

Российская академия наук
Сибирское отделение
Институт вычислительных технологий

"УТВЕРЖДАЮ"
Директор ИВТ СО РАН

академик _____ Ю. И. Шокин

09 декабря 2011 года

**«Моделирование и анализ характеристик проявления удаленных
цунами у защищаемых пунктов Дальневосточного побережья
Российской Федерации»**

ОТЧЕТ

по первому этапу договора на выполнение НИОКР
для государственных нужд по Федеральной целевой программе
«Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций
природного и техногенного характера
в Российской Федерации до 2015 года»

(договор № 03н-11 от 01 октября 2011 г.)

Руководитель работ

г.н.с., д.ф.-м.н., профессор

Л.Б. Чубаров

Новосибирск, 2011г.

Исполнители:

н.с., к.ф.-м.н.

С.А. Бейзель,

в.н.с., д.ф.-м.н.

В.К. Гусяков,

инж.-иссл.

В.В. Смирнов,

зав.лаб., к.т.н.

В.С. Стогниенко,

м.н.с.

Д.Л. Чубаров

Содержание

1	Аннотация.....	4
2	Введение	5
3	Система модельных очагов.....	7
4	Набор виртуальных мареографов	8
5	Результаты моделирования.....	9
6	Заключение.....	16
7	Выводы	16
8	Литература.....	18

1 Аннотация

Согласно Техническому заданию, за отчетный период исполнителями выполнены следующие работы:

1. Создан уточненный представительный набор модельных удаленных очагов цунамигенных землетрясений магнитудой 9.0, потенциально опасных для Дальневосточного побережья России.
2. Определены и представлены в виде специализированной Базы данных характеристики проявления в акватории Тихого океана и на защищаемом побережье волн цунами, вызванных системой модельных удаленных сейсмических источников и рассчитанных по результатам численного моделирования за период 48 часов физического времени распространения волны с использованием расчетной сетки с пространственным шагом 5 угловых минут.

База данных содержит:

- мареограммы, рассчитанные в наборе виртуальных мареографов, установленных на защищаемом побережье (включая защищаемые пункты, входящие в составленный Заказчиком перечень), а также в местах расположения прибрежных гидрофизических датчиков Тихоокеанской системы предупреждения о цунами (PTWS) и глубоководных датчиков системы DART;
 - распределения экстремальных (максимальных и минимальных) значений высот волн цунами в мареографных точках;
 - распределения времен регистрации экстремальных значений высот волн цунами в мареографных точках;
 - распределения времен регистрации первых возмущений в мареографных точках и в акватории всего Тихого океана;
 - распределения максимальных и минимальных высот волн цунами в акватории Тихого океана (картины свечения).
3. Выполнена интерпретация результатов моделирования, материалы которой представлены в настоящем отчете.

К отчету прилагаются:

1. Приложение 1. Параметры модельных очагов.

- Таблица 1 – список параметров модельных удаленных очагов цунамигенных землетрясений с магнитудой $M_w = 9.0$.

2. Приложение 2. Списки точек записи мареограмм.

- Таблица 2 – список 82 защищаемых пунктов;
- Таблица 3 – список 75 прибрежных датчиков Тихоокеанской системы предупреждения о цунами (PTWS);
- Таблица 4 – список 35 автономных глубоководных датчиков DART;
- Таблица 5 – список 20 дополнительных виртуальных датчиков DART.
- Таблица 6 – список 693 виртуальных мареографов, расположенных вдоль защищаемого побережья, в том числе 82 соответствуют защищаемым пунктам (см. табл. 2), 611 – дополнительным.

В этих таблицах N – порядковый номер мареографа в соответствующей таблице, N-g1 – номер мареографа в общем списке мареографов, Lat – географическая долгота реального мареографа, Long – географическая широта реального мареографа, Lat-5min – долгота виртуального мареографа на пятиминутной расчетной сетке, Lat-5min – широта виртуального мареографа на пятиминутной расчетной сетке, Depth-5min – глубина под виртуальным мареографом (в метрах).

3. Приложение 3. Визуальное представление результатов моделирования.

Для каждого модельного источника приведены:

- карты изохрон с шагом 1 час,
- картины максимальных положительных свечений,

- распределения в точках на защищаемом побережье максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева, значения величин – в метрах), а также времена регистрации этих экстремальных значений высот волн и регистрации первых возмущений (розовые, голубые и черные линии соответственно, вертикальная ось справа, значения величин – в часах).

2 Введение

Для Дальневосточного побережья России проблема оценки риска цунами от удаленных землетрясений требует особого рассмотрения, и в этом состоит ее существенное отличие от аналогичной проблемы оценки сейсмического риска, где сейсмические очаги, удаленные более чем на 2-3 тысячи километров, попросту не рассматриваются. Волны же цунами в некоторых случаях способны распространяться на расстояния до 12 – 15 тысяч километров, сохраняя при этом свой разрушительный потенциал. Значительная часть Дальневосточного побережья России открыта к воздействию волн практически от всех основных цунамигенных зон Тихого океана. Однако за все XX столетие реально опасными для него были только два случая удаленных цунами – Чилийское 1960 года (высоты до 3 – 4 метров по всему Охотскому побережью, 5 – 6 метров на Курилах и восточном побережье Камчатки, включая Корякию) и Аляскинское 1964 года (высота до 1 метра на о-ве Парамушир). Два других сильнейших тихоокеанских цунами XX столетия (Аляскинское 1946 года и Алеутское 1957 года) никак не проявились на Дальневосточном побережье РФ. Между тем, тревоги цунами от удаленных землетрясений за период с 1958 года по 2010 год объявлялись 19 раз, в 17 из которых они оказались ложными. Эта статистика показывает, что проблема удаленных цунами требует специального рассмотрения с привлечением всех доступных материалов исторических наблюдений и численного моделирования.

Формальный анализ содержания глобальной базы данных по наблюдениям цунами по типу источника цунами показывает, что в Тихом океане подводные землетрясения ответственны за 82% всех цунамигенных событий. Оставшаяся часть делится между обвальными (10%), вулканогенными (5%) и метеорологическими (3%) цунами (Gusiakov, 2009). Причем подавляющее большинство обвальных и вулканогенных цунами являются локальными, т.е. их ущерб ограничивается расстояниями в несколько сот километров от очага. Даже при крупнейшем вулканогенном цунами в Индонезии, вызванном взрывом вулкана Кракатау в 1883 году, все 36 тыс. погибших оказались на ближайших участках побережья Явы и Суматры, на расстоянии не более 150 – 200 км от очага. При наибольшей измеренной в ближней зоне высоте заплеска в 35 метров, максимальная высота волн в дальней зоне оказалась равной только 1.2 метра (в порту Галле, на Цейлоне). Это показывает, что при рассмотрении угрозы удаленных цунами для Дальневосточного побережья РФ можно ограничить рассмотрение только случаями сейсмогенных цунами.

Имеющиеся исторические каталоги наблюдений цунами на Дальневосточном побережье России (Заякин, 1996; Новый каталог..., 1977; Соловьев, 1978; Соловьев, Ферчев, 1961) и построенная на их основе сводная база данных WinITDB (2010) дают весьма ограниченный набор сведений о проявлениях цунами на Дальневосточном побережье России от удаленных очагов. Приводимые в них сведения касаются, в основном, Чилийского цунами 1960 года, причем данные о его проявлении на побережье внутренних морей (Японского, Охотского, Берингова) отрывочные и далеко не полные. 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 (NGDC, 2010).

Наиболее сильное в прошлом столетии Чилийское землетрясение 22 мая 1960 года ($M = 8.5$) вызвало на большом протяжении восточного побережья Японии волны высотой до 7 – 8 метров, которые нанесли материальный ущерб в десятки миллионов долларов и унесли жизни 200 человек (The Chilean Tsunami..., 1961). На Курило-Камчатском побережье это цунами также наблюдалось повсеместно с высотами 2 – 4 метра. Время распространения цунами от берегов Чили до побережья Камчатки составило 21 час. Волны наибольшей высоты (до 7

метров) наблюдались на Камчатке в бухтах Моржовая и Русская (Соловьев, 1978). Данные о размерах материального ущерба и жертвах в российских каталогах отсутствуют. В каталоге (Заякин, 1996) приводятся краткие сведения о проявлении этого цунами на Беринговоморском побережье Камчатки, описывающие сильные течения и подтопление разгрузочных территорий ряда рыбокомбинатов, выбросы на берег глыб льда, повреждение причалов и мостов на речках.

