

УДК 551.466;550.345

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ УДАЛЁННЫХ ЦУНАМИ НА ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЕ ПОБЕРЕЖЬЕ РОССИИ

© 2014 г. С. А. Бейзель*, В. К. Гусяков**, Л. Б. Чубаров*, Ю. И. Шокин*

*Институт вычислительных технологий СО РАН

630090 Новосибирск, просп. Академика М.А. Лаврентьева, 6

E-mail: chubarov@ict.nsc.ru

**Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН

630090 Новосибирск, просп. Академика М.А. Лаврентьева, 6

E-mail: gvk@sscc.ru

Поступила в редакцию 10.02.2014 г., после доработки 24.03.2014 г.

Представлены результаты численного моделирования воздействия удалённых цунами на Дальневосточное побережье России. Показано, что наиболее опасными для этого побережья являются волны, порожденные очагами сильнейших землетрясений класса М9 в районе южно-чилийского побережья, а также в районе Папуа–Новой Гвинеи и Соломоновых островов. Другие цунамигенные зоны Тихого океана, в силу их географического расположения, ориентации очагов и отсутствия выраженных волноводов (подводных хребтов) вдоль трасс распространения цунами, не являются для него опасными даже при предельно возможной магнитуде подводных субдукционных землетрясений. Результаты моделирования сопоставлены с историческими данными о проявлениях удалённых цунами на Дальневосточном побережье РФ.

Ключевые слова: цунами, подводные землетрясения, цунамиопасность, цунамирайонирование, численное моделирование.

DOI: 10.7868/S0002351514050022

ВВЕДЕНИЕ

Основную угрозу для Дальневосточного побережья России представляют ближайшие к нему очаги подводных землетрясений, расположенные в Курило-Камчатской сейсмогенной зоне и в восточной части Японского моря. С начала XX столетия именно от региональных очагов зафиксировано 95% случаев опасных (с высотами более 1 м) цунами, а также всех цунами, сопровождавшихся человеческими жертвами. Тем не менее большая часть этого побережья подвержена воздействию цунами из других цунамигенных зон Тихого океана, в первую очередь, алеутской и южноамериканской.

В XX столетии реально опасным для Дальневосточного побережья было только одно удаленное цунами, порожденное Чилийским землетрясением 22 мая 1960 г., имевшим магнитуду $M_W = 9.5$, максимальную из когда-либо регистрировавшихся инструментально. Волны от этого цунами пересекли за 22 часа весь Тихий океан и достигли побережья России с высотами в некоторых, открытых в сторону океана бухтах до 5–6 м. Во мно-

гих местах колебания уровня океана и вызванные ими течения привели к значительному материальному ущербу. Но что еще более важно, значительные колебания уровня с размахом до 2–3 м наблюдались практически на всем протяжении береговой линии Дальнего Востока, включая те ее участки (западное побережье Охотского моря, побережье Корякии в Беринговом море), которые обычно не затрагиваются даже в случаях сильнейших региональных цунами.

Магнитудный порог для оповещения о тревоге в случае удаленных цунами отечественной службой предупреждения о цунами (СПЦ) установлен на уровне $M_W = 8.5$. Согласно этому порогу, в период с 1958 по 2010 гг. были объявлены девять тревог, связанных с удаленными цунами, семь из которых оказались ложными. Такая статистика показывает, что проблема удаленных цунами требует специального рассмотрения на основе численного моделирования и с привлечением всех доступных материалов исторических наблюдений.

Регламент обработки удаленных землетрясений существенно отличается от регламента обработки региональных событий и учитывает суще-

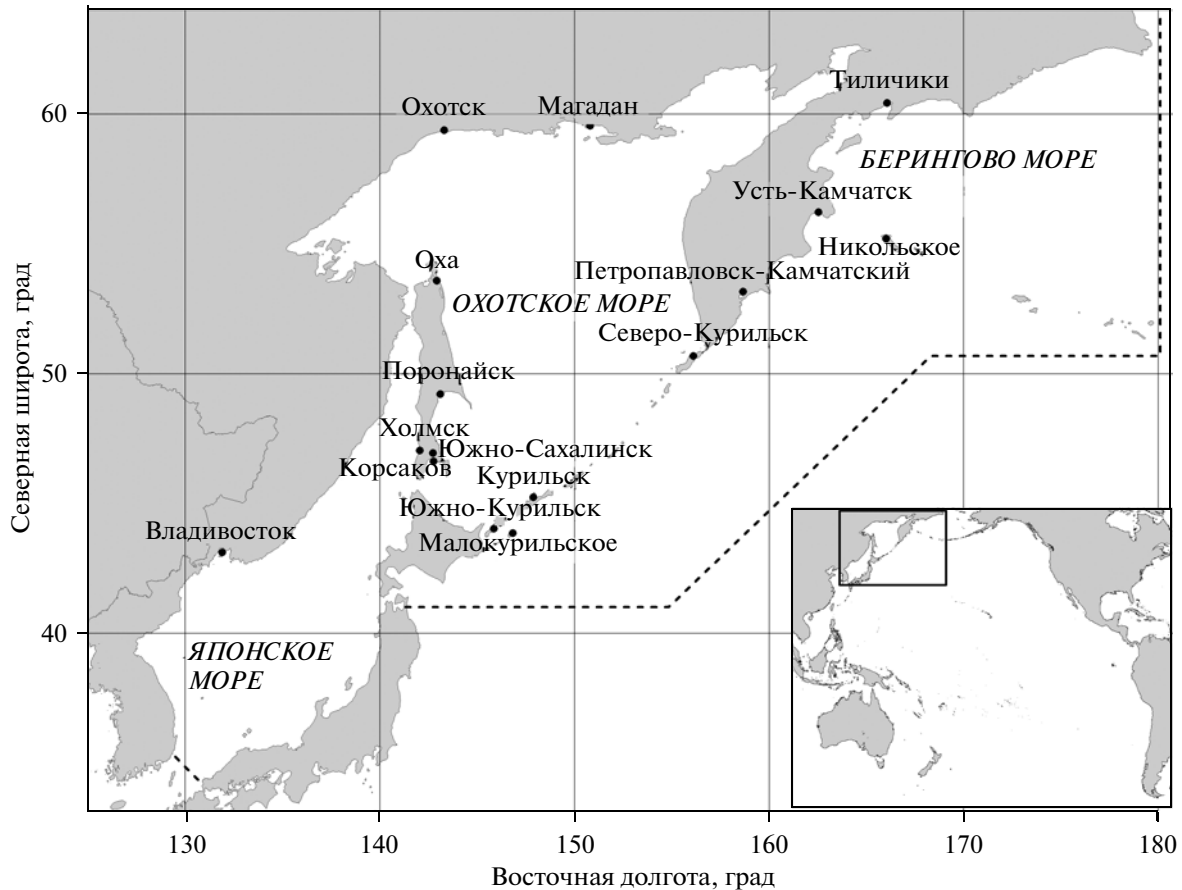


Рис. 1. Карта-схема Дальневосточного побережья России и прилегающих акваторий с указанием населенных пунктов, упоминаемых в тексте. Штриховая линия показывает границу области, в пределах которой цунамигенное событие считается “региональным”. На врезке внизу справа показано положение изображенной на рисунке области на обзорной карте Тихого океана.

ственно больший запас времени до прихода волн, а также возможность информационного взаимодействия с Международной системой предупреждения о цунами в Тихом океане с центром в Голулу, которая в настоящее время располагает обширной сетью уровенных наблюдений на основе как береговых, так и донных глубоководных станций. Поэтому пропуск опасного цунами от удаленных очагов в настоящее время практически исключен. Для таких цунами остается, однако, проблема прогноза максимальных высот волн на берегу и времен достижения максимальных колебаний в конкретных пунктах побережья, а также продолжительности тревоги (определение времени безопасной отмены тревожного статуса). Учитывая большую неоднородность волнового поля цунами при трансокеанском распространении, это не является простой и тривиальной задачей даже при наличии телеметрических записей волн на промежуточных островных и донных станциях.

