые землетрясения, с магнитудой до 7.5, выявлены по палеосейсмологическим данным [Важенин, 2000].

Таким образом, анализ имеющихся исторических сведений о проявлениях цунами на побережье Охотского моря показывает, что реально опасными для него являются очаги сильнейших региональных землетрясений, начиная с магнитуды $M_w = 8.5$, происходящие на континентальном склоне Курило-Камчатской зоны, а также предельно сильные (с магнитудой $M_w = 9.0$ и выше) подводные землетрясения из других цунамигенных зон Тихого океана (впрочем, далеко не всех). Для

более точного определения магнитудных порогов опасных для охотоморского побережья событий и районов расположения очагов была выполнена серия расчетов возбуждения и распространения цунами, результаты которых описываются ниже.

АНАЛИЗ ПРОЯВЛЕНИЯ ЦУНАМИ ОТ РЕГИОНАЛЬНЫХ ОЧАГОВ ПО МАТЕРИАЛАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Анализ проявления на побережье Охотского моря цунами от региональных очагов проводился по результатам серии расчетов, для которых использовался программный комплекс MGC [Чубаров и др., 2011], реализующий вычислительную схему типа МакКормака, аппроксимирующую классические уравнения нелинейной теории мелкой воды, записанные в сферической системе координат [Shokin et al., 2008]. В качестве модельного очага цунами использовались статические смещения дна океана, рассчитанные для пространственного дислокационного источника на основе формул, полученных в работах [Гусяков, 1978; Okada, 1985]. Сейсмический момент M_0 такого источника задается формулой

$$M_0 = \mu LWD_0,$$

где μ – модуль жесткости среды (его значение принималось равным 5×10^{10} Нм⁻²), L – длина плоскости разрыва, W – ширина плоскости разрыва, D_0 – подвижка по разрыву. Связь сейсмического момента с величиной моментной магнитуды модельных очагов устанавливалась на основе формулы [Kanamori, 1977].

$$Mw = (\lg M_0 - 9.1)/1.5.$$

Рассчитанные для плоской границы однородного полупространства смещения накладывались на реальный рельеф дна в очаговой области, при этом возникающими дополнительными возмущениями (например, нарушением стабильности подводных склонов) и вкладом горизонтальной компоненты смещений дна пренебрегалось. Смещения дна считались возникшими мгновенно, поскольку реальная продолжительность движений в очагах цунамигенных землетрясений (50–100 сек), все еще мала по сравнению с типичными периодами волн цунами (5–15 мин для региональных цунами и до 30–40 мин в случае трансокеанских цунами). Такой подход к моделированию возбуждения цунами является в настоящее время общепринятым и применяется в большинстве работ по расчетам цунами на конкретных участках акватории Мирового океана, выполняющихся как в России, так и за рубежом.

В ходе расчетов моделировались генерация и распространение в акватории Охотского моря волн, порожденных модельными очагами цунамигенных землетрясений, моментные магнитуды которых изменялись в диапазоне от 7.8 до 9.0. Очаги этих землетрясений (в дальнейшем будем называть их “базовыми”) располагались на восточном склоне Курильской островной дуги в полосе шириной примерно 100 км на глубинах от 5 до 35 км (рис. 2), их механизм был типичным для цунамигенных землетрясений этой зоны, представляя собой пологий (угол наклона порядка 15°) разрыв вдоль главной литосферной границы раздела между пододвигающейся океанической корой и перекрывающей ее островодужным выступом континентальной литосферы [Лобковский, Баранов, 1982]. Расстояние между эпицентрами базовых очагов изменялось от 125 км для землетрясений с $Mw = 7.8$ (при длине площадки разрыва 108 км) до 500 км для $Mw = 9.0$ (при длине площадки разрыва 430 км). Ориентация плоскости разрыва в очагах модельных источников выбиралась соответствующей простиранию сейсмогенной зоны.

Для выяснения влияния небольших вариаций в положении очага вдоль простирания сейсмогенной зоны на амплитуды волн на охотоморском побережье были рассмотрены также “дополнительные” очаги с магнитудой $Mw = 9.0$, эпицентры которых смещались к юго-западу и к северо-востоку от “базового” очага (c) с шагом около 45 км (см. рис. 2).

Моделирование распространения цунами проводилось в прямоугольной области, простиравшейся от 127° до 180° в.д. и от 32° до 63° с.ш., на равномерной сетке с шагом 1 угловая минута, построенной на основе известного одномоментного батиметрического массива [GEBCO, 2008]. Результаты расчетов представлялись в форме распределений экстремальных (максимальных положительных и минимальных отрицательных) амплитуд волн, рассчитанных вдоль побережья Охотского моря и зарегистрированных виртуальными мареографами (см. рис. 2), установленными в ближайших к суше морских узлах расчетной сетки на глубине 30 м. Не менее информативными оказались “диаграммы свечения” – распределения максимальных за все время расчета значений амплитуд цунами в каждой точке расчетной области. Такие диаграммы наглядно демонстрируют направления и трассы распространения энергии цунами, помогают определять участки побережья, на которых возникают наиболее интенсивные колебания.

