

УДК 551.465

## КОМАНДОРСКАЯ СЕЙСМИЧЕСКАЯ БРЕШЬ: ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И РАСЧЕТ ЦУНАМИ

© 2014 г. Л. И. Лобковский<sup>1</sup>, Б. В. Баранов<sup>1</sup>, К. А. Дозорова<sup>1</sup>, Р. Х. Мазова<sup>2</sup>,  
Б. А. Кисельман<sup>2</sup>, Н. А. Баранова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва  
e-mail: bbaranov@rambler.ru

<sup>2</sup>Нижегородский государственный технический университет, Нижний Новгород  
e-mail: raissamazova@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.11.2012 г., после доработки 17.06.2013 г.

Период “сейсмического молчания” Командорской сейсмической брешки близок к максимальному интервалу повторяемости сильнейших землетрясений Алеутской островной дуги, что указывает на вероятность возникновения здесь сильнейшего землетрясения. В работе представлены результаты моделирования цунами от такого события. Авторами была использована схема, успешно примененная ими для ближайшего аналога – Суматра-Андаманского цунамигенного землетрясения. Предполагалось, что магнитуда возможного землетрясения – 9.0, очаг цунами имеет длину около 650 км и состоит из 9 блоков. Были рассчитаны параметры распространения цунами в Тихом океане и характеристики волн на побережье для нескольких возможных сценариев движения блоков. Проведен спектральный анализ полученных волновых характеристик и выявлены эффекты интерференции волновых фронтов. Моделирование показало, что высоты волн на отдельных участках побережья могут достигать 9 метров. Такие волны способны вызвать значительные разрушения и гибель людей.

DOI: 10.7868/S0030157414030071

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что в зонах субдукции сильнейшие землетрясения с  $M_w \geq 7.8$ , как правило, генерируют цунами. События последних лет показали, что разрушения и гибель населения происходят, главным образом, не за счет колебаний поверхности во время самого землетрясения, а за счет следующего за ним цунами [10, 11, 23]. Цунами представляет опасность не только для близлежащего побережья, но и для побережий, расположенных на значительном удалении от области их генерации.

В данной работе место, время и структура очага возможного сильнейшего землетрясения, способного генерировать цунами, определяются на основании блоковой (“клавишной”) модели возникновения землетрясений в зонах субдукции [см., например, 24]. Суть ее такова: островодужный выступ состоит из отдельных крупных сегментов, образованных поперечными разломами, проникающими вплоть до кровли поддвигаемой плиты. Эти разломы определяют границы сейсмогенных блоков (клавиш) островодужного выступа, представляющих собой более мелкие элементы взаимодействия между нависающей и поддвигаемой плитами. Характерный размер блоков-клавиш составляет около 100 км. Но иногда длина очагов сильнейших землетрясений со-

ответствует длине нескольких смежных блоков, в которых происходит одновременная разрядка накопленной упругой энергии.

В рамках этой модели в 2006 г. был сформулирован прогноз сильнейшего землетрясения для Центрально-Курильской сейсмической брешки и проведено моделирование распространения волны цунами от предполагаемого землетрясения [2, 4]. 15 ноября 2006 г. в этом районе действительно произошло сильнейшее землетрясение ( $M_w = 8.3$ ), вызвавшее волну цунами [5]. Фактические данные, полученные после этого события, показали хорошее совпадение с расчетными результатами [5] и подтвердили сделанный прогноз.

В настоящей работе этот подход был использован для определения сейсмического потенциала Командорской сейсмической брешки, которая располагается в западной части Алеутской островной дуги, и для численного моделирования распространения и наката волны цунами, генерированной потенциальным очагом землетрясения.

### 2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОМАНДОРСКОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ БРЕШКИ

Сейсмическими брешками считаются участки островных дуг и активных континентальных окра-



**Рис. 1.** Расположение очагов землетрясений ( $M \geq 7.4$ ) и сейсмических брешей Алеутской островной дуги по [32] с дополнениями очагов землетрясений 1986, 1996 и 2003 гг. Линией с треугольниками обозначена зона субдукции, со стрелками – трансформный разлом.