Частью этой же проблемы является корректное установление восточной (в районе Коман-

дорских о-вов) и южной (в районе о-ва Хоккайдо) границ географической области, принадлежности к которой определяет классификацию события как “регионального” (рис. 1). Это должно делаться как на основе изучения исторических данных, так и на основе результатов численного моделирования распространения цунами от очагов в этих пограничных районах.

АНАЛИЗ ИСТОРИЧЕСКИХ СВЕДЕНИЙ

Имеющиеся в российских каталогах [1–3] и включенные в базу данных [4] сведения о проявлении удаленных цунами на Дальневосточном побережье России весьма ограничены. Еще менее информативными в этом отношении являются зарубежные базы данных, в том числе основная из них, поддерживаемая Национальным центром данных по геофизике НОАА в Боулдере, США [5].

Наиболее сильное в прошлом столетии транс-океанское цунами, вызванное Чилийским землетрясением 22 мая 1960 г. с $M_W = 9.5$, наблюдалось на всем побережье Тихого океана. На восточном

побережье Японии средние высоты заплеска составляли 3–4 м, с максимумами до 7–8 м, погибло 114 человек и 90 пропало без вести, 1233 дома были полностью разрушены, свыше 3500 серьезно повреждены [6]. На тихоокеанской стороне Курило-Камчатского побережья это цунами наблюдалось на всем его протяжении с высотами 2–4 м. Максимальные высоты заплеска, достигавшие 7 м, были измерены на восточном побережье Камчатки в бухтах Моржовая и Русская [3]. Данные о размерах материального ущерба и жертвах в российских каталогах отсутствуют. В [3] приводятся сведения о проявлении этого цунами на Беринговоморском побережье Камчатки, указывающие на сильные течения и подтопление разгрузочных территорий ряда рыбокомбинатов, выбросы на берег глыб льда, повреждение причалов и мостов на речках.

Сквозь курильские проливы цунами проникло в Охотское море и вызвало значительные колебания его уровня, продолжавшиеся более двух суток. Мареограф в бухте Нагаева зафиксировал пять волн высотой до 2.2 м [7]. Высота волн 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 [2].

Второе сильнейшее трансокеанское цунами – Аляскинское 1964 г. ($M_W = 9.3$) – слабо проявилось на дальневосточном побережье России. Максимальная высота подъема уровня составила 1 м (в пос. Подгорном на восточном побережье о-ва Парамушир), в Северо-Курильске мареограф записал волны высотой 0.8 м, на о-ве Шумшу (пос. Бабушкино) – 0.7 м [2]. На Сахалине максимальные колебания уровня были зарегистрированы в Корсакове (0.4 м). По охотскому побережью данных о проявлениях этого цунами нет.

Третье сильнейшее тихоокеанское цунами XX столетия (Алеутское 1946 г.), возникшее, однако, после землетрясения умеренной силы (его первоначально определенная магнитуда была всего 7.4), никак не проявилось на Дальневосточном побережье РФ. Возможной причиной этого является выраженная направленность излучения энергии этого цунами, узкий максимум которой пошел в сторону Гавайских и Маркизских островов [8]. Также отсутствуют для этого побережья данные о проявлении другого трансокеанского цунами – Алеутского 1957 г. ($M_W = 9.1$).

Последнее по времени сильнейшее тихоокеанское цунами – Тохоку 11 марта 2011 г. – вызвало опасные колебания уровня на восточном побережье Курильских о-вов и Камчатки, продолжавшиеся в ряде мест более суток. Максимальные высоты волн (до 3 м) отмечены в бухте Крабовая на западном берегу о-ва Шикотан, при этом на его восточном побережье высоты заливания не превы-

шали 1.5 м. В Мало-Курильске мареограф записал колебания с размахом до 2.3 м [9]. Максимальное заливание в Северо-Курильске (о. Парамушир) достигало 2.5 м, в Буревестнике (о. Итуруп) – 2 м. В бассейне Охотского моря наблюдались только фоновые колебания уровня – максимальные высоты волн по записям мареографов были 0.53 м (Курильск), 0.42 м (Корсаков), 0.44 м (Поронайск). Мареограф в бухте Нагаева записал 12–14 марта несколько волн с максимальной амплитудой в 1.1 м [10]. Причиной малых колебаний уровня в Охотском море при этом цунами является расположение его бассейна далеко в стороне от главного максимума распространения энергии, ориентированного в юго-восточном направлении.

Как отмечалось выше, реальную угрозу для Дальневосточного побережья РФ представляют южно-американские цунами. Глобальные базы данных [4, 5] содержат сведения о 17 разрушительных цунами, происшедших вблизи побережья Южной Америки за все время исторических наблюдений (1500–2013 гг.). Из них по крайней мере восемь событий отмечены в каталоге [11] как вызвавшие опасные (высотой более 1 метра) волны цунами на побережье Японских о-вов. К сожалению, соответствующие исторические данные по Курило-Камчатскому побережью отсутствуют. Однако, основываясь на модельных представлениях о распространении трансокеанских цунами и на данных наблюдений цунами 1960 г., можно предположить, что средние высоты волн южно-американских цунами на Японском и Курило-Камчатском побережьях примерно одинаковы.

По имеющимся данным можно оценить средний период повторяемости наблюдения южно-американских цунами с высотами 2 и более метров у берегов Японии. За период в 400 лет (с 1586 по 1995 гг.) он оказывается равным 58 годам, что меньше ожидаемого периода повторяемости сильных (с магнитудой 7.5 и выше) подводных землетрясений в отдельном сейсмотектоническом блоке Курило-Камчатской сейсмогенной зоны, равном 140 ± 50 лет [12]. Отсюда следует, что опасность удаленных цунами для Дальневосточного побережья РФ является по крайней мере сопоставимой с опасностью цунами от близких региональных землетрясений. Максимально возможные высоты волн от таких удаленных землетрясений, по видимому, не могут превышать 9–10 м, однако в отличие от региональных цунами, оказывающих опасное воздействие на ограниченном по протяженности участке берега (первые сотни километров), удаленные цунами могут проявляться практически на всем Дальневосточном побережье России, включая побережья Охотского и Берингова морей. Для окраинных морей, не имеющих внутри себя активных сейсмогенных зон, удаленные цунами обеспечивают значительный, если не основной, вклад в общую цунамиопасность побережья.

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ СЕЙСМОГЕННЫХ ЦУНАМИ

Для описания динамики цунами традиционно используются приближенные модели мелкой воды, базирующиеся на гипотезе малости характерного вертикального масштаба движения по отношению к горизонтальному масштабу. Конкретный вид записи используемой системы уравнений и учет дополнительных факторов (сил Кориолиса, донного трения) определяется в основном целью, характером и пространственным масштабом решаемой задачи. Корректная численная реализация уравнений математической модели и граничных условий на свободных (морских) и отражающих (береговых) границах позволяет при наличии адекватных батиметрических данных выполнять расчеты распространения цунами в достаточно сложных по конфигурации береговой линии и распределению глубин расчетных областей, моделирующих реальные акватории Мирового океана. Как показывают результаты тестовых расчетов и сопоставлений численных результатов с аналитическими решениями, данными лабораторных экспериментов и материалами натурных наблюдений, эти модели вполне достоверно воспроизводят характеристики распространяющихся по океану волн цунами и параметры их проявления в прибрежной зоне.