Как можно было предполагать, основным параметром, определяющим степень цунамиопасности подводных землетрясений в Курило-Камчатской зоне для охотоморского побережья, является их магнитуда (рис. 3). Очаги с магнитудами

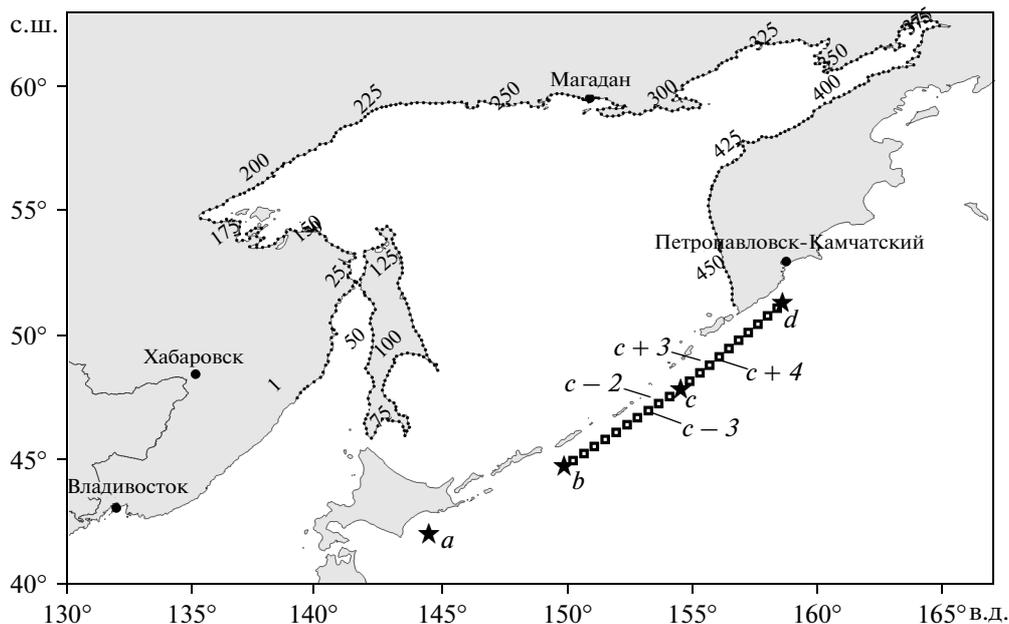


Рис. 2. Фрагмент схемы расчетной области для моделирования региональных цунами. Черными точками показано размещение виртуальных мареографов, их нумерация соответствует приведенным на рис. 4 и 7 распределениям экстремальных (максимальных положительных и минимальных отрицательных) амплитуд волн. Звездочки указывают положение центров площадок разрывов базовых модельных очагов с $M_w = 9.0$, квадратики – рассматриваемых дополнительных очагов. Упоминаемые в тексте модельные очаги помечены индексами.

$M_w = 7.8$ и менее практически не создают опасных колебаний уровня на исследуемом побережье при любом положении очага вдоль сейсмогенной зоны. Создаваемые ими амплитуды не превышают 0.45 м для восточного побережья Сахалина и 0.35 м для колымского побережья. Опасные (с амплитудой более 0.5 м) волны на этих побережьях начинают возникать при землетрясениях с магнитудой $M_w > 8.0$. Для очага с магнитудой $M_w = 8.4$ (см. рис. 3б), расположенного на континентальном склоне напротив острова Магуа, высота волн на восточном побережье Сахалина достигает 2.5–3.0 м, а на колымском побережье – 1.5–2.0 м. Однако по-настоящему опасные волны цунами возникают при приближении магнитуды к значению $M_w = 9.0$. При этом средние положительные амплитуды волн могут достигать 3–4 м как на восточном побережье Сахалина, так и на континентальном охотоморском побережье; а максимальные амплитуды – 5–6 м (см. рис. 3в, рис. 4).

Как уже было отмечено выше, наличие многочисленных глубоководных и широких Курильских проливов создает возможность для достаточно свободного проникновения волн цунами в охотоморский бассейн. Численное исследование зависимости цунамиопасности охотоморского побережья от положения очагов цунамигенных землетрясений относительно островов Курильской гряды показало, что для достаточно протяженных (при

$M_w > 8$) очагов даже крупные острова (Парамушир, Симушир, Итуруп) не являются непреодолимым барьером. Через проливы волновая энергия проникает в Охотское море и далее распределяется по всей его акватории, при этом вариации колебаний уровня в конкретных точках побережья определяются почти исключительно локальными условиями.

Как следует из рассчитанных диаграмм свечения, для острова Сахалин наибольшую опасность представляют очаги, расположенные между базовыми очагами (b) и (c) (см. рис. 2). При смещении к очагу (c) повышаются амплитуды на севере острова.

На континентальном побережье Охотского моря явно выделяются две цунамиопасные зоны (см. рис. 3), первая из которых включает Охотск и Иню, а вторая – Магадан и окрестности Балаганного и Тауйска. Существование двух преобладающих зон концентрации энергии обнаруживается уже на “южном” варианте (очаг b на рис. 2). При продвижении к северу они становятся все более выраженными, достигая своего максимума в сценарии, основанном на очаге (c – 3) (здесь и далее использованы условные индексы очагов, показанные на рис. 2). На западное побережье Камчатки наибольшее влияние оказывают волны цунами, порожденные очагами (c + 3), (c + 4).

Локальные вариации высот у береговых пунктов при смещении положения источников оцени-

вались для трех виртуальных мареографов, близких к населенным пунктам Аян, Охотск, Магадан. Оказалось, что наибольшую опасность для п. Аян представляет источник ($c - 3$), порождающий волны с амплитудами порядка 2 м и размахом около 4 м. Соседние с ним мареографы, расположенные на противоположной (северной) стороне мыса, регистрируют более слабый волновой режим.

Относительная гладкость береговой линии вблизи Охотска приводит к практически одинаковым распределениям амплитуд для каждого из ближайших виртуальных мареографов. Здесь максимумы положительных амплитуд достигаются волной, порожденной очагом ($c - 2$), однако отрицательных экстремумов оказывается два, один из которых соответствует очагу ($c - 3$), а второй – очагу ($c + 3$).