ин, где в течение 50–100 лет отсутствовали сильнейшие землетрясения, и которые рассматриваются как места наиболее вероятной генерации подобных событий в будущем [9, 26–28]. Сильнейшие землетрясения в Алеутской дуге происходили в течение отдельных интервалов времени, один из которых продолжался с 1938 г. по 1965 г. Очаги этих землетрясений заполнили фронтальную часть Алеутской дуги, за исключением трех участков (рис. 1), которые были выделены в качестве Командорской, Уналашкинской и Шумагинской сейсмических брешей [15, 20, 29, 32].

Рассматриваемая в настоящей работе Командорская брешь располагается во фронтальной части Командорских о-вов на западном окончании Алеутской островной дуги. За весь период инструментальных наблюдений здесь было зарегистрировано только одно землетрясение 30 января 1917 г. с  $M_w = 8.1$  [1]. Событие 1971 г., очаг которого также показан на рис. 1, относится к Камчатке и определяет западную границу Командорской сейсмической брешы. Ее восточной границей является очаг землетрясения 1965 г., а максимальная длина, включая очаг события 1917 г., составляет примерно 500 км.

Наличие сейсмической брешы в пределах западного участка дуги дает основания предполагать, что смещения между Тихоокеанской плитой и фронтальной частью Командорского сегмента отсутствуют, и поэтому здесь происходит накопление деформаций и напряжений. Это подтверждается данными GPS наблюдений [3, 12].

### 3. ХАРАКТЕР СМЕЩЕНИЯ БЛОКОВ АЛЕУТСКОЙ ОСТРОВНОЙ ДУГИ

Данные GPS свидетельствуют о том, что блоки Алеутской островной дуги перемещаются в западном направлении, причем, из-за увеличения сдвиговой составляющей, скорости перемещения равны 3.1, 9.6 и 31.4 мм/год для восточной, центральной и западной частей дуги, соответственно [12]. Скорость перемещения блоков возрастает на западном окончании Алеутской дуги (Командорском блоке), где косой подвиг трансформируется в сдвиг. GPS измерения показали, что в течение нескольких лет о. Беринга сближался с Камчаткой со скоростью около 50 мм/год [3]. Это значение составляет порядка 2/3 от 79 мм/год – скорости схождения между Тихоокеанской и Евразийской (Охотской) плитами вблизи точки сочленения Алеутского и Курило-Камчатского желобов [16]. В связи с этим предполагается [8], что в настоящее время Командорский блок перемещается вместе с Тихоокеанской плитой относительно структур Командорской котловины. В свою очередь фронтальная часть Командорского блока сцеплена с Тихоокеанской плитой и на этой границе происходит рост напряжений и деформаций. Это

согласуется с представлением о том, что данный участок дуги является сейсмической брешью.

#### 4. БЛОКОВОЕ СТРОЕНИЕ КОМАНДОРСКОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ БРЕШИ

Алеутская островная дуга состоит из прилегающих друг к другу блоков земной коры с линейными размерами от десятков до сотен километров [19]. Границами блоков являются контролируемыми разломами каньоны, которые секут фронтальную (южную) часть дуги поперечно к ее генеральному простиранию. Эти каньоны также ограничивают очаги сильнейших землетрясений, например, очаги землетрясений 1965 и 1957 гг.