В качестве модели возбуждения цунами при таких расчетах чаще всего используется так называемая “поршневая модель”, основанная на введении в уравнение неразрывности вертикальных движений дна бассейна, отождествляемых с остаточными косейсмическими смещениями дна океана в очаговой области подводного землетрясения. Такие смещения рассчитываются обычно по формулам, выведенным в [13] и представляющим остаточные (статические) смещения поверхности однородного упругого полупространства под действием внутреннего пространственного источника дислокационного типа. В настоящей работе использованы аналогичные формулы, полученные В.К. Гусяковым в [14] на семь лет ранее И. Окады. Несмотря на различия в форме записи итоговых выражений для компонент смещений, полученных в [13, 14], многочисленные проверки показали полное соответствие значений рассчитанных смещений при любых наборах параметров модельных очагов.

Рассчитанные для плоской границы однородного полупространства смещения накладываются на реальный рельеф дна в очаговой области, при этом возникающими дополнительными возмущениями (например, нарушением стабильности подводных склонов) и вкладом горизонтальной компоненты смещений дна, как правило, пренебрегают. Смещения дна считаются возникшими мгновенно (точнее, в течение одного шага

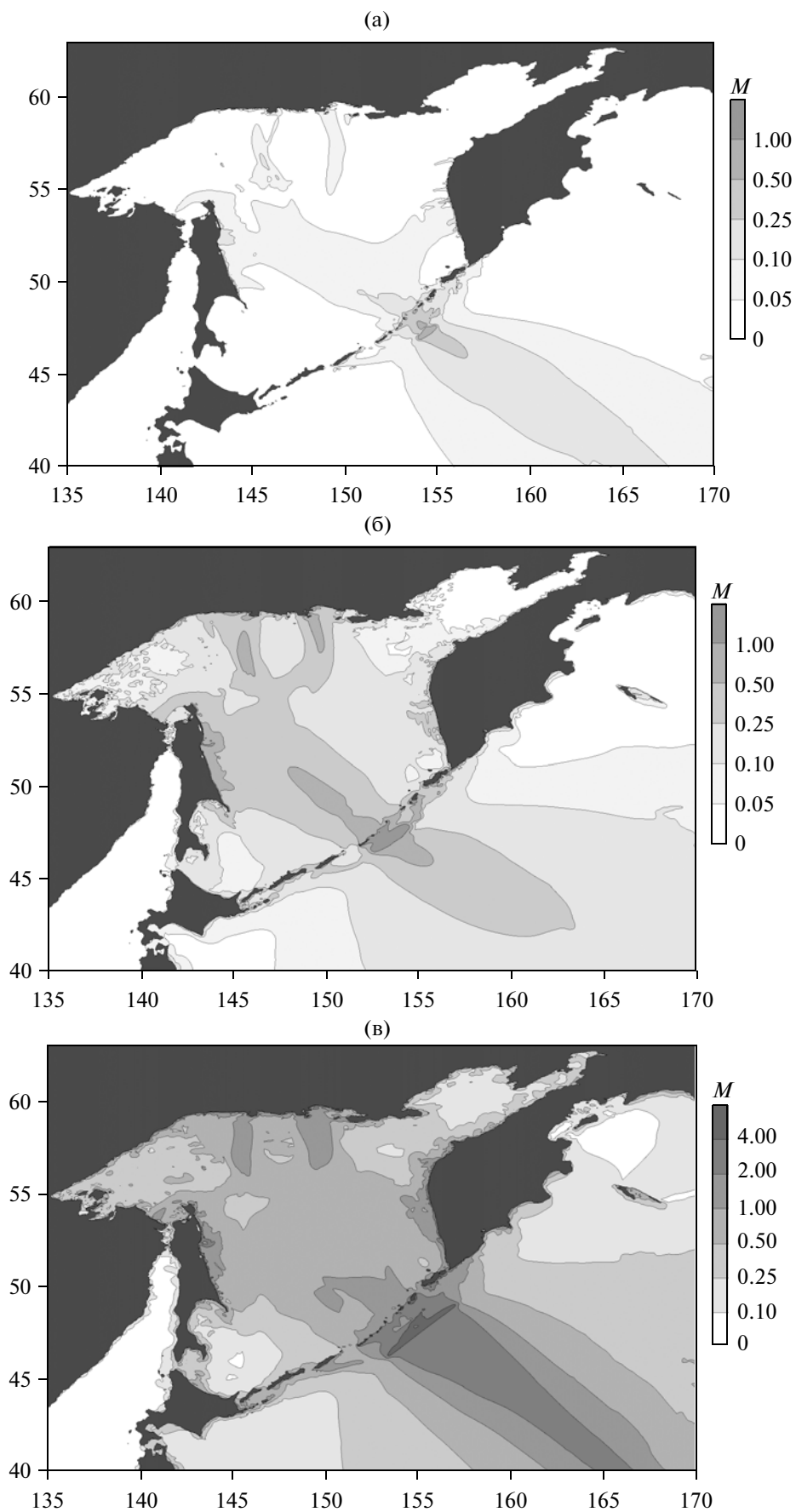
по времени численной схемы), поскольку реальная продолжительность движений в очагах подводных землетрясений (50–100 с, за исключением предельно сильных событий, имеющих существенно более длительный очаговый процесс) все еще мала по сравнению с типичными периодами волн цунами (5–15 мин для региональных цунами и до 30–40 мин в случае сильнейших трансокеанских цунами). Такой подход к моделированию цунами является в настоящее время общепринятым и применяется в подавляющем большинстве работ по расчетам цунами на конкретных участках акватории Мирового океана, выполняющихся как в России, так и за рубежом.

Представленные в настоящей работе результаты расчетов цунами получены на основе программы STATIC, реализующей описанный в [14] алгоритм расчета остаточных смещений, и программного комплекса MGS, реализующего вычислительные схемы типа МакКормака, аппроксимирующие классические уравнения нелинейной системы мелкой воды, записанные в сферической системе координат [15, 16].

В качестве примера получаемых при таком подходе результатов на рис. 2 приведены диаграммы свечения для модельных очагов с магнитудами $M_w = 7.8, 8.4$ и 9.0 , расположенных в районе пролива Крузенштерна, наиболее крупного пролива Курильской гряды, разделяющего о-ва Райкоке и Шиашкотан. Такие диаграммы показывают пространственное распределение максимумов амплитуд цунами в каждой точке расчетной области, достигнутых за все время расчета, и дают наглядную картину излучения энергии цунами очагом землетрясения и ее дальнейшей эволюции при распространении в океане. Представленные на рис. 2 диаграммы свечения иллюстрируют упомянутую выше способность цунами, порожденных мегаземлетрясениями класса $M9$, проникать в акватории окраинных морей и вызывать опасные колебания уровня на их побережьях, которые обычно не затрагиваются в случаях цунамигенных землетрясений с меньшей магнитудой.

ВЫБОР ЦУНАМИГЕННЫХ ЗОН И ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Анализ содержания базы данных ITDB/WLD [4] для Тихого океана показывает, что за период с 1900 г. по настоящее время, когда исторический каталог можно считать полным даже в отношении слабых цунами, подводные землетрясения ответственны за 84% всех происшедших в нем цунами. Оставшаяся часть делится между оползновыми (обвальными) (5%), вулканогенными (4%) и метеорологическими (2%) цунами, до 5% случа-



←
Рис. 2. Распределения максимальных положительных амплитуд волн, рассчитанных для модельных очагов с магнитудами $M_W = 7.8$ (а), 8.4 (б) и 9.0 (в), расположенных в районе пролива Крузенштерна.

ев наблюдений цунами имеют неидентифицированный до сих пор источник. Среди трансокеанских событий подавляющее большинство было вызвано сильнейшими субдукционными землетрясениями с магнитудой 9.0 или выше [17]. Как показывает опыт изучения последствий цунами от взрыва вулкана Кракатау в 1883 году, сильнейшие вулканогенные цунами оказывают разрушительное воздействие на побережье лишь в непосредственной окрестности источника (на удалении не более 200–300 км) и не способны создавать опасные колебания уровня в дальней зоне. Отсюда следует, что при рассмотрении угрозы удаленных цунами для Дальневосточного побережья РФ можно ограничиться только случаями сейсмогенных цунами.