Наиболее сложная картина наблюдается в окрестности Магадана, и связана она с конфигурацией береговой линии прилегающей акватории, которая в этом случае довольно сложна. Так, на мареографе, находящемся в глубине бухты Нагаева, максимальные значения достигаются для очага (d) (положительная амплитуда 3.9 м, размах 8.3 м). В том случае, когда очаг оказывается практически на треть закрыт полуостровом Камчатка, происходит захват волной энергии (западным) камчатским шельфом и ее вторичное излучение в сторону Магадана (рис. 5).

Таким образом, анализ диаграмм свечения показывает, что распределение волновой энергии вдоль охотоморского побережья крайне неравномерно и определяется не только ориентацией и местом расположения источника, но также резонансными свойствами прилегающих к побережью участков шельфа.

Результаты расчетов позволяют сделать вывод о том, что цунамигенные землетрясения с магнитудами M_w до 8.5, возникающие на континентальном склоне Курильской дуги, хотя и создают заметные колебания уровня, но фактически не представляют серьезной угрозы для охотоморского побережья. Анализ диаграмм свечения показывает, что цунами, возникающие на материковом склоне Курило-Камчатского желоба, способны через проливы проникать в Охотское море, однако проходящая туда энергия достаточно быстро рассеивается на его обширной акватории.

Иная ситуация имеет место для предельно сильных (класса M_9) землетрясений, подобных происходившим в 1737 и 1952 гг. у побережья

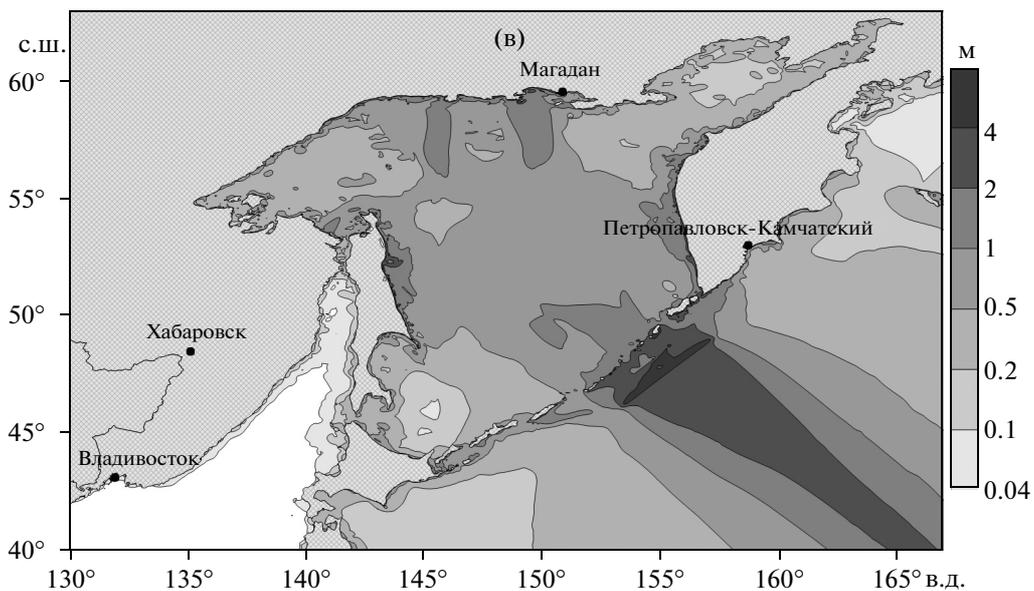
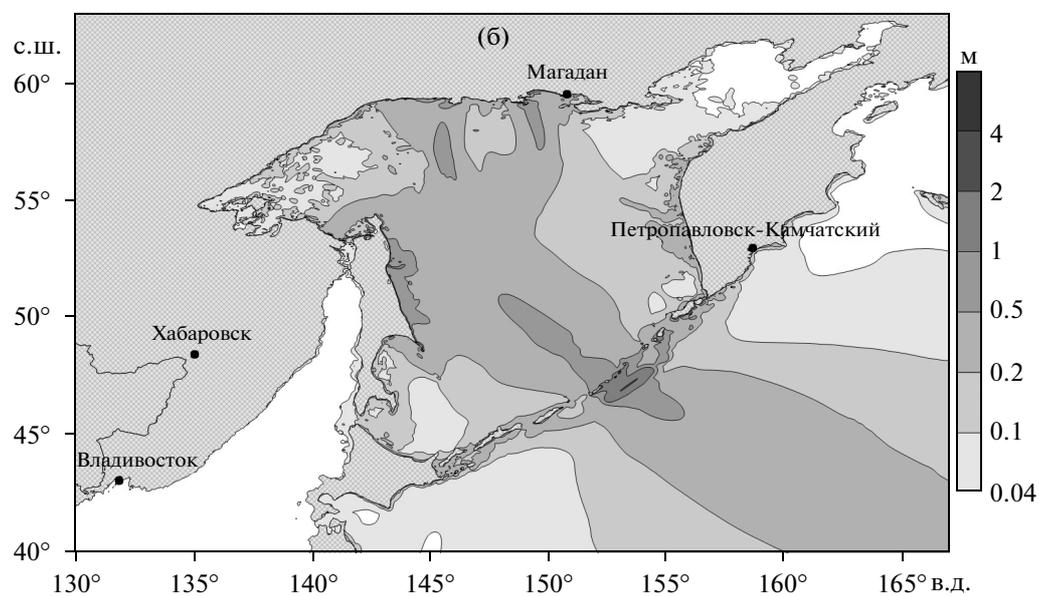
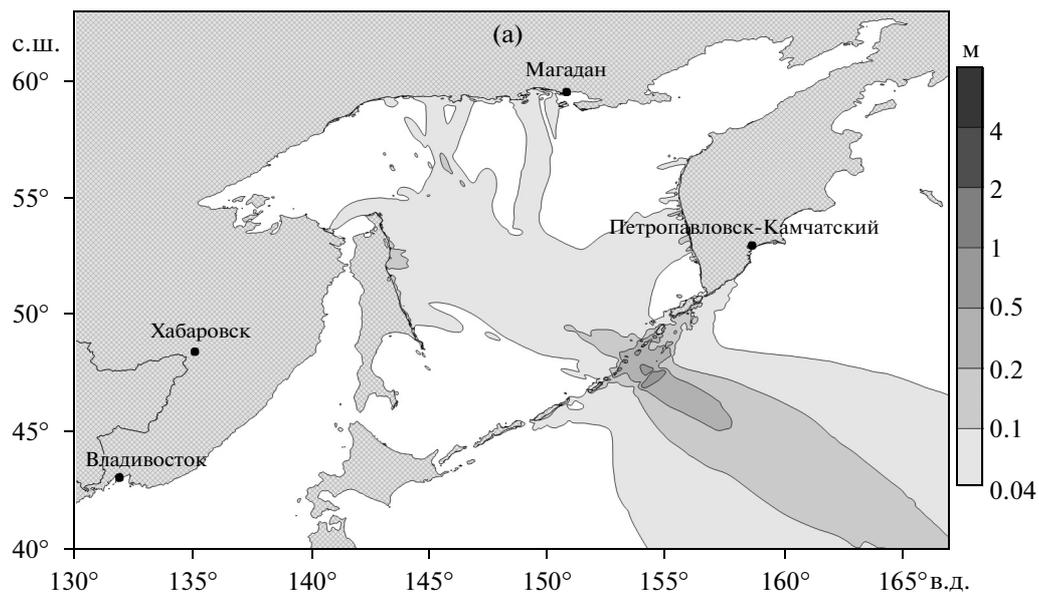
Камчатки и в 2011 году у побережья Японии. Энергия возникающих от них цунами столь велика, что способна вызывать резонансные колебания всего бассейна окраинного моря, которые могут продолжаться несколько суток. Они, в свою очередь, способны вызвать резонансное взаимодействие с модами собственных колебаний прилегающих участков шельфа, отдельных бухт и заливов, результатом чего могут являться сильные течения и заливания берегов на высоты до нескольких метров. Причем времена наступления максимумов таких колебаний зависят от многих факторов, в частности, погодных условий и фазы прилива, поэтому они являются труднопрогнозируемыми и могут возникать спустя много часов (и даже суток) после прихода первого возмущения.