Исторические каталоги и базы данных содержат сведения о 16 разрушительных цунами, происшедших вблизи побережья Южной Америки за 500 лет исторических наблюдений (1500 – 2010 г.). Из них по крайней мере 7 событий отмечены в каталоге Iida (1984) как вызвавшие опасные (высотой более 1 метра) волны цунами на побережье Японских островов. К сожалению, мы не имеем аналогичных исторических данных по Курило-Камчатскому побережью. Однако, основываясь на модельных представлениях о распространении трансокеанских цунами и на результатах наблюдения цунами 1960 года, можно предполагать, что средние высоты волн южно-американских цунами на Японском и Курило-Камчатском побережьях примерно одинаковы.

По приведенным данным можно оценить средний период повторяемости наблюдения южно-американских цунами с высотами 2 и более метров у берегов Японии. За последние 400 лет (с 1586 по 1995 год) 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 (Федотов, 1968). Отсюда следует, что риск удаленных цунами для Дальневосточного побережья РФ является по крайней мере сопоставимым с риском цунами от близких региональных землетрясений. Максимально возможные высоты волн от таких удаленных землетрясений, по-видимому, не могут превышать 4 – 5 метров, однако, в отличие от региональных цунами, оказывающих разрушительное воздействие на ограниченном по протяженности участке берега, удаленные цунами могут проявляться практически на всем Дальневосточном побережье России, включая побережья Охотского и Берингова морей. Для таких участков побережья, не имеющих вблизи себя активных сейсмогенных зон, риск от удаленных цунами может быть даже выше риска местного и регионального цунами.

Сказанное выше показывает, что проблемы удаленных цунами заслуживает самого тщательного рассмотрения, которое было начато согласно Техническому заданию в 2011 г. (первый этап работы) с определения и анализа общих характеристик воздействия удаленных цунами на Дальневосточное побережье России.

В соответствии с разработанной исполнителями ранее информационно-вычислительной технологией были проведены следующие работы:

1. скорректирован созданный в 2010 г. набор модельных источников;
2. расширен набор виртуальных мареографов за счет включения в него «датчиков», размещенных вдоль защищаемого побережья, а также в местах расположения гидрофизических измерителей Тихоокеанской системы предупреждения о цунами (PTWS) и глубоководных буев системы DART;
3. модифицирован программный инструментарий, в том числе для расширения списка рассчитываемых с его помощью волновых характеристик;
4. проведены предварительные тестовые расчеты, по результатам которых подготовлены уточненные цифровые карты акваторий и определены значения вспомогательных вычислительных параметров;
5. проведены серийные расчеты по определению характеристик проявления в Тихом океане и вдоль защищаемого побережья волн цунами от всего набора модельных очагов цунамигенных землетрясений за 48 часов физического времени распространения волны с использованием 5-минутной расчетной сетки;
6. наполнена база данных; проведен анализ полученных результатов.

Результаты представлены в виде базы данных, файлов с результатами расчетов, таблиц, графиков, рисунков, содержательных текстов. Структуры соответствующих файлов и форматы данных подробно изложены в отчетах, переданных Заказчику в 2007–2010 гг.

3 Система модельных очагов

В силу отмеченного во введении преобладания сейсмогенных цунами в общем числе цунамигенных событий Тихого океана, основные цунамигенные зоны здесь практически совпадают с положением его сейсмогенных зон, образующих так называемый тихоокеанский сейсмический пояс, в пределах которого происходит 99% землетрясений Тихого океана (Рис.1). Из анализа исторических сведений о проявлениях удаленных цунами на Дальневосточном побережье РФ следует, что опасными являются только землетрясения с магнитудой 9.0 или выше. Однако даже при такой предельно возможной магнитуде реальную опасность представляют очаги, определенным образом расположенные по отношению к защищаемому побережью, например, такие, которые обеспечивают ориентацию максимума диаграммы свечения источника в направлении нашего побережья.

Целью настоящего этапа работы по оценке цунамиопасности Дальневосточного побережья РФ было определение тех удаленных цунамигенных зон, возникновение цунами в которых представляет наибольшую опасность для побережья РФ. Основой такого выбора стали рассчитанные в ходе вычислительных экспериментов высоты порожденных удаленными источниками волн цунами у Дальневосточного побережья России. Для выполнения этой работы использовался тот же подход, что и при оценке цунамиопасности подводных землетрясений из ближней зоны – в качестве начальных данных использовались смещения свободной поверхности, порожденные набором модельных источников с наиболее вероятными (или, при недостатке данных, наиболее опасными с точки зрения их цунамигенности) параметрами очага. При этом вертикальные смещения дна океана рассчитывались по алгоритму, описанному в работе (Гусяков, 1978), и затем использовались в качестве начальных данных в программе расчета распространения цунами в океане с реальным рельефом дна.

Построенный набор из 94 удаленных (по отношению к Дальневосточному региону РФ) источников цунами можно условно разбить на группы, соответствующие географическим зонам их расположения. Таких групп можно выделить 9 (в скобках указаны идентификаторы источников, соответствующие их перечислению в Приложении 1):

1. Алеуто-Аляскинская группа (1а – 8а),
2. Североамериканская группа (9а – 22а),
3. Центральноамериканская группа (23а – 29а),
4. Южноамериканская группа (30а – 46а),
5. группа Новой Зеландии – Тонга (47а – 57а),
6. группа Папуа-Новой Гвинеи – Соломоновых островов (58а – 74а),
7. Филиппинская группа (75а – 86а),
8. Курило-Камчатская группа (87а – 90а),
9. группа Гуама (91а – 94а).

Землетрясения 1а, 2а, 86а – 90а фактически являются для Дальневосточного побережья России «пограничными» и «близкими». Они включены в построенную систему очагов для полного покрытия всех возможных сейсмически активных зон Тихого океана, возникновение цунами в которых может угрожать Дальневосточному побережью РФ. Такое решение обеспечивает возможность сравнительной оценки возможных амплитуд волн от удаленных и близких очагов в любой точке защищаемого побережья.

Рассматриваемые источники цунами аппроксимировались системой модельных очагов подводных землетрясений с магнитудой $M_w = 9.0$. Такой очаг представляет 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 $M_0 = 3.6 \cdot 10^{22}$ н·м, что по корреляционному соотношению (Канамори, 1977) $M_w = (\lg M_0 - 16.1)/1.5$ соответствует магнитуде $M_w = 9.0$.

Параметры источников выбирались из соображений соответствия сеймотектоническим особенностям конкретного сейсмогенного региона, вытекающим из концепции поддвига

океанических плит под континентальные в районах активных континентальных окраин. При этом азимут простираения очага в большинстве случаев определялся контуром береговой (островной) линии, а угол падения площадки разрыва (угол DE) 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 (угол LA) во всех случаях, кроме очагов западной оконечности Алеуто-Аляскинской группы, имеющих существенную сдвиговую компоненту, принимался равным 90° , что соответствует наиболее цунамиопасному варианту механизма очага.

Как уже было указано выше, создаваемые такими источниками остаточные смещения дна, рассчитанные по алгоритму, изложенному в работе (Гусяков, 1978), использовались в качестве начальных условий в задаче расчета распространения цунами на реальном рельефе дна Тихого океана. Контуры положительных и отрицательных фрагментов начальных смещений от модельных очагов приведены на Рис.2.