В силу отмеченного преобладания таких цунами в Тихом океане, основные цунамигенные зоны здесь практически совпадают с положением сейсмически активных зон, образующих так называемый тихоокеанский сейсмический пояс, в пределах которого происходит 99% землетрясений Тихого океана. Из анализа исторических данных о проявлениях удаленных цунами на Дальневосточном побережье РФ следует, что реально опасными для него, по-видимому, являются только землетрясения с магнитудой 9.0 и выше. Исходя из этих соображений, сейсмогенные зоны Тихого океана аппроксимировались системой модельных очагов подводных землетрясений с магнитудой $M_W = 9.0$. Каждый такой очаг представлял собой площадку разрыва длиной $L = 430$ км и шириной $W = 150$ км с величиной подвижки по ней $D_0 = 11.6$ м. Его сейсмический момент равен $M_0 = 3.6 \times 10^{29}$ н·м, что по корреляционному соотношению Х. Канамори [18] $M_W = (\lg M_0 - 16.1)/1.5$ соответствует магнитуде $M_W = 9.0$.

Параметры модельных источников выбирались исходя из общих представлений о механизмах субдукционных землетрясений, вытекающих из концепции поддвига океанических плит под континентальные в районах активных континентальных окраин. При этом азимут простираения плоскости разрыва в большинстве случаев определялся контуром береговой (островной) линии, а угол падения площадки разрыва выбирался совпадающим с главной литосферной границей раздела между надвигающейся континентальной и поддвигающейся океанической корой, меняясь в диапазоне от 10° до 45°. Направление подвижки по плоскости разрыва во всех случаях, кроме очагов в районе западной оконечности Алеуто-Алясцинской зоны, принимался равным 90°, что соот-

ветствует наиболее цунамиопасному варианту механизма очага — надвигу либо взбросу (для западных алеутских очагов он был принят равным 15°). Глубина залегания верхнего края разрыва задавалась в диапазоне 10–20 км. Использованный набор модельных землетрясений не во всех цунамигенных зонах соответствует местным сеймотектоническим особенностям, но в рассматриваемом случае различия представляются несущественными в сравнении с влиянием ориентации очагов и трасс распространения цунами.

Построенный набор из 94 модельных источников показан на рис. 3. Очаги с номерами 1, 2, 86–90 фактически являются для Дальневосточного побережья России “пограничными” и “близкими”. Они включены в построенную систему очагов для полного покрытия всех сейсмически активных зон Тихого океана, что позволяет получить сравнительную количественную оценку ожидаемых высот волн от удаленных и близких очагов в любой точке защищаемого побережья.

Для выполнения количественного анализа относительной цунамиопасности различных очагов вдоль всего Дальневосточного побережья РФ были расставлены 683 виртуальных мареографа, в которых в процессе расчетов сохранялись полные расчетные мареограммы. Из них 82 мареографа расположены в узлах расчетной сетки, ближайших к “защищаемым” пунктам (в числе которых прибрежные города и поселки Приморья, Колымы, западного и восточного побережья Сахалина, Курильских о-вов и Камчатки). Дополнительно вдоль всего побережья было размещено еще 611 мареографов в граничных “морских” точках, распределенных вдоль берега на расстоянии 20–30 км друг от друга.

Моделирование распространения цунами от удаленных очагов проводилось в расчетной “тихоокеанской” акватории, ограниченной с запада 100° E, с востока 60° W, с юга 60° S и с севера 65° N на расчетной сетке с шагом в 2 угловые минуты, построенной на основе известного одноминутного батиметрического массива GEBCO [19]. Все расчеты по моделированию распространения цунами, порожденных удаленными очагами, проводились для 48 часов физического времени распространения волн.

В результате выполнения серии сценарных расчетов, предназначенных для оценки относительной цунамиопасности для Дальневосточного побережья РФ различных цунамигенных зон Тихого океана, был получен большой объем расчетных материалов, включающий следующие группы данных:

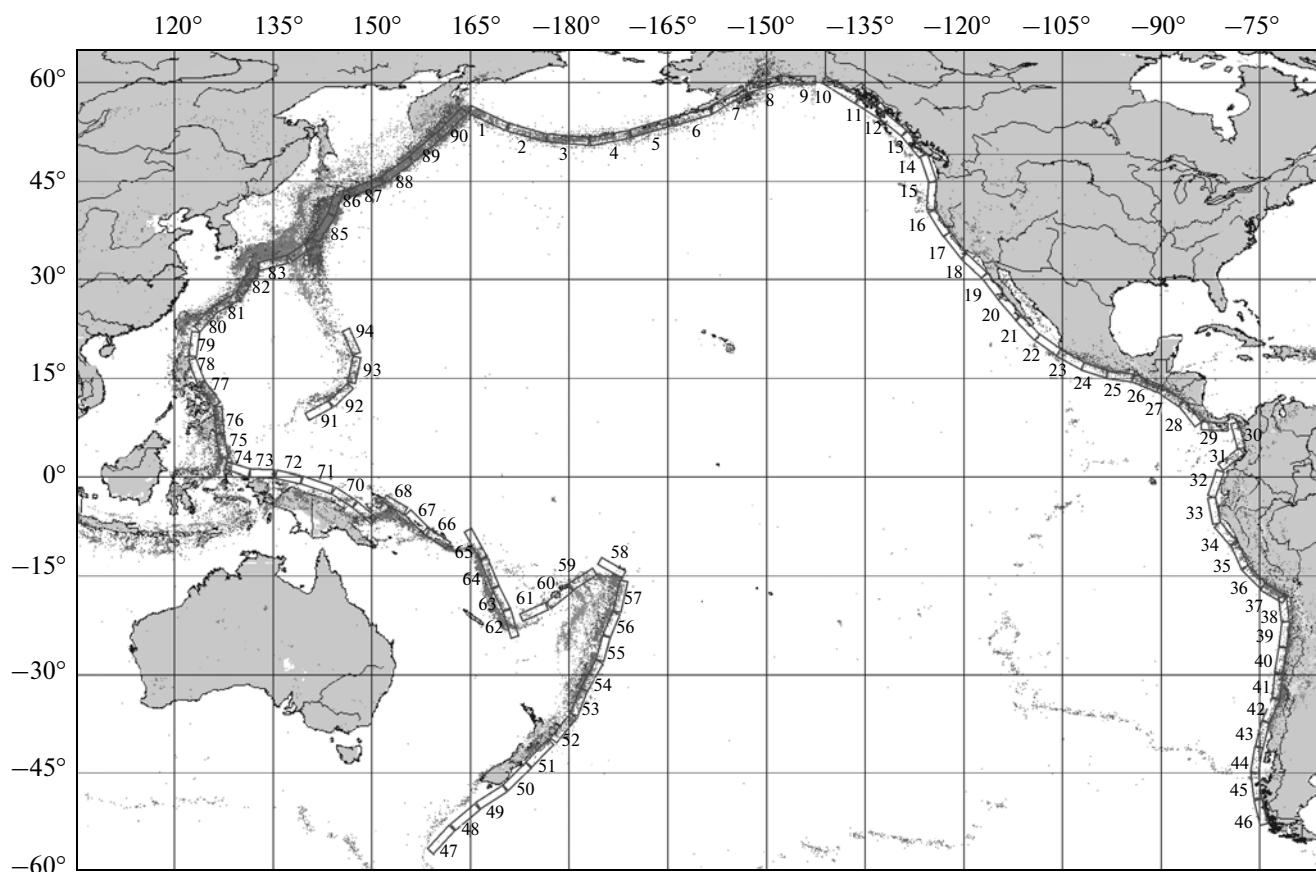


Рис. 3. Карта сейсмичности Тихого океана, построенная по данным глобального сейсмического каталога за 1900–2013 гг. [4] с нанесенными на нее проекциями площадок разрыва модельных очагов подводных землетрясений с магнитудами $M_W = 9.0$. Цифры у площадок означают номера модельных очагов, упоминаемых в тексте.