АНАЛИЗ ОПАСНОСТИ УДАЛЕННЫХ ЦУНАМИ ПО МАТЕРИАЛАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Как следует из анализа данных исторических наблюдений, охотоморское побережье является более уязвимым к воздействию трансокеанских цунами из удаленных цунамигенных зон Тихого океана, чем к воздействию региональных цунами. По крайней мере, максимальные колебания уровня в районе Магадана были связаны именно с трансокеанскими цунами – Чилийским 1960 г. и Тохоку 2011 г.

Для более точной оценки потенциала удаленных цунамигенных зон, угрожающих Дальневосточному побережью России, было выполнено специальное исследование, результаты которого опубликованы в работе [Бейзель и др., 2014]. В ней на основе численного моделирования распространения цунами от основных цунамигенных зон Тихого океана, проведенного на равномерной сетке с шагом 2 угловые минуты в прямоугольной расчетной области, простиравшейся от 100° в.д. до 60° з.д. и от 60° ю.ш. до 65° с.ш., было показано, что реальную опасность представляют только предельно сильные (с магнитудой $M_w = 9.0$ и выше) подводные землетрясения. Причем величина этой опасности существенным образом зависит от расположения удаленной очаговой зоны по отношению к Дальневосточному побережью России. Помимо хорошо известной южно-чилийской зоны, максимум излучения которой направлен непосредственно в сторону Дальневосточного побережья, была выявлена также опасная зона в районе

Рис. 3. Диаграммы свечения для модельных очагов с магнитудами $M_w = 7.8$ (а), $M_w = 8.4$ (б), $M_w = 9.0$ (в), расположенных в Курило-Камчатской зоне.



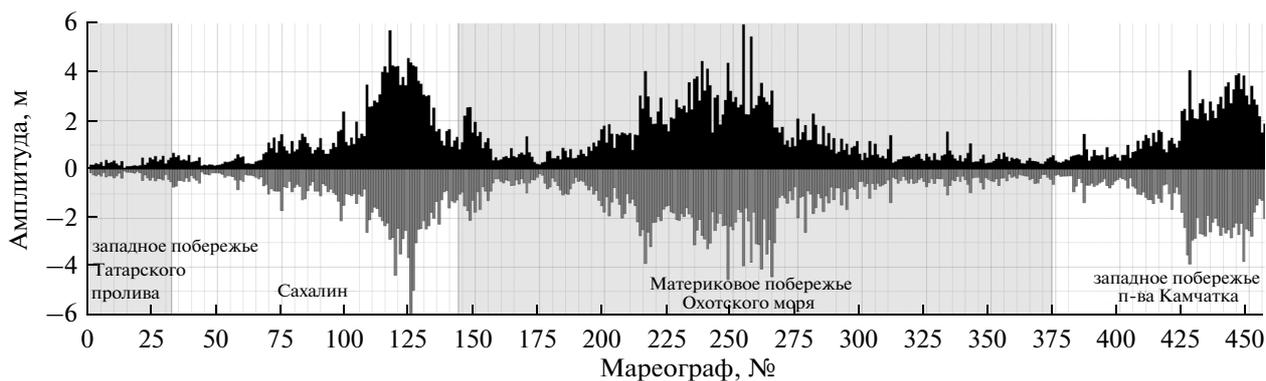


Рис. 4. Распределения максимальных положительных и отрицательных амплитуд волн (черные и серые столбцы соответственно), порожденные базовым модельным очагом (с) с магнитудой $M_w = 9.0$.