В результате морских экспедиций, проведенных на западном отрезке Алеутской островной дуги [7, 13, 18], в Командорском сегменте были выявлены активные правосторонние разломы, параллельные этому участку островной дуги. Правосторонние смещения по этим разломам ведут к формированию поперечных разрывных нарушений, выраженных в рельефе дна каньонами. Поперечные разрывные нарушения разбивают Командорскую сейсмическую брешью на восемь блоков размерами 50–100 км. Мы предполагаем, что при возникновении сильнейшего землетрясения может активизироваться также блок, соответствующий очагу события 1971 г., и поэтому при моделировании рассматриваем 9 блоков общей длиной 650 км (рис. 2). Если в момент землетрясения произойдет одновременное высвобождение накопленной энергии во всех 9 блоках, его магнитуда может достичь  $M_{\max} = 9.2$  [33] и вызовет разрушительное цунами.

Существующий в настоящее время математический аппарат дает возможность создавать модели генерации и распространения волны цунами для различных случаев блокового строения сейсмического очага [например, 24, 25].

#### 5. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При моделировании в качестве аналога было использовано Суматра-Андаманское землетрясение 29 декабря 2004 г., которое произошло в похожих геодинамических условиях. Северная часть Зондской дуги и западная часть Алеутской дуги приурочены к участкам зон субдукции, где подвиг постепенно сменяется правосторонним сдвигом. В связи с этим, сценарий возможного землетрясения в районе Командорской брешии может реализовываться по сценарию Суматра-Андаманского землетрясения 2004 г. В результате детального изучения этого события было установлено, что длина очага была равна 1300 км и он состоял из 9–12 суб-очагов или блоков (“клавиш”) [10, 22]. Вспарывание очага происходило с юго-востока на северо-запад на протяжении 10 мин

со скоростью 2 км/с [31], пиковые смещения в южной части очага были равны 20 м [21], а очаг цунами имел длину 1000 км и ширину 250 км [17]. Если рассматривать происходившее с позиций “клавишной” модели, то событие состояло в почти одновременном срыве большого числа блоков-клавиш, с образованием гигантского очага землетрясения, вызвавшего мега-цунами. Как было указано выше, именно такой сценарий наиболее всего вероятен и в случае Командорской сейсмической брешии.

Если очаг будущего землетрясения захватит всю Командорскую сейсмическую брешью вместе с очагом землетрясения 1971 г., то его длина будет примерно равна 650 км, т.е. в два раза меньше длины очага Суматра-Андаманского землетрясения. При моделировании цунами в Командорской брешии временные характеристики были заданы с учетом этой аналогии. В принятой модели распространение разлома происходит с востока на запад на протяжении 5 мин (300 с). Очаг землетрясения разделен поперечными разломами на 9 блоков. Смещения в восточной части разлома задаются поддвиговыми, а в западной — сдвиговыми. Магнитуда землетрясения принята  $M = 9$ . Оценка максимальной высоты подъема блоков в восточной части очага дает величину порядка 18 м.

#### 6. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ЦУНАМИ

Для проведения численного моделирования цунами от очага возможного землетрясения, соответствующего Командорской сейсмической брешии, была использована система нелинейных уравнений мелкой воды, которая для данного случая может быть представлена в виде [4]:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = f_1 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} = f_2 \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(\eta + H - B)u] + \frac{\partial}{\partial y}[(\eta + H - B)v] = \frac{\partial B}{\partial t} \end{cases}, \quad (1)$$

где  $f_1 = \frac{-C_h}{H + \eta} u \sqrt{u^2 + v^2}$ ,  $f_2 = \frac{-C_h}{H + \eta} v \sqrt{u^2 + v^2}$  — донное трение,  $x, y$  — пространственные координаты по осям  $Ox$  и  $Oy$ , соответственно,  $t$  — время;  $u(x, y, t)$ ,  $v(x, y, t)$  — средние по глубине горизонтальные компоненты скорости потока жидкости;  $\eta(x, y, t)$  — смещение свободной поверхности относительно ее спокойного уровня;  $H$  — максимальная глубина бассейна при невозмущенной воде,  $B(x, y, t)$  — описывает смещение поверхности дна относительно исходного положения (учет динамических характеристик сейсмического очага);  $g$  — ускорение