1) расчетные мареограммы в точках размещения виртуальных мареографов;

2) распределения экстремальных (максимальных положительных и минимальных отрицательных) амплитуд волн в точках размещения виртуальных мареографов;

3) свечения – распределения максимальных положительных и минимальных отрицательных амплитуд волн во всех узлах расчетной акватории;

4) распределения времен регистрации первых вступлений (ETA – Expected Tsunami Arrival) в точках размещения виртуальных мареографов и во всех узлах расчетной сетки;

5) распределения времен регистрации максимальных положительных и минимальных отрицательных амплитуд волн (ETM – Expected Tsunami Maximum) в точках размещения виртуальных мареографов.

Последние две характеристики являются столь же важными, как и расчетные динамические параметры цунами (максимальные ампли-

туды и высоты волн и максимальный размах отклонений уровня). Результаты моделирования показывают, что для удаленных цунами разница между величинами ETA и ETM в некоторых пунктах побережья Охотского, Берингова и в меньшей степени Японского морей может достигать десятков часов, что весьма существенно для построения правильных алгоритмов действий СПЦ. Анализ полных расчетных мареограмм важен также для определения момента отмены тревоги, поскольку в случае удаленных событий монотонное снижение амплитуд колебаний даже на протяжении нескольких часов не гарантирует невозможности их повторного нарастания с достижением опасных значений. Такое нарастание может возникать как результат взаимодействия краевых волн, порожденных цунами, с собственными колебаниями замкнутых и полузамкнутых акваторий окраинных морей, также инициированными приходящими из открытого океана волнами цунами.

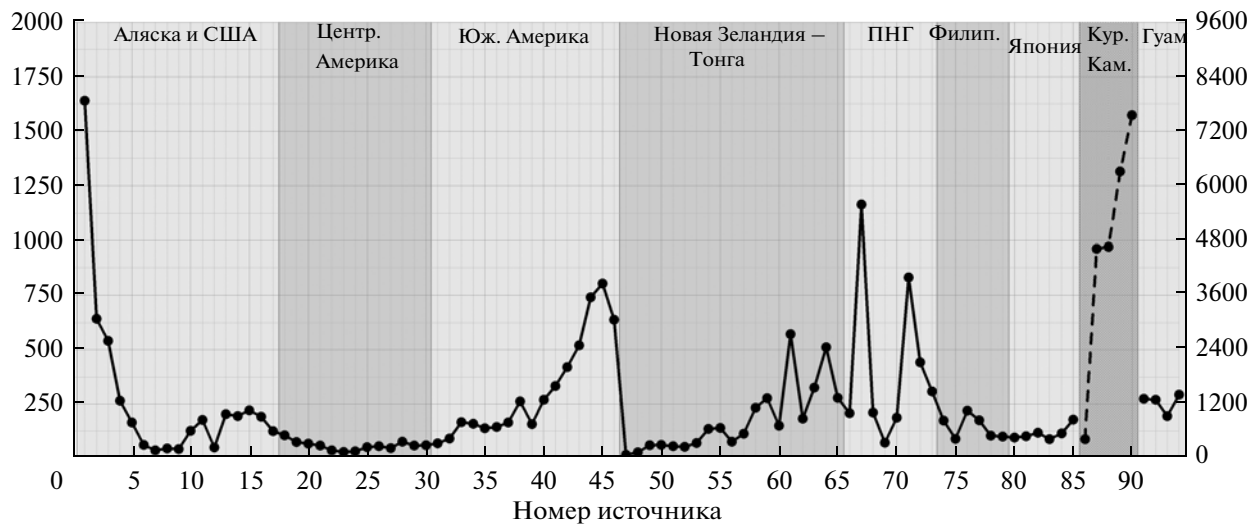


Рис. 4. Интегральная энергетическая характеристика воздействия различных очагов цунамигенных землетрясений на Дальневосточное побережье РФ. На горизонтальной оси отложен номер модельного очага (в соответствии с указанным на рис. 3), на левой вертикальной – величина E , на правой – эта же величина в другом, уменьшенном масштабе, который относится к очагам Курило-Камчатской группы (№№ 86–90).

ОЦЕНКА ЦУНАМИОПАСНОСТИ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ РФ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Анализ расчетных высот волн в береговых пунктах Дальневосточного побережья показывает, что очаги из различных зон даже при одинаковой магнитуде модельных землетрясений вызывают существенно различные колебания уровня в одних и тех же пунктах. В качестве некоторой интегральной энергетической характеристики опасности воздействия конкретного очага на все дальневосточное побережье в целом была рассмотрена величина E , определяемая по формуле

$$E = \sum_{i=1}^N A_i^2,$$

где A_i – сумма абсолютных величин максимальных и минимальных значений уровня за все время расчета, порожденных модельным очагом в i -й расчетной точке, N – число виртуальных мареографов. Величина E , посчитанная по всем 693 виртуальным мареографам, располагавшимся вдоль Дальневосточного побережья РФ, может служить аналогом доли энергии цунами, пришедшей к этому региону от конкретного источника, на основании которой можно сравнивать относительную цунамиопасность различных очагов. На рис. 4 приведено распределение этой характеристики, рассчитанное для всех модельных источников, показанных на рис. 3.

Как видно из поведения величины E , воздействие очагов сильнейших цунами на Дальневосточное побережье РФ носит крайне неравномерный

характер. Как отмечалось выше, наибольшую опасность для него представляют землетрясения, располагающиеся непосредственно в Курило-Камчатской сейсмогенной зоне (очаги № 87–90), а также расположенные в непосредственной близости от него – алеутские очаги № 1–3. Высоты волн от них примерно в 4–5 раз превосходят максимальные высоты, создаваемые очагами из удаленных зон.

При смещении очагов к востоку (вдоль Алеутской островной дуги) расчетная величина E быстро падает (очаги № 4–5) и далее сохраняется примерно на одном уровне, вплоть до северного побережья Чили с минимальными значениями для мексиканских очагов № 23–25, для которых главный максимум излучения направлен в сторону Антарктиды. При переходе от одного очага к другому энергетическая характеристика E ведет себя достаточно монотонно, что позволяет интерполировать данные от соседних очагов в случае, когда реальное землетрясение произойдет в промежутке между ними. Исключением здесь является канадский очаг № 12, минимальную цунамиопасность которого можно объяснить тем, что большая часть его волновой энергии блокируется в проливе Хекате между материком и архипелагом Хайда-Гуаи.