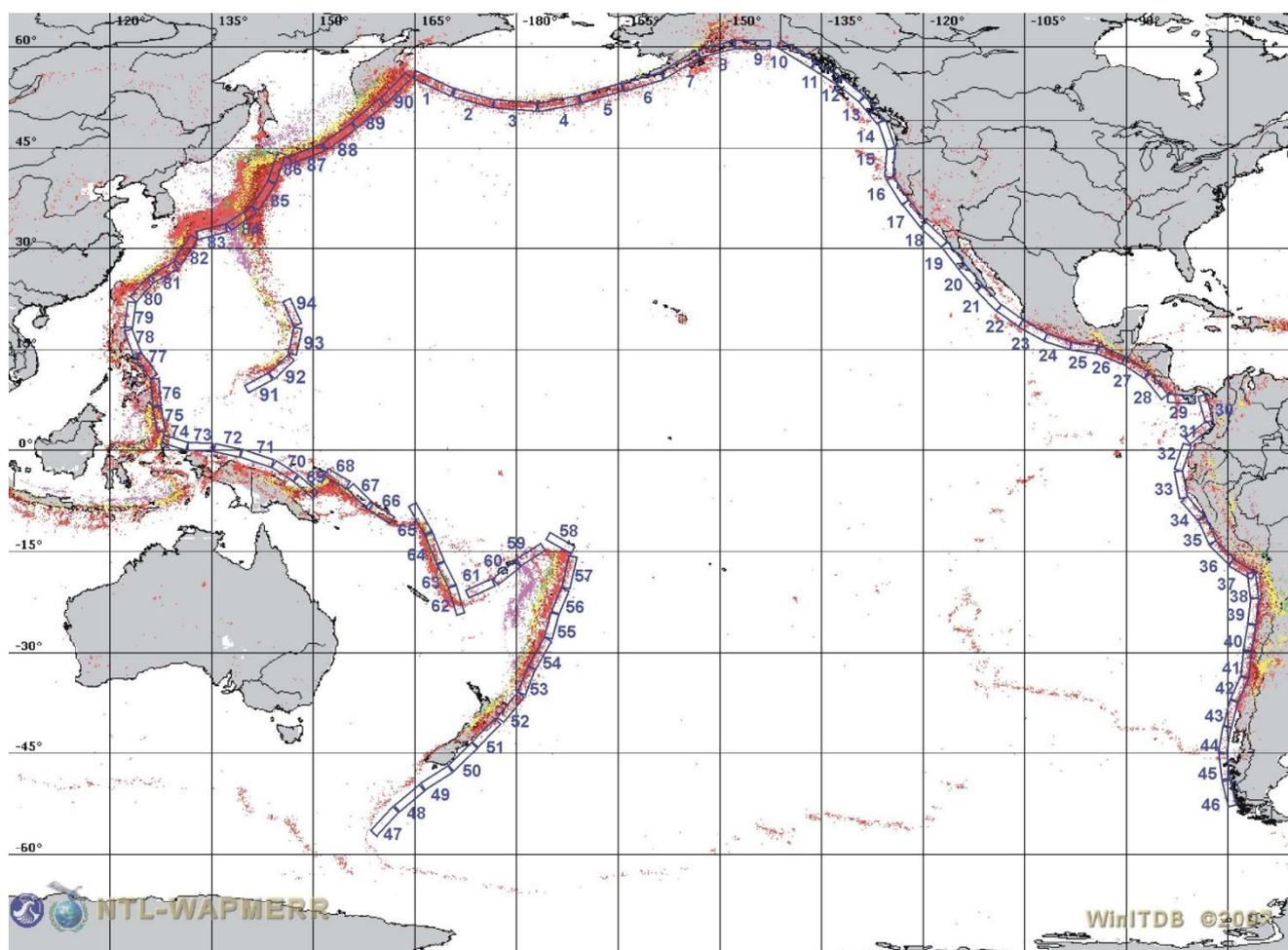


Рис. 1. Карта сейсмичности Тихого океана (за инструментальный период) с нанесенными на нее проекциями площадок разрыва модельных очагов подводных землетрясений с магнитудами $M_w=9.0$.

4 Набор виртуальных мареографов

В ходе постановки задач на вычислительные эксперименты в расчетной области были расставлены 823 виртуальных мареографа – точек записи уровня свободной поверхности. В 2011 г. этот набор был значительно расширен и включал:

- 82 защищаемых пункта (в числе которых пункты Приморья, западного и восточного побережья Сахалина, Курильских островов, восточного побережья Камчатки, Охотск и Магадан),

- 611 дополнительных виртуальных пунктов, размещенных вдоль всего защищаемого побережья с шагом 20 – 30 км; вместе с защищаемыми пунктами виртуальных мареографов на защищаемом побережье оказалось 693;
- 75 виртуальных прибрежных датчиков Тихоокеанской системы предупреждения о цунами (PTWS);
- 35 виртуальных глубоководных датчиков DART;
- 20 дополнительных виртуальных глубоководных датчиков DART, расположенных вблизи защищаемого побережья.

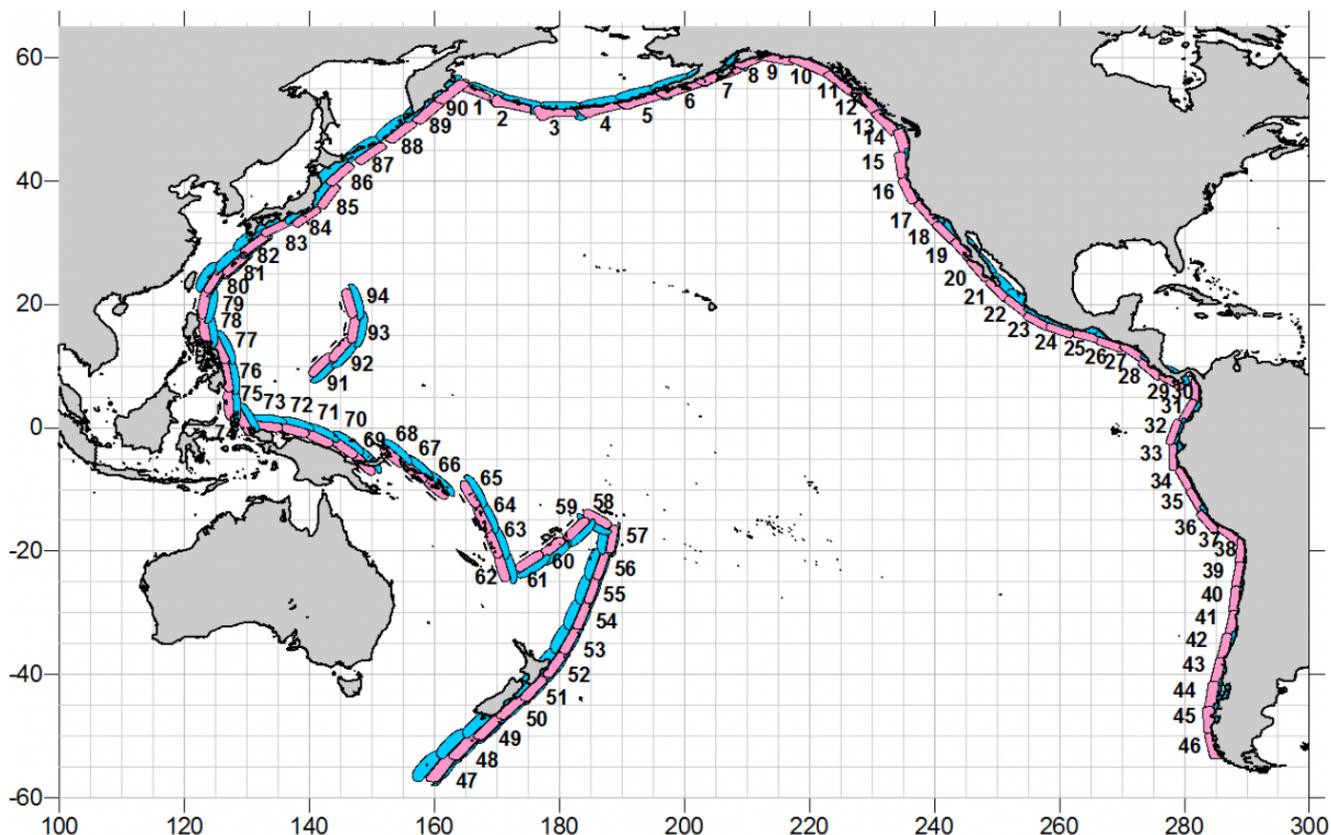


Рис. 2. Схема размещения потенциально опасных очагов цунамигенных землетрясений с магнитудой $M_w = 9.0$. Для удобства вычислений восточная граница расчетной области здесь указывается в 300°

Ниже на рисунках (Рис. 3, Рис. 4) показана схема расположения виртуальных мареографов в расчетной области, а в Приложении 2 (таблицы 2 – 6) приведены их номера (по группам и в общей нумерации), географические координаты (отсутствуют у дополнительных виртуальных мареографов на защищаемом побережье и вблизи него), координаты на расчетной сетке и значения глубин под ними.

5 Результаты моделирования

Моделирование трансформации удаленных относительно Дальневосточного побережья РФ цунами проводилось в расчетной «тихоокеанской» акватории, ограниченной с запада 100° В.Д., с востока 60° З.Д., с юга 60° Ю.Ш. и с севера 65° С.Ш. (см. Рис. 5). Соответствующий массив цифровой батиметрической информации был получен прореживанием одноминутной батиметрии «GEBCO-2009» на регулярную сетку с шагом 5 угловых минут. Физическое время распространения волны составляло 48 часов.