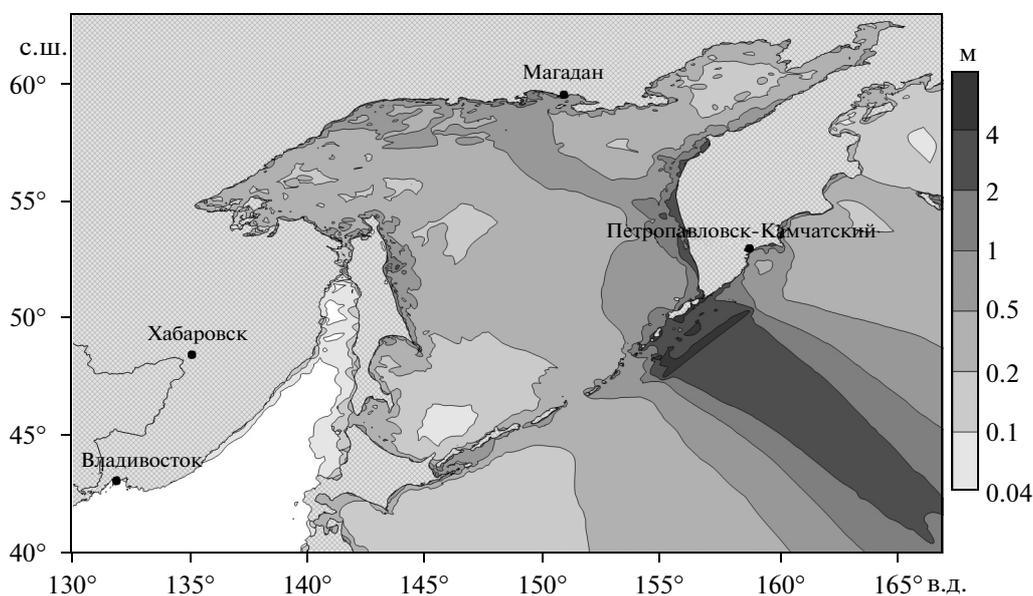


Рис. 5. Диаграмма свечения для модельного очага с магнитудой $M_w = 9.0$, расположенного вблизи южной оконечности п-ва Камчатка и порождающего цунами, наиболее опасное для прилегающего к г. Магадан побережья (максимальная амплитуда 3.9 м, соответствующий размах волны 8.3 м).

Новой Гвинеи и Соломоновых островов. Очаги, расположенные в ее пределах, также способны создать опасные колебания уровня на Дальневосточном побережье РФ (рис. 6).

Анализ расчетных мареограмм от южно-чилийских землетрясений с магнитудой $M_w = 9.0$, рассчитанных для континентального охотоморского побережья, показывает, что максимальные высоты волн здесь могут превышать 2 м. Аналогичны значения для восточного побережья Сахалина и западного побережья Камчатки (рис. 7). Высоты от землетрясений из района Папуа-Новая Гвинея несколько меньше, но и они (рис. 8) существенно превышают опасный порог (0.5 м).

Особенностью воздействия удаленных цунами является, во-первых, то, что значительные амплитуды колебаний наблюдаются на довольно протяженных участках охотоморского побережья, и, во-вторых, то, что время наступления максимума колебаний может значительно (иногда на десятки часов) запаздывать по отношению ко времени прибытия первой (головной) волны цунами из-за существования альтернативных трасс распространения волн цунами с преобладающими амплитудами (см., например, [Kowalik, 2008]).

В этом главное их отличие от цунами, порожденных местными землетрясениями, зона максимального воздействия которых ограничивается ближайшими к очагу участками побережья, а максималь-