Нарастание расчетных высот начинается для чилийских очагов примерно с 30° S, когда основной максимум излучения энергии направляется в северо-западную часть Тихого океана. Пример диаграммы свечения для одного из этих очагов (№ 45) приведен на рис. 5. Наибольшие высоты волн на российском побережье возникают от очагов № 44 и 45, расположенных у южного побережья Чили. Здесь стоит напомнить, что катастрофо-

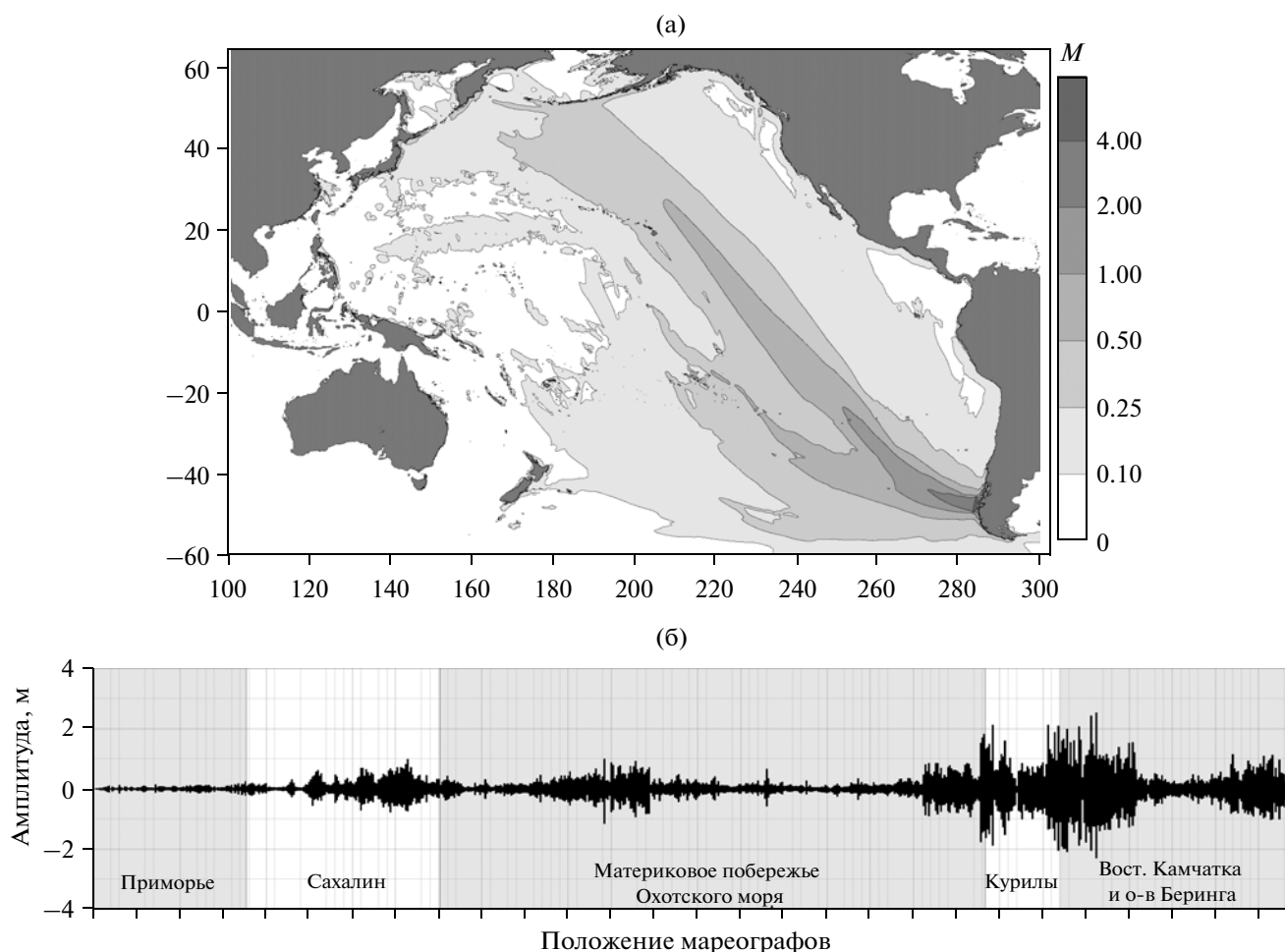


Рис. 5. Диаграмма свечения – распределения максимальных положительных амплитуд волн (а) и соответствующая гистограмма максимальных положительных и минимальных отрицательных амплитуд волн вдоль Дальневосточного побережья РФ (б), рассчитанные для южно-чилийского очага № 45.

фическое Чилийское землетрясение 1960 г. с магнитудой 9.5, вызвавшее опасные волны на всем Дальневосточном побережье России, произошло в районе расположения очага № 42, который примерно вдвое “проигрывает” по относительной цунамиопасности своим южным соседям (очагам № 44 и 45).

Таким образом, на основе анализа величины E , используемой в качестве интегральной энергетической характеристики относительной цунамиопасности различных очагов, можно утверждать, что южно-чилийские очаги представляют для Дальневосточного побережья угрозу, вполне сопоставимую с той, что несут в себе гораздо более близкие землетрясения в западной части Алеутской гряды. Здесь, однако, нужно напомнить, что обсуждаемая характеристика представляет интегральное значение, посчитанное по всем береговым точкам защищаемого побережья, и малая ее величина не исключает возможности существования опасных высот на некотором ограничен-

ном участке берега. Алеутские очаги представляют наибольшую опасность для восточного побережья Камчатки и северной части Курильских островов, которые в значительной степени защищают остальные части Дальневосточного побережья РФ от воздействия этих очагов. В то же время волны от южно-чилийских очагов достаточно свободно проникают сквозь курильские проливы в Охотское море, где вызывают опасные (с размахом до 2 м) колебания уровня на восточном побережье Сахалина, на побережье Колымы и на западе Камчатки. При этом для западного побережья о-ва Сахалин и всего Приморья эти очаги реальной угрозы не представляют.

При переходе к западному побережью Тихого океана цунамиопасность очагов резко падает (очаги № 47–57 в районе Новая Зеландия – Тонга). Нарастание опасности начинается с очага № 58, диаграмма излучения которого ориентирована в сторону северной части океана. При дальнейшем смещении очагов вдоль сейсмогенных зон в за-