В результате серийных вычислительных экспериментов были рассчитаны:

- мареограммы в точках размещения виртуальных мареографов;
- распределения экстремальных (максимальных положительных и отрицательных)

- значений высот волн цунами в точках размещения виртуальных мареографов;
- c. распределения максимальных положительных и отрицательных высот волн цунами в расчетной акватории (картины свечения).
- d. распределения времен регистрации экстремальных значений высот волн цунами в точках размещения виртуальных мареографов;
- e. распределения времен регистрации первых возмущений в точках размещения виртуальных мареографов и во всех узлах расчетной акватории (ETA (Expected Tsunami Arrival));

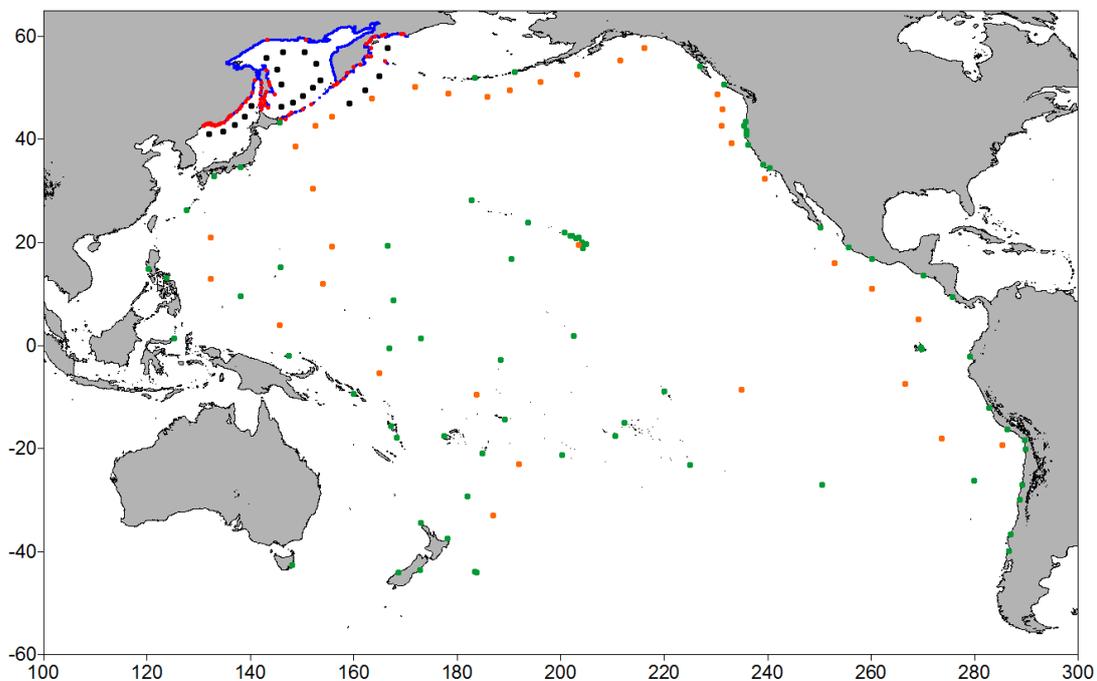


Рис. 3. Схема расположения виртуальных мареографов в расчетной области. Красные точки – «защищаемые» пункты, синие – дополнительные виртуальные мареографы на защищаемом побережье, зеленые – «прибрежные» датчики, оранжевые – виртуальные датчики DART, черные – дополнительные виртуальные датчики DART.

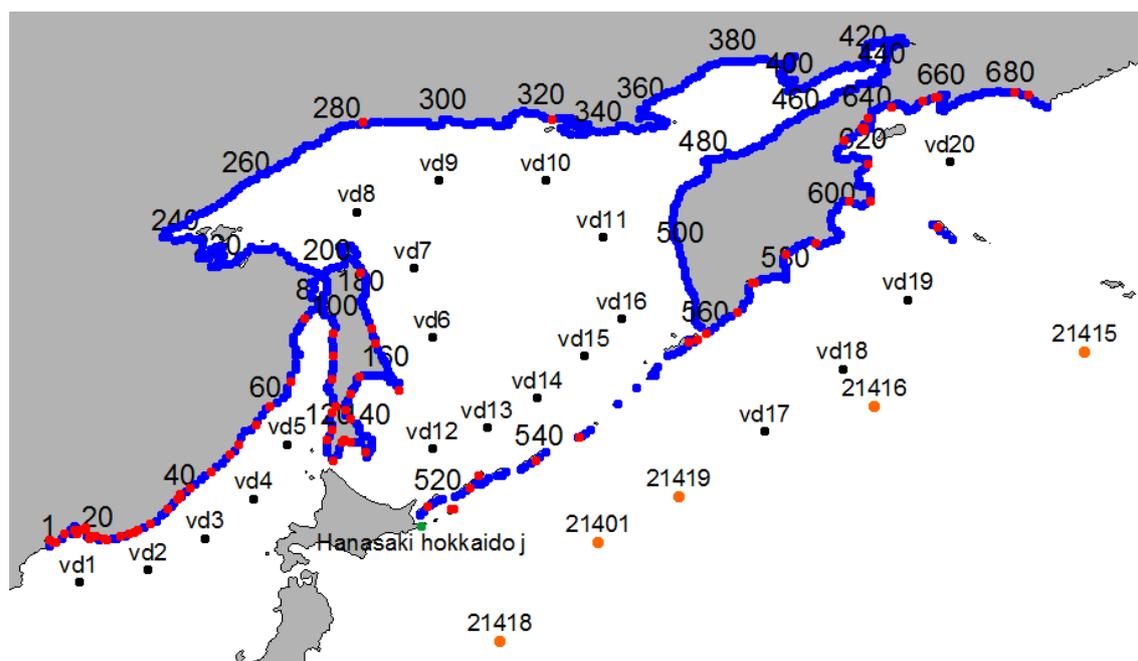


Рис. 4. Схема расположения мареографов вблизи защищаемого побережья. Красные точки – «защищаемые» пункты, синие – дополнительные виртуальные мареографы на защищаемом побережье, зеленые – прибрежные датчики PTWS, оранжевые – виртуальные датчики DART, черные – дополнительные виртуальные датчики DART.

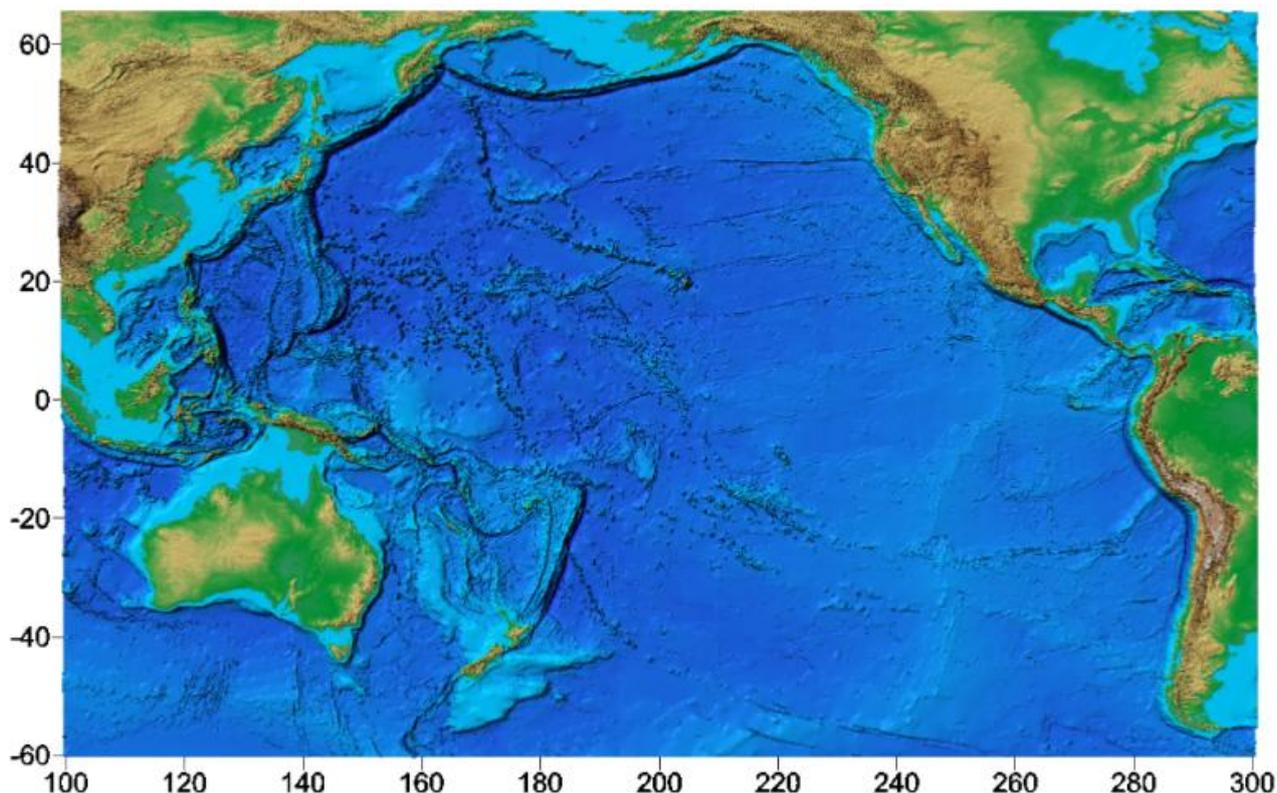


Рис. 5. Рельеф дна расчетной области, использованной для расчетов трансформации волн цунами, порожденных удаленными относительно Дальневосточного побережья РФ потенциально опасными очагами цунамигенных землетрясений.