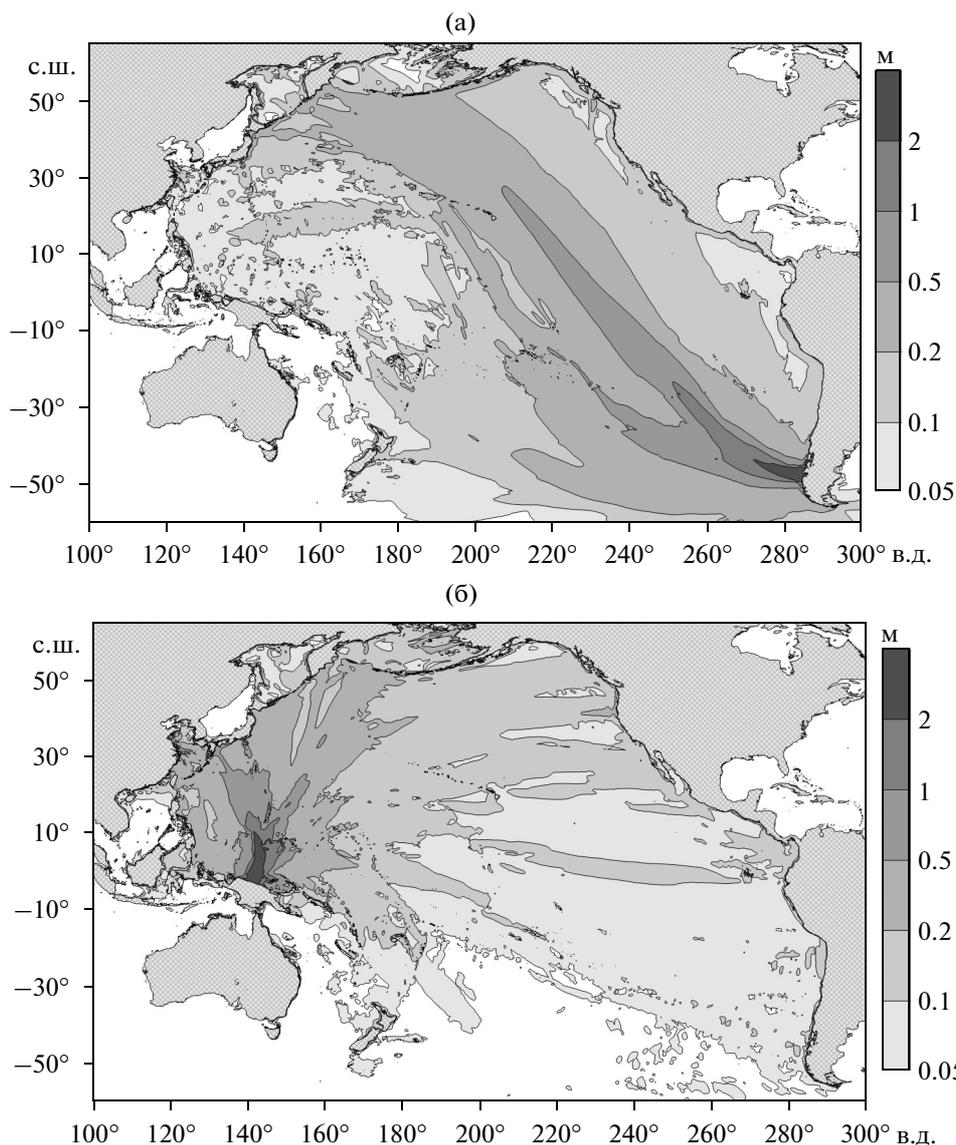


Рис. 6. Диаграммы свечения для модельных очагов с магнитудой $M_w = 9.0$, расположенных у побережья Чили (а) и Папуа-Новой Гвинеи (б).

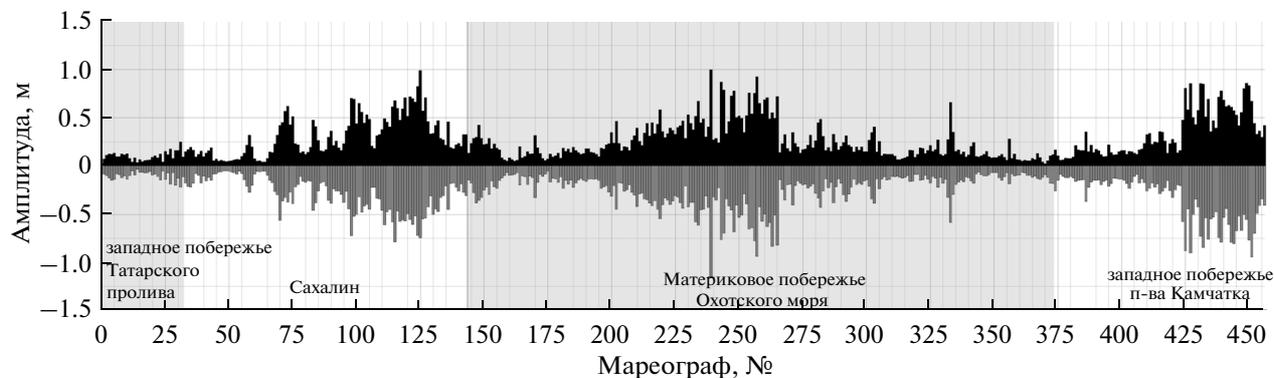


Рис. 7. Распределения максимальных положительных и отрицательных амплитуд волн вдоль охотоморского побережья (черные и серые столбцы соответственно), порожденных модельным очагом с $M_w = 9.0$ в районе южного Чили.

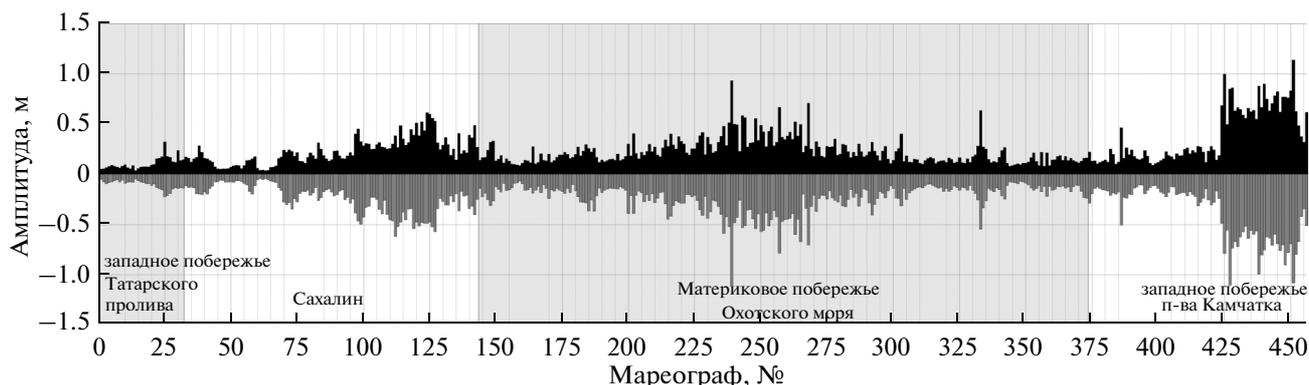


Рис. 8. Распределения максимальных положительных и отрицательных амплитуд волн вдоль охотоморского побережья (черные и серые столбцы соответственно), порожденных модельным очагом с $M_w = 9.0$ в районе Папуа-Новой Гвинеи.