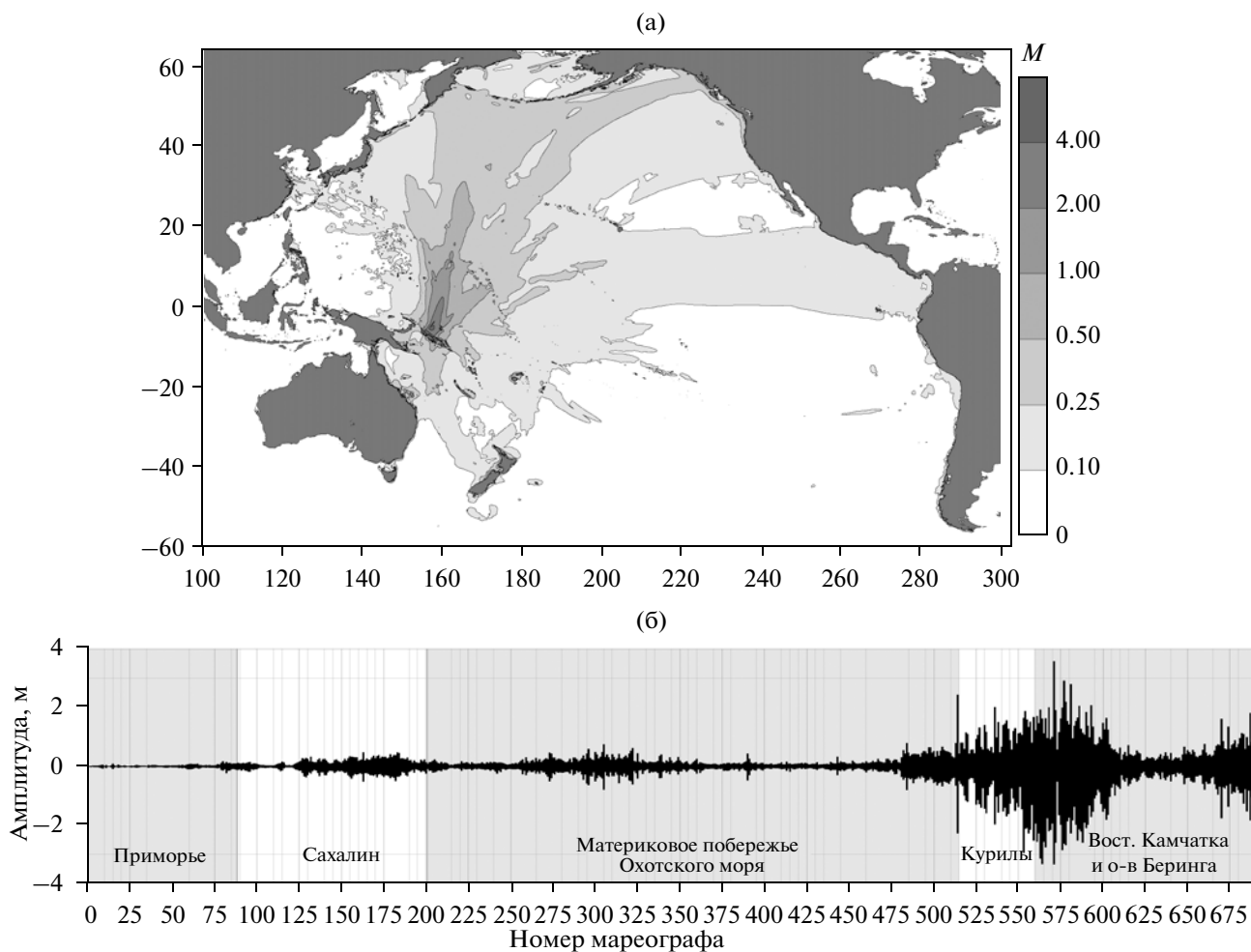


Рис. 6. Диаграмма свечения – распределения максимальных положительных амплитуд волн (а) и соответствующая гистограмма максимальных положительных и минимальных отрицательных амплитуд волн вдоль Дальневосточного побережья РФ (б), рассчитанные для очага № 67 (район Соломоновых о-вов).

падной части Тихого океана цунамиопасность продолжает нарастать, но характеристика E ведет себя немонотонно, с существенными скачками при переходе от одного очага к другому. Это можно объяснить наличием большого количества островов и островных архипелагов в этой части океана, аккумулирующих волновую энергию в прилегающей акватории. Максимальное значение величина E принимает для очагов № 67 (Соломоновы о-ва) и № 71 (Новая Гвинея). Их цунамиопасность для Дальневосточного побережья РФ по своему “интегральному” воздействию превосходит цунамиопасность южно-чилийских очагов № 44–46. Диаграмма свечения для очага № 67 представлена на рис. 6.

Дальнейшее смещение модельных очагов к северу вдоль филиппинской и японской сейсмогенных зон опять приводит к снижению их цунамиопасности до тех пор, пока они не приближаются непосредственно к южной границе дальневосточ-

ного региона. Для очагов № 85–86 (район Тохоку-Хоккайдо) происходит наиболее резкий скачок значений интегральной характеристики E , отмечающий переход очагов из дальней в ближнюю зону воздействия.

Анализ полученных расчетных мареограмм и кинематических характеристик цунами подтверждает известный из наблюдений факт: при удаленных цунами максимальные колебания уровня во многих пунктах наступают много позже, иногда спустя десятки часов, после прихода не только головной волны (времени ETA), но и энергетического максимума (времени ETM), ожидаемого с учетом частотной дисперсии внутри волнового пакета.

Полученные результаты соответствуют известным представлениям о том, что в случае транс-океанских цунами имеют место несколько различных по своей физике процессов. Первый – это процесс динамического распространения на-

чального волнового пакета, излученного очагом. Второй — процесс раскачки всего Тихого океана, как единого, но очень сложного по своей конфигурации бассейна, который при вбросе значительной энергии в эту колебательную систему может продолжаться несколько суток. Третий процесс связан с возникновением краевых волн и собственных колебаний акваторий окраинных морей, возбуждаемых подходящими из открытого океана волнами цунами.

В случае южно-чилийских очагов № 45–46, максимум излучения которых ориентирован на Японию, Курильские острова и Камчатку, момент вступления максимальных волн примерно соответствует расчетным временам ЕТА плюс 2–3 ч. При этом максимальные колебания на побережье Сахалина и Корякии наступают почти на сутки позже прибытия туда головной волны, что говорит о том, что в процесс вовлекаются резонансные колебания окраинных морей (Охотского и Берингова).

В случае центрально-американских очагов, ориентированных на юго-восточную часть Тихого океана, максимальные колебания практически во всех пунктах Дальневосточного региона РФ обеспечиваются только упомянутой выше раскачкой всего океанского бассейна и наступают много позже ЕТА (на 24–48 ч). При этом моменты наступления максимальных положительных и максимальных отрицательных смещений уровня не совпадают по времени и могут отстоять друг от друга также на десятки часов.

Очаги в районе Алеутских островов и Новой Гвинеи представляют некоторую промежуточную ситуацию. В этом случае часть защищаемого побережья оказывается в зоне влияния боковых лепестков диаграммы свечения источников, соответственно в таких пунктах максимальный размах колебаний наступает вскоре после ЕТА, в остальных же пунктах побережья максимумы обеспечиваются последующей раскачкой бассейнов окраинных морей.

Важным вопросом является также оценка нижней границы магнитуд модельных землетрясений, представляющих наибольшую опасность для Дальневосточного побережья РФ (очаги в районе южного Чили и Новой Гвинеи). Для этого была проведена дополнительная серия расчетов для наиболее опасных очагов с меньшими магнитудами, эпицентры которых совпадали с эпицентрами источников № 45, 67 и 71 с магнитудой 9.0. Кроме координат эпицентра сохранялись также определяющие углы механизма землетрясения, а значения размера площадки и величины подвижки по ней изменялись в соответствии с принятым значением магнитуды M_w .

Результаты расчетов подтверждают, что магнитуда 9.0 является своего рода пороговым значени-

ем для возникновения реальной угрозы Дальневосточному побережью при удаленных очагах. Уже при снижении ее на 0.2 балла (до значения 8.8) расчетные высоты волн становятся менее 2 метров, а при дальнейшем снижении магнитуды высоты падают до нескольких десятков сантиметров (в среднем в два раза при уменьшении магнитуды на 0.2 балла).

Таким образом, выполненная серия расчетов подтверждает вывод о том, что даже в наиболее опасных по географическому расположению цунамигенных зонах Тихого океана (южно-американской и новогвинейской) реальную угрозу для Дальневосточного побережья РФ представляют только предельно сильные подводные землетрясения с магнитудой 9.0 или выше, имеющие при этом механизм очага, соответствующий поддвигу по главной литосферной границе раздела в зонах субдукции. Все другие возможные механизмы очага (например, при существенной сдвиговой компоненте), а также глубокофокусные землетрясения (с глубинами более 100 км) не способны создать опасное цунами даже при предельно возможных магнитудах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

По результатам анализа исторических данных и численного моделирования воздействия удаленных цунами на Дальневосточное побережье РФ можно сформулировать следующие выводы.

1. Воздействие цунами от удаленных очагов на Дальневосточное побережье РФ крайне неравномерно и определяется как местоположением очагов и их ориентацией по отношению в этому побережью, так и элементами подводного рельефа океана вдоль трассы распространения основного энергетического максимума. Помимо этого, высоты волн сильно варьируются вдоль самого побережья в зависимости от его типа (открытое океаническое побережье, западное побережье островной дуги, побережья внутренних морей).

2. Наиболее опасными для Дальневосточного побережья РФ являются очаги, расположенные в южно-чилийской зоне (южнее 30° S). В силу специфики взаимного расположения источника и области воздействия (удаленность почти точно на 180°, из-за чего происходит заметная конвергенция фронта цунами при распространении на сфере) сильнейшие южно-чилийские цунами оказывают наибольшее воздействие на побережье Японии, Курильских о-вов и Камчатки. Дополнительным фактором усиления, сравнительно со всеми другими цунамигенными зонами Тихого океана, является также наличие обрывистого побережья и крутого континентального склона у берегов Южной Америки, которые служат весьма эффективными отражателями энергии цунами.