В совокупность представляемых Заказчику результатов впервые включена характеристика, позволяющая наглядно сравнивать различные цунамигенные зоны по степени их опасности для защищаемого побережья в целом. Такой характеристикой является так называемая интегральная энергетическая характеристика воздействия волн цунами на выбранные точки побережья. Она определялась по формуле

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

где N – число «контрольных» расчетных точек, A_i – размах максимальных колебаний (сумма абсолютных величин максимальных и минимальных значений уровня за все время колебаний, порожденных модельным очагом в i -ой «контрольной» точке). Ниже на рисунке (Рис. 6) показано распределение такой характеристики по всем 693 виртуальным мареографам ($N = 693$), распределенным вдоль защищаемого побережья, рассчитанное от всех модельных источников.

Как показывает приведенная гистограмма, наибольшую опасность для Российского побережья несут, что естественно, землетрясения, располагающиеся в **ближней** зоне, – алеутские источники 1а – 3а (последний, впрочем, по принятой терминологии близким не считается), а также Курило-Камчатские 87а – 90а (значения характеристики для них следует определять по вертикальной оси, находящейся справа, и масштаб у нее в 10 раз больше, чем у левой оси, по которой определяются значения энергетической характеристики для остальных очагов).

Самыми *безопасными удаленными* цунамигенными зонами для Дальневосточного побережья России являются зоны Северной и Центральной Америки, а также северной части Южной Америки, Новой Зеландии, Филиппин и Гуама. Как правило, во всех этих зонах интегральная характеристика ведет себя практически монотонно при переходе от одного очага к другому. Такая устойчивость результатов позволяет с достаточно большой уверенностью интерполировать данные от соседних очагов в случае, когда реальное землетрясение произойдет где-то между ними.

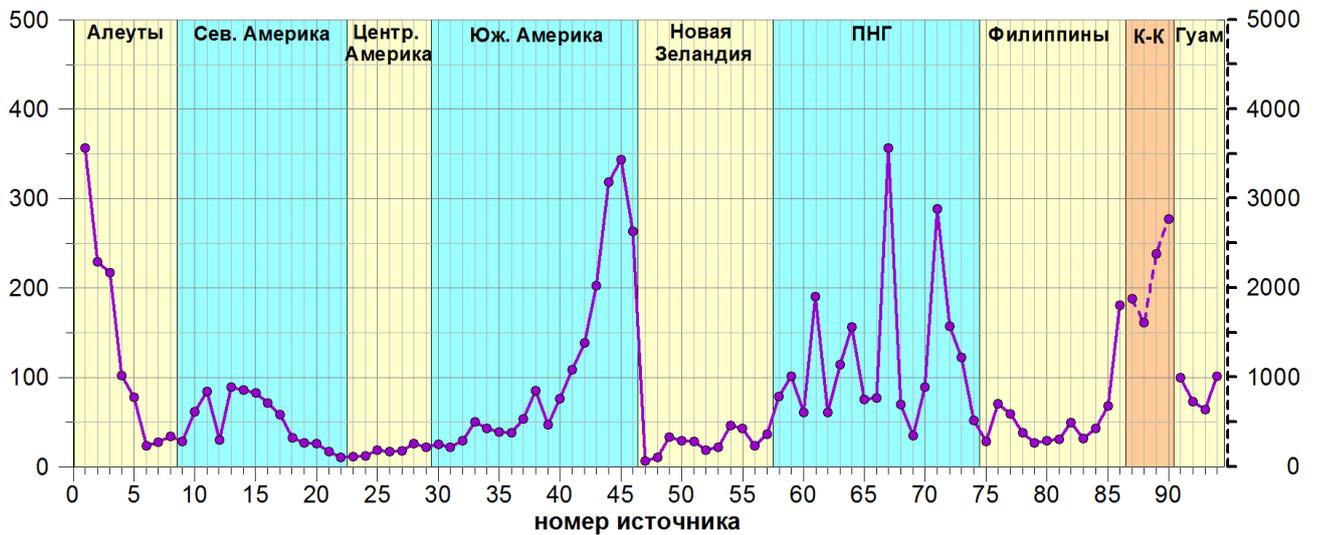


Рис. 6. Интегральная характеристика воздействия различных групп очагов цунамигенных землетрясений на защищаемый участок Дальневосточного побережья РФ. На горизонтальной оси отложен номер очага, на левой вертикальной – интегральная характеристика, на правой – эта же характеристика в другом масштабе для очагов Курило-Камчатской группы (зона со штриховкой).

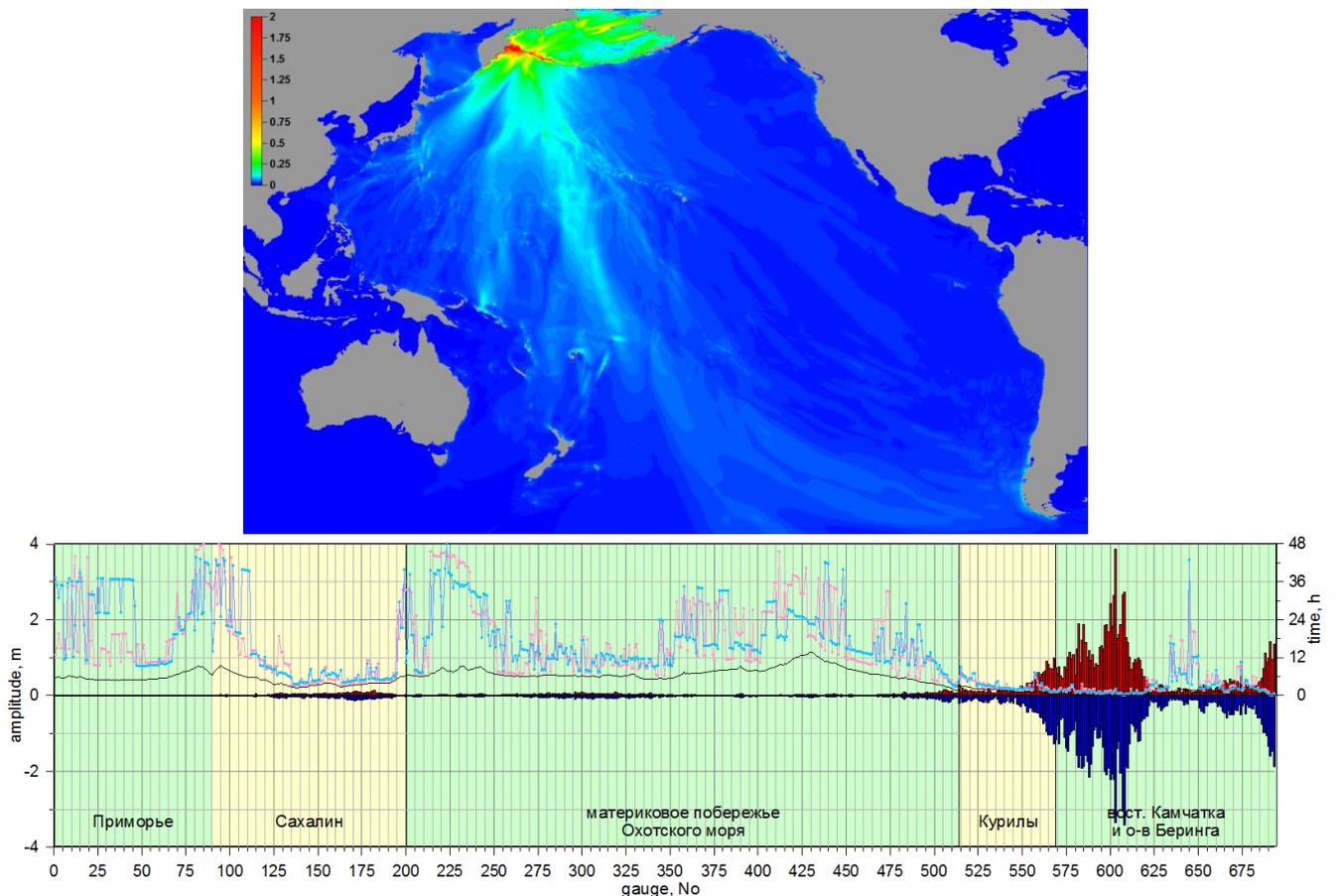


Рис. 7. Свечение и гистограмма для Алеутского источника 90-1а.

Основное исключение здесь составляет североамериканский очаг № 12, самую малую по сравнению с соседями цунамиопасность которого можно объяснить тем, что большая часть его волновой энергии блокируется в проливе Хекате между материком и архипелагом Хайда-Гуай (до 2010 г. – острова Королевы Шарлотты).