ная волна приходит вскоре после первой головной волны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

На основании рассмотрения имеющихся материалов реальных наблюдений цунами на охотоморском побережье и результатов моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Охотское море не имеет непосредственно внутренней акватории собственных цунамигенных зон, способных породить сильные сейсмогенные цунами. Однако оно открыто воздействию региональных цунами, порождаемых сильными ($M > 8$) подводными землетрясениями Курило-Камчатской зоны, а также проникновению сильнейших трансокеанских цунами, порождаемых мега-землетрясениями ($M \geq 9$) в других цунамигенных зонах Тихого океана, в первую очередь, в южно-американской.

2. Результаты численного моделирования показывают, что опасные (с высотой более 0.5 м) колебания уровня в западной части охотоморского побережья от Курило-Камчатских землетрясений могут начинаться уже при магнитуде $M_w = 8.0$. При магнитуде $M_w = 8.4$ размах колебаний уровня в районе Магадана может достигать 2 м, а при магнитуде $M_w = 9.0$ – превышать 8 м. Такие цунами, несомненно, окажут разрушительное воздействие на все прибрежные населенные пункты колымского побережья.

3. Изучение вариаций колебания уровня Охотского моря в зависимости от положения очага вдоль Курильской гряды показывает, что для достаточно протяженных (при $M > 8$) очагов даже крупные острова (Парамушир, Симушир, Итуруп) не являются значительным барьером. Через проливы волновая энергия проникает в Охотское море и далее распределяется по всему его бассейну, при этом вариации колебаний уровня в конкретных точках определяются почти исключительно локальными

условиями (батиметрией прилегающих участков шельфа, резонансными свойствами бухт и заливов).

4. Расположение очага вблизи южной оконечности Камчатского полуострова приводит к захвату волновой энергии западным камчатским шельфом и ее вторичному излучению в сторону Магадана, при этом амплитуды колебаний уровня в районе Магадана достигают максимума для очага, закрытого на треть полуостровом Камчатка.

5. Наличие ледяного покрова может усиливать эффект воздействия цунами (увеличение дальности заливания, вынос тяжелого льда на берег). Дополнительные опасности возникают при взломе берегового припая в периоды нахождения там людей (подледный лов рыбы). Этот эффект может иметь место при очень незначительной высоте самого цунами (первые десятки сантиметров).