3. Другим потенциально опасным цунамигенным регионом является район Соломоновых о-вов – Папуа–Новой Гвинеи. Ориентация некоторых подводных землетрясений в этом районе такова, что Курило-Камчатское побережье оказывается в створе максимума излучения энергии очагом, которое затем может усиливаться фокусирующим действием элементов подводного рельефа. Отсутствие исторических данных по сильнейшим (класса M9) землетрясениям в этой зоне не означает, согласно последним представлениям о сейсмотектонике субдукционных зон [20, 21], невозможность их возникновения.

4. На участках Дальневосточного побережья России, обращенных в сторону открытого океана, приход максимальных амплитуд цунами, как правило, совпадает с расчетными временами ETA, т.е. с временем прибытия основного волнового пакета непосредственно из очаговой области. Однако для гораздо более протяженного побережья окраинных и внутренних морей (Японского, Охотского, Берингова) максимальные колебания уровня могут начинаться спустя десятки часов после ожидаемого времени прибытия головной волны. Это обстоятельство осложняет регламентацию процедуры объявления и отмены тревог цунами при удаленных событиях.

5. Анализ статистики тревог по удаленным цунами и результатов выполненного моделирования показывает, что принятое сейчас пороговое значение магнитуды $M_W = 8.5$ для объявления тревоги цунами является, по-видимому, заниженным. Реальная опасность для нашего побережья возникает только при землетрясениях с магнитудой $M_W = 9.0$ и выше в определенных цунамигенных зонах. Учитывая возможную погрешность при оперативном определении магнитуды, которая может достигать 0.3–0.5 балла, можно рекомендовать магнитуду $M_W = 8.5$ в качестве порогового значения для введения тревожного режима при обработке удаленных землетрясений. Непосредственное же объявление тревоги цунами и выполнение защитных мероприятий, в частности, эвакуация населения из прибрежной зоны, должны выполняться при получении данных о реально опасных высотах волн, зарегистрированных на промежуточных островных и донных станциях.

6. Риск пропуска сильного цунами от удаленного источника в настоящее время сведен к минимуму благодаря развитым средствам коммуникации и международного обмена данными, осуществляемого в рамках Международной координационной группы МОК/ЮНЕСКО по системе предупреждения о цунами на Тихом океане. Для таких событий остается, однако, проблема прогноза максимальных высот волн, времен достижения этих максимумов в конкретных берего-

вых пунктах и продолжительности статуса тревоги (определение времени безопасного отбоя).

7. Наличие и оперативная доступность данных глубоководных регистраторов цунами системы DART не снимает также проблемы ложных тревог, так как не существует прямой зависимости между амплитудами цунами на глубокой воде и максимальными заплесками в конкретных точках побережья. Здесь необходимо проведение специальных работ по определению наиболее информативных датчиков и установлению такой зависимости на конкретных трассах “источник – защищаемое побережье”.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №№ 12-05-00894, 12-07-00406, 12-05-92697), программы интеграционных фундаментальных исследований СО РАН (проекты № 117А, 37Б), программ Президиума РАН (проекты № 4.10 и № 23.3-2) и Президентской программы “Ведущие научные школы РФ” (грант № НШ-5006.2014.9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловьев С.Л., Ферчев М.Д. Сводка данных о цунами в СССР // Бюлл. Совета по сейсмологии АН СССР. 1961. № 9. С. 23–55.
2. 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.
3. Заякин Ю.А. Цунами на Дальнем Востоке России. Петропавловск-Камчатский: Камшат, 1996. 88 с.
4. Integrated Tsunami Database for the World Ocean (ITDB/WLD), 2000 BC to present // CD-ROM, Tsunami Laboratory, ICMG SD RAS, Novosibirsk, 2014. Web-version: <http://tsun.sccc.ru/nh/tsunami.php>.
5. NOAA/WDS Global Historical Tsunami Database, National Geophysical Data Center, Boulder, USA, 2014 Web-version: http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml.
6. The Chilean Tsunami of May 24, 1960 as observed along the coast of Japan (December 1961). Tokyo: Committee for Field Investigation of the Chilean Tsunami of 1960, 397 p.
7. Важенин Б.П. Проблемы исследования цунами в Северном Охотоморье // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды второй региональной научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2010. С. 312–317.
8. Okal E.A., Synolakis C.E., Fryer G.J. et al. A field survey of the 1946 Aleutian tsunami in the far field // Seismol. Res. Letts. 2002. V. 73. P. 490–503.
9. Кайстренко В.М., Шевченко Г.В., Ивельская Т.Н. Проявления цунами Тохоку 11 марта 2011 года на тихоокеанском побережье России // Сейсм. прибор. 2011. Т. 38. № 1. С. 41–64.

10. *Тюрнин В.Б.* Цунами в северной части Охотского моря, <http://www.meteo.magadan.ru/index.files/Page424.htm>.
11. *Iida K.* Catalog of tsunamis in Japan and neighboring countries. Special Report. Yashigasa: Aichi Institute of Technology, 1984. 52 p.
12. *Федотов С.А.* О сейсмическом цикле, возможности количественного районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 121–150.
13. *Okada Y.* Surface deformation due to shear and tensile faults in the half-space // Bull. Seis. Soc. Am. 1985. V. 75. P. 1135–1154.
14. *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.
15. *Shokin Yu.I., Babailov V.V., Beisel S.A. et al.* Mathematical modeling in application to regional tsunami warning systems operations / Eds: E. Krause *et al.*: Comp. Science & High Perf. Computing III, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design 101. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. P. 52–68.
16. *Косых В.С., Чубаров Л.Б., Гусяков В.К. и др.* Методика расчета максимальных высот волн цунами в защищаемых пунктах побережья Дальнего Востока Российской Федерации // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2013. № 40. С. 115–134.
17. *Гусяков В.К.* Сильнейшие цунами мирового океана и проблема безопасности морских побережий // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. Наст. вып.
18. *Kanamori H.* The energy released in great earthquakes // J. Geoph. Res. 1977. V. 82. P. 2981–2987.
19. GEBCO General Bathymetric Chart of the Oceans http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/.
20. *Stein S., Okal E.A.* The size of the 2011 Tohoku earthquake needn't have been a surprise // Eos Trans. AGU. 2011. V. 92. P. 227–228.
21. *Stein S., Geller R., Liu M.* Why Earthquake Hazard Maps Often Fail and What To Do About It // Tectonophysics. 2012. V. 562–563. P. 1–25.

Numerical Simulation of the Action of Distant Tsunamis on the Russian Far East Coast

S. A. Beisel^a, V. K. Gusyakov^b, L. B. Chubarov^a, and Yu. I. Shokin^a

^a *Institute of Computational Technologies, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
pr. Akademika Lavrent'eva 6, Novosibirsk, 630090 Russia*

^b *Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
pr. Akademika Lavrent'eva 6, Novosibirsk, 630090 Russia
e-mail: chubarov@ict.nsc.ru, gvk@sscc.ru*

Received February 10, 2014; in final form, March 24, 2014

Abstract—Results of a numerical simulation of the action of distant tsunamis on the coast of the Russian Far East are presented. It is shown that waves generated by focuses of the strongest M9 earthquakes in the region of South Chilean coast, as well as in the region of Papua New Guinea and Solomon Islands, are most dangerous for this coast. Other tsunamigenic zones of the Pacific Ocean, by virtue of their geographical position, orientation of focuses, and absence of pronounced channels (submarine ridges) along paths of tsunami propagation are not dangerous for it even at a limit magnitude of submarine subduction earthquakes. The simulation results are compared with historical data about manifestations of distant tsunamis on the Russian Far East coast.

Keywords: tsunami, submarine earthquakes, tsunami danger, tsunami zoning, numerical simulation