При смещении гипоцентра очага от Центральной Америки к югу материка цунамиопасность многократно возрастает, так что наибольшие высоты волн на российском побережье можно ожидать от почти самого южного очага № 45 и немного уступающего ему

более северного очага № 44. Напомним, что в 1960 году катастрофическое землетрясение с магнитудой $M_w=9.5$, приведшее к ощутимым волнам на побережье Дальнего Востока, произошло около Чили вблизи очага № 42 из нашей системы, а он втрое «проигрывает» по своей цунамиопасности своим южным соседям №№ 44 и 45.

Таким образом, по введенной интегральной характеристике можно утверждать, что южноамериканские очаги представляют для Дальневосточного побережья угрозу, вполне сопоставимую с той, что несут в себе гораздо более близкие к этому побережью очаги, расположенные вдоль Алеутских островов. Здесь, однако, стоит напомнить, что обсуждаемая характеристика представляет собой осредненную высоту волны по мареографам вдоль всего защищаемого побережья, и малая ее величина не исключает возможности того, что существует достаточно короткий участок побережья, где высоты волн будут весьма существенными. Так, Алеутские очаги представляют опасность только для восточного побережья Камчатки и северной части Курильских островов, отгораживаясь ими от остального Дальневосточного побережья (Рис. 7).

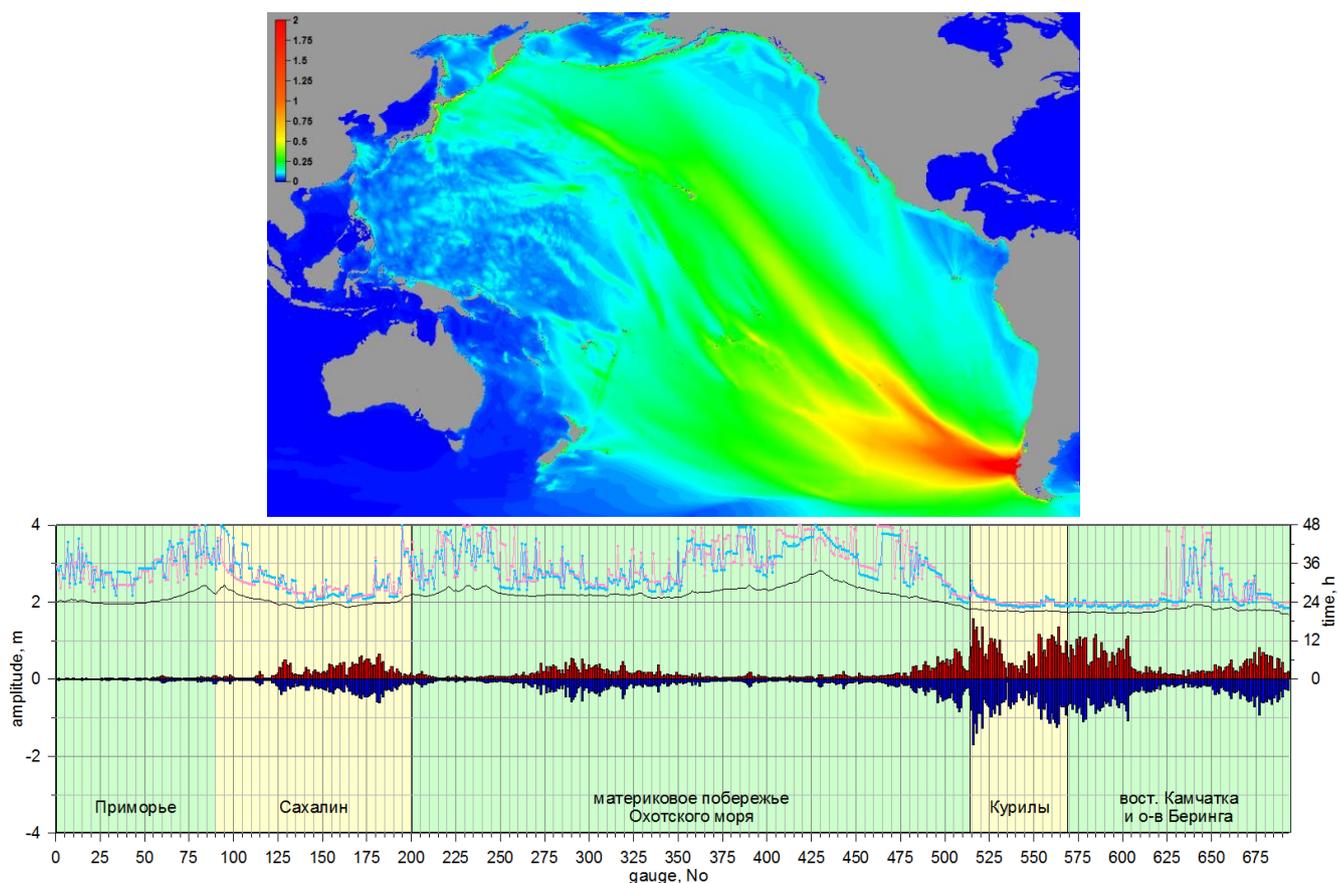


Рис. 8. Свечение и гистограмма для южноамериканского источника 90-45а.

В то же время волны от южноамериканских очагов воздействуют на восточную часть Камчатки слабее, но зато, ударяя по Курильской гряде, хорошо проникают сквозь проливы в Охотское море и достаточно ощутимо проявляют себя на восточном побережье Сахалина, в районе Охотска, Магадана и на западе Камчатки, приводя там к появлению волн с размахом более одного метра (*и это только на грубой сетке!*). При этом опасности для запада Сахалина и Приморского края такие очаги также не представляют (Рис. 8).

Повышенную цунамиопасность для Дальнего Востока России несут и землетрясения в районе Папуа-Новой Гвинеи и Соломоновых островов. При этом, как показывает рисунок (Рис. 6), в этой зоне рассматриваемая нами интегральная характеристика ведет себя очень неустойчиво, в разы изменяясь при переходе от одного очага землетрясения к другому. Это можно объяснить большим количеством островов в этой части акватории Тихого Океана,

аккумулирующих волновую энергию. Особенно выделяются в этой сейсмогенной зоне очаги №№ 67 и 71.