6. Относительная редкость цунамигенных явлений в Охотском море сравнительно с соседней Курило-Камчатской зоной порождает недооценку реальной опасности цунами в этом регионе. Следствием этого является беспечность населения при нахождении в береговой зоне, недооценка опасности со стороны местных властей и отсутствие превентивных мероприятий по защите от цунами. Для получения реалистичных оценок цунамиопасности побережья Охотского моря необходимо выполнение целенаправленных исследований по поиску и систематизации исторических сведений о проявлениях цунами, полевых экспедиционных работ по поиску следов палеоцунами на охотоморском побережье, идентификации и оценке сейсмогенного потенциала активных разломов в прибрежной зоне, а также исследование потенциала вулканогенных и обвальных цунами методами численного моделирования.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 12-05-00894, 12-07-00406) и проекта РНФ 14-17-00219 (в части, касающейся расчетов региональных цунами в акватории Охотского моря).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бейзель С.А., Гусяков В.К., Чубаров Л.Б. и др.* Численное моделирование воздействия удаленных цунами на Дальневосточное побережье России // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 5. С. 578–590.
- Важенин Б.П.* К оценке цунамиопасности в Северном Охотоморье // Наука Северо-Востока России – начало века: Матер. Всерос. научной конф., посвященной памяти академика К.В. Симакова и в честь его 70-летия, Магадан, 26–28 апреля 2005 г. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2005. С. 245–249.
- Важенин Б.П.* Курильские вулканы – источники цунами в Северном Охотоморье // Вулканизм и геодинамика: Матер. III Всерос. симп. по вулканологии и палеовулканологии. Т. 3. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского научного центра СО РАН, 2006. С. 659–663.
- Важенин Б.П.* Принципы, методы и результаты палеосейсмологических исследований на Северо-Востоке России. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2000. 205 с.
- Важенин Б.П.* Проблемы исследования цунами в Северном Охотоморье // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Тр. Второй регион. научно-технич. конф., 11–17 октября 2009, г. Петропавловск-Камчатский. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 312–317.
- Важенин Б.П., Лебединцев А.И.* Морские береговые обвалы и их значение в древнем освоении северного Приохотья // Неолит и палеометалл севера Дальнего Востока. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2006. С. 164–175.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. IX. Охотское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеиздат, 1998. 342 с.
- Гусяков В.К.* Остаточные смещения на поверхности упругого полупространства // Условно-корректные задачи математической физики в интерпретации геофизических наблюдений. Новосибирск: ВЦ СО РАН, 1978. С. 23–51.
- Заякин Ю.А.* Цунами на Дальнем Востоке России. Петропавловск-Камчатский: КАМШАТ, 1996. 86 с.
- Исторические сведения о цунами в Охотском море // Монографический справочник. Проект “Моря” Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. IX. Охотское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеиздат, 1998. С. 225–226.
- Кайстренко В.М., Шевченко Г.В., Ивельская Т.Н.* Проявления цунами Тохоку 11 марта 2011 г. на тихоокеанском побережье России // Сейсмические приборы. 2011. Т. 38. № 1. С. 41–64.
- Ким Х.С., Рабинович А.Б.* Цунами на северо-западном побережье Охотского моря // Природные катастрофы и стихийные бедствия в Дальневосточном регионе. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1990. Т. 1. С. 206–218.
- Крашенинников С.П.* Описание земли Камчатки. Т. 1. СПб.: Наука, 1994. 438 с.
- Левин Б.В., Кайстренко В.М., Рыбин А.В. и др.* Проявления цунами 15.11.2006 на Центральных Курильских островах и результаты моделирования высот заплесков // ДАН. 2008. Т. 419. № 1. С. 118–122.
- Лобковский Л.И., Баранов Б.В.* К вопросу о возбуждении цунами в зонах поддвига литосферных плит. Процессы возбуждения и распространения цунами. М.: ИО АН СССР, 1982. С. 7–17.
- Лобковский Л.И., Рабинович А.Б., Куликов Е.А. и др.* Курильские землетрясения и цунами 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г. (наблюдения, анализ и численное моделирование) // Океанология. 2009. Т. 49. № 1. С. 1–16.
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Отв. ред. Кондорская Н.В., Шебалин Н.В. М.: Наука, 1977, 536 с.
- Саваренский Е.Ф., Тищенко В.Г., Святловский А.Е. и др.* Цунами 4–5 ноября 1952 г. // Бюллетень Совета по сейсмологии АН СССР. 1958. № 4. С. 36–37.
- 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.
- Тихий океан. Атлас океанов. М.: ГУНиО МО СССР, 1974. 323 с.
- Тюрнин В.Б.* Цунами в северной части Охотского моря // ФГБУ Колымское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. 2014. <http://www.meteo.magadan.ru/Meteo/tsunami.htm>
- Чубаров Л.Б., Бабайлов В.В., Бейзель С.А.* Программа расчета характеристик волн цунами сейсмического происхождения МГС // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ Федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам № 2011614598. Зарегистрировано в Реестре Программ для ЭВМ 9 июня 2011 г.
- Шевченко Г.В., Ивельская Т.Н.* Цунами и другие опасные морские явления в портах Дальневосточного региона России (по инструментальным измерениям). Южно-Сахалинск: ФГБУН ИМГиГ ДВО РАН, 2013. 43 с.
- 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.
- GEBCO General Bathymetric Chart of the Oceans. 2008. http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/
- Iida K.* Catalog of tsunamis in Japan and neighboring countries, Special Report, Yashigasa, Aichi Institute of Technology. 1984. 52 p.
- Integrated Tsunami Database for the World Ocean (ITDB/WLD), 2000 BC to present // CD-ROM, Tsunami Laboratory, ICMMG SD RAS, Novosibirsk. 2014. Web-version: <http://tsun.sccc.ru/nh/tsunami.php>
- Kanamori H.* The energy release in great earthquakes // J. Geoph. Res. 1977. V. 82. P. 2981–2987.
- Kowalik Z.* Energy flux as a tool in locating tsunami secondary sources // Science of Tsunami Hazards. 2008. V. 27. № 3. P. 1–29.
- Okada Y.* Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bull. Seismol. Soc. Am. 1985. V. 75. № 4. P. 1135–1154.
- Shokin Yu.I., Babailov V.V., Beisel S.A. et al.* Mathematical modeling in application to regional tsunami warning systems operations // Eds Krause E. et al. Comp. Science & High Perf. Computing III, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. 2008. V. 101. P. 52–68.
- The Chilean Tsunami of May 24, 1960. The Committee for Field Investigation of the Chilean Tsunami of 1960. 1961. 398 p.

Assessment of Tsunami Hazard Due to Regional and Remote Sources: The Coast of the Sea of Okhotsk

V. K. Gusiakov^{a, b}, L. B. Chubarov^b, and S. A. Beizel^b

^a *Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, prosp. Akademika M.A. Lavrent'eva 6, Novosibirsk, 630090 Russia*

e-mail: gvk@ssec.ru

^b *Institute of Computational Technologies, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, prosp. Akademika M.A. Lavrent'eva 6, Novosibirsk, 630090 Russia*

e-mail: chubarov@ict.nsc.ru

Received July 15, 2014

Abstract—The tsunami hazard for the coast of the Sea of Okhotsk requires a careful analysis, because this sea will be a zone of responsibility for the Tsunami Warning Service for the Far East coast of Russia. While it is not subject to such hazards on the part of earthquake-generating zones that can produce dangerous tsunamis, nevertheless the Sea of Okhotsk is open for penetration of tsunamis that can be produced by sources in other tsunami-generating zones of the Kuril–Kamchatka region, as well as those of the entire Pacific Ocean. The tsunami hazard for the coast of the Sea of Okhotsk is examined here on the basis of historical observations and the results of numerical simulation for tsunami propagation from hypothetical rupture zones of near and distant earthquakes. It is shown that the real tsunami hazard can only emanate from those regional earthquakes with magnitudes 8.5 or greater that occur in the Kuril–Kamchatka earthquake-generating zone. Among the remote tsunami-generating zones in the Pacific, the most dangerous locations are the rupture zones of mega-earthquakes of the class M9 that come from the South America zone and from Papua–New Guinea. These can produce water motion with amplitudes as great as 5 m along the entire coast of the Sea of Okhotsk.