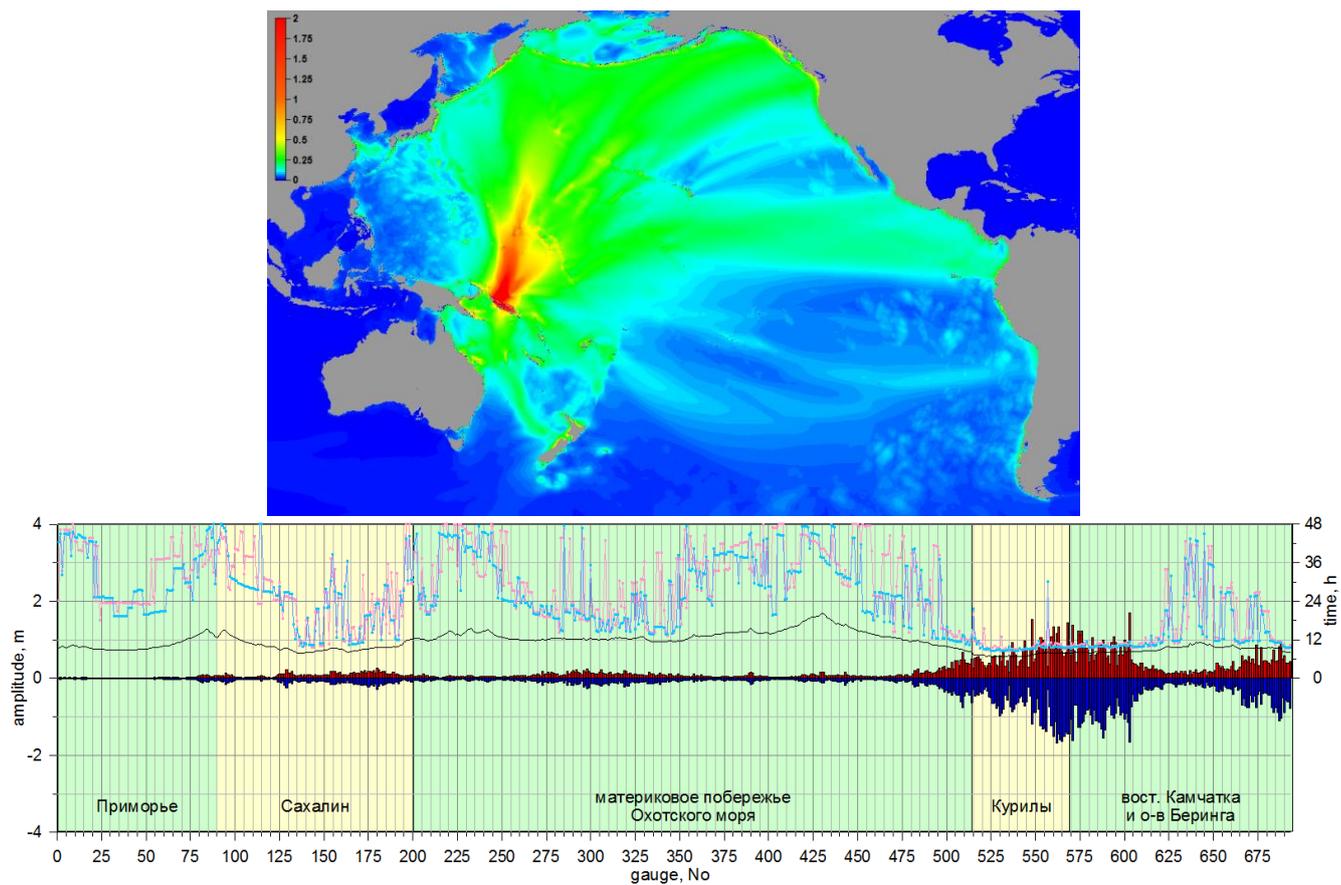


Рис. 9. Свечение и гистограмма для источника 90-67а около Соломоновых островов

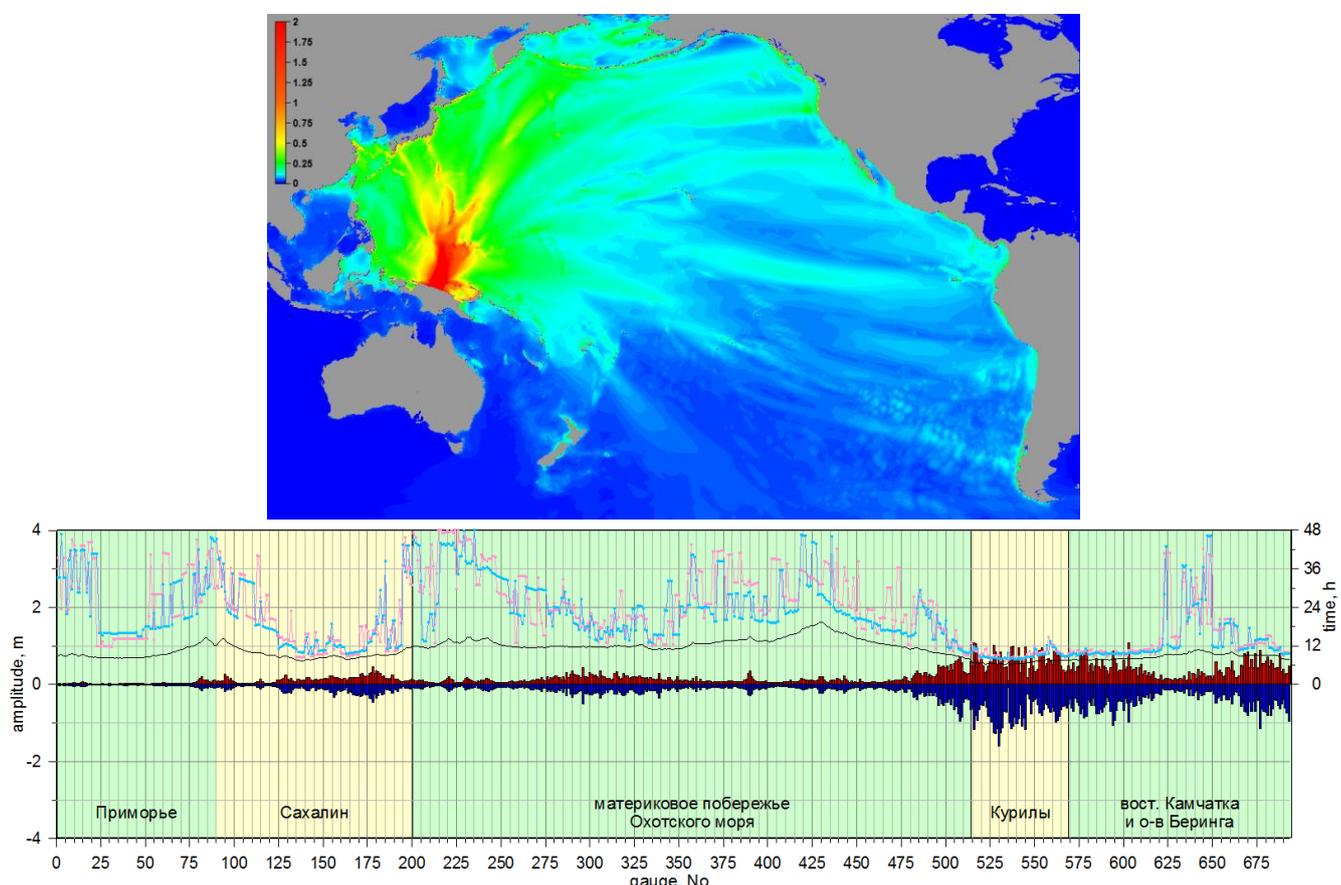


Рис. 10. Свечение и гистограмма для Новогвинейского источника 90-71а.

Как было отмечено в отчете, представленном Заказчику в прошлом, 2010 г., для получения более содержательных выводов о степени опасности для защищаемого побережья удаленных цунами, порождаемых в различных сейсмических зонах Тихого океана, наряду с амплитудными характеристиками необходимо рассматривать и временные, позволяющие выяснить времена прихода экстремальных значений, близость по времени прихода относительных максимумов и минимумов смещений уровня океана. Именно поэтому в настоящий отчет в набор результатов, представляемых Заказчику в 2011 г. впервые оказались включены расчетные времена прихода первого возмущения в каждый узел расчетной сетки, соответствующей «тихоокеанской» акватории, в том числе, в каждую точку размещения виртуальных мареографов. Эти данные позволяют строить карты изохрон, демонстрирующие времена добегания первых волн от очага землетрясения до защищаемого побережья, а также строить гистограммы, показывающие разницу во времени между приходом первой и максимальной волнами и т.п.

В завершающей части отчета для интерпретации результатов привлекаются некоторые соображения, обнаруженные и указанные в уже упоминавшемся отчете 2010 г. Результаты 2011 г. подтвердили обнаруженный ранее эффект, заключающийся в том, что в некоторых случаях максимальные колебания уровня моря наступают много позже (на десятки часов!) прихода не только головной волны, но и энергетического максимума, ожидаемого с учетом дисперсии внутри волнового пакета. Обнаруженные на участках защищаемого побережья особенности проявления цунами совпадают с известными представлениями о том, что в случае трансокеанских цунами имеют место несколько достаточно различных по своей физике процессов. *Первый* – это процесс динамического распространения начального энергетического пакета, излученного очагом. *Второй* – процесс раскачки всего Тихого океана, как единого, но очень сложного по своей конфигурации бассейна, который при достаточно сильном вбросе энергии в эту колебательную систему может продолжаться несколько суток. *Третий* процесс связан с возникновением краевых волн, возбуждаемых подходящими из открытого океана волнами цунами, и их распространением вдоль берега.

В случае «Центральноамериканских» очагов, которые в основном «светят» только на Юго-Восточную часть Тихого океана, максимальные колебания практически во всех пунктах Дальневосточного региона РФ обеспечиваются только такой раскачкой и наступают много позже ETA (на 24 – 48 часов). При этом моменты наступления максимальных приливных и отливных колебаний не совпадают по времени и могут отстоять друг от друга на десятки часов. Очаги в районе Алеут и Новой Гвинеи (Рис. 7, Рис. 10) представляют некоторую промежуточную ситуацию. При таком положении и ориентации очагов часть защищаемого побережья оказывается в зоне влияния боковых лепестков диаграммы свечения источников, соответственно, в таких пунктах максимальный размах колебаний наступает вскоре после ETA, в остальных же обеспечивается последующей раскачкой бассейнов окраинных морей.

В случае «Южноамериканского» очага (Рис. 8), расположенного вблизи южного побережья Чили, который «светит» на Японию, Курильские острова и Камчатку, максимальные волны приходят именно туда, и момент их наступления примерно соответствует расчетным временам ETA плюс 2 – 3 часа. При этом максимальные колебания на побережье Сахалина и Корякии наступают почти на сутки позже прибытия туда головной волны, что говорит о том, что в дело вовлекаются резонансные процессы окраинных морей (Охотского и Берингова).

Указанные обстоятельства сильно осложняют регламентацию рационального выбора времен объявления и, в особенности, отмены тревоги цунами по удаленным событиям, а также влияют на выбор пороговых магнитуд. Здесь можно надеяться на то, что дальнейший анализ результатов (по завершению всей планируемой серии расчетов) покажет, что максимально возможные в Дальневосточном регионе РФ высоты волн от большинства удаленных очагов наступают все же в районе ожидаемого прихода энергетического максимума. Если это окажется не так, то для удаленных очагов реальный прогноз следует строить не на пороговых магнитудах, а на предвычислениях ожидаемых высот цунами на основе поступающих данных от тихоокеанской мареографной сети (в первую очередь, от островных станций типа Wake, Midway, Johnston и др), а также подводных датчиков системы DART.

При землетрясении в ближней (по отношению к защищаемому побережью России) зоне принципиальная схема протекающих в океане процессов остается той же, но диапазон возможных времен наступления максимальных колебаний существенно сокращается (до 1 – 10 часов). Хотя в случаях землетрясения внутри окраинного моря (например, Японского) его раскачка может продолжаться сутки и более. Такие случаи имели место в прошлом – например, при землетрясении 21.06.1983 с $MW = 7.1$ вблизи западного берега о.Хоккайдо, когда максимальные колебания уровня в районе г.Владивостока наблюдались спустя сутки после главного толчка.

6 Заключение

Содержательный анализ полученных результатов показал, что наиболее характерной особенностью трансокеанского распространения цунами от очагов удаленных землетрясений является существование четко выраженной диаграммы излучения энергии с четко выраженным максимумом, направленным, как правило, перпендикулярно плоскости разрыва в очагах. Этот максимум формируется непосредственно в очаговой зоне и является результатом совокупного действия двух основных факторов: (1) начальной асимметрии излучения энергии очагом землетрясения, имеющего двухлепестковую диаграмму направленности с максимумами в направлениях, перпендикулярных плоскости разрыва; (2) вытянутостью очага цунами (соотношение длинной и короткой осей для очагов с магнитудой 9.0 составляет примерно 5:1).

Как видно из представленных диаграмм направленности (Рис. 7 – Рис. 10, Приложение 3), действие этих очаговых механизмов сохраняется на расстояние 4 – 5 тысяч километров. На больших расстояниях основным фактором становится рефракция на неоднородностях подводного рельефа, которая в некоторых случаях (наличие протяженных волноводов над подводными хребтами) может преодолеть эффект цилиндрического расхождения и обеспечить увеличение амплитуд волн на отдельных участках побережья. На сверх протяженных трассах (например, от Южной Америки до Японии) имеет место также эффект фокусировки волновой энергии вблизи антиподальной точки при распространении на сфере.

Рассчитанные диаграммы направленности, в общем, подтверждают достаточно хорошо известный факт, что наиболее опасны для нашего побережья южно-американские очаги, расположенные южнее 30-й параллели, поскольку для них диаграмма излучения направлена непосредственно на Курило-Камчатский регион плюс к этому, по-видимому, для этих очагов работает и эффект фокусировки на сфере. Дополнительным фактором усиления является также наличие обрывистого побережья и крутого континентального склона у берегов Южной Америки, который служит весьма эффективным отражателем энергии цунами, сравнительно со всеми другими цунамигенными зонами Тихого океана. Достаточно неожиданным было обнаружение значительно эффекта влияния очагов в районе Новой Гвинеи, где несколько очагов также «светят» на Курило-Камчатскую зону.

За исключением этих двух отмеченных зон (южно-чилийской и ново-гвинейской) все остальные районы Тихоокеанского сейсмического пояса не представляют значительной угрозы для Дальневосточного побережья России, поскольку основная энергия цунами рассеивается на акватории Тихого океана. Исключение составляют только очаги в западной части Алеутской гряды и северной Японии, однако, они являются по сути «пограничными» по отношению к близким региональным очагам, расположенных непосредственно в Курило-Камчатской зоне.

Среди рассмотренных в расчетах модельных очагов наименьшей степенью опасности характеризуются центрально-американские, направляющие свой энергетический поток к юго-западу. Относительно слабо у берегов России проявляются волны цунами, вызванные очагами северо-американской, новозеландской, филиппинской групп и группы вблизи Гуама.

7 Выводы

1. Выполненный анализ условий возбуждения и распространения цунами от удаленных цунамигенных зон Тихого океана показывает, что их влияние на Дальневосточное побережье РФ крайне неравномерно и определяется как взаимным расположением и ориентацией зоны,

так и элементами подводного рельефа дна на трассе распространения. Помимо этого, высоты волн сильно зависят от типа защищаемого побережья (открытое океаническое побережье, западное побережье островной дуги, побережье внутренних морей).

2. Совместный анализ исторических данных и результатов моделирования показывает, что наиболее опасной из удаленных зон является южно-американская зона. Благодаря специфике взаимного расположения области источника и области воздействия (удаленность почти точно на 180° , в силу чего происходит заметная конвергенция фронта цунами при распространении на сфере) и малому затуханию с расстоянием (в пределе по закону $1/\sqrt{r}$, минимально возможному с точки зрения закона сохранения энергии), сильнейшие южно-американские цунами оказывают разрушительное воздействие на побережье Японии, Курильских остров и Камчатки. Дополнительным фактором усиления является также наличие обрывистого побережья и крутого континентального склона у берегов Южной Америки, который служит весьма эффективным отражателем энергии цунами, сравнительно со всеми другими цунамигенными зонами Тихого океана.

3. Вторым опасным цунамигенным регионом является район Тонга – 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 М9) землетрясениям в этой зоне не означает невозможность их возникновения. С особой очевидностью этот факт проявился во время землетрясения и цунами 11 марта 2011 года вблизи побережья Тохоку (Япония), имевшего наиболее длинный по времени (более 1100 лет) каталог исторических наблюдений, в котором не было событий подобного класса.

4. На участках Дальневосточного побережья России, обращенных в сторону открытого океана, приход максимальных амплитуд цунами, как правило, совпадает с расчетными временами ЕТА, 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 результатов численного моделирования распространения цунами от очагов в удаленных цунамигенных зонах Тихого океана показывает, что принятое сейчас пороговое значение магнитуды ($M = 8.0$) для объявления тревоги цунами скорее всего является заниженным. Реально опасными, требующими заблаговременного приведения в готовность всех береговых служб, являются только землетрясения, начиная с магнитуды $M = 9.0$, происходящими в определенных цунамигенных зонах. При этом особого внимания требуют очаги в «пограничных» районах (западная часть Алеутской дуги, северная часть Японии).

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 в Тихом океане. Однако это не устраняет проблему ложных тревог при удаленных событиях, а также проблему своевременной отмены статуса тревоги для населения прибрежных территории. Наличие и быстрая доступность данных глубоководных регистраторов цунами системы DART также не снимает этой проблемы, т.к. не существует прямой зависимости между амплитудами цунами на глубокой воде и максимальными заплесками в конкретных точках побережья. Здесь необходимо проведение специальной серии расчетов по определению наиболее информативных датчиков и установлению такой зависимости на конкретных трассах источник – защищаемое побережье.

8 Литература

1. 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.
2. Заякин Ю.А. Цунами на Дальнем Востоке России, Петропавловск-Камчатский: Камшат, 1996, 88с.
3. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 года. Под ред. Кондорской Н.В., Шебалина Н.В., М., Наука, 1977, 535 с.
4. Соловьев С.Л. Основные данные о цунами на Тихоокеанском побережье СССР, 1937-1976 гг. // В кн.: Изучение цунами в открытом океане, М., Наука, 1978, С. 61–136.
5. Соловьев С.Л., Ферчев М.Д. Сводка данных о цунами в СССР // Бюлл. Совета по сейсмологии АН СССР, 1961, № 9, С. 23–55.
6. Федотов С.А. О сейсмическом цикле, возможности количественного районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР, 1968, С. 121–150.
7. Gusiakov V.K. Tsunami history – recorded // In: A.Robinson, E.Bernard (Eds.). The Sea, Vol.15, Tsunamis, Harvard University Press, Cambridge, USA, 2009, P. 23–53.
8. Iida I. // Catalog of the tsunamis in Japan, Special Report, December 1984, Aichi Inst. of Technology, 52 pp.
9. Kanamori H. The energy released in great earthquakes // J.Geoph. Res., 1977, 82, P. 2981–2987.
10. The Chilean Tsunami of May 24, 1960 as observed along the coast of Japan (December 1961), Committee for Field Investigation of the Chilean Tsunami of 1960, 397 pp.
11. National Geophysical Data Center, Boulder, USA, 2010,
http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml
12. WinITDB (Integrated Tsunami Database for the World Ocean), Version 5.16 of December 31, 2010, CD-ROM, Tsunami Laboratory, ICMMG SD RAS, Novosibirsk, Russia, 2010,
<http://tsun.sccc.ru/nh/tsunami.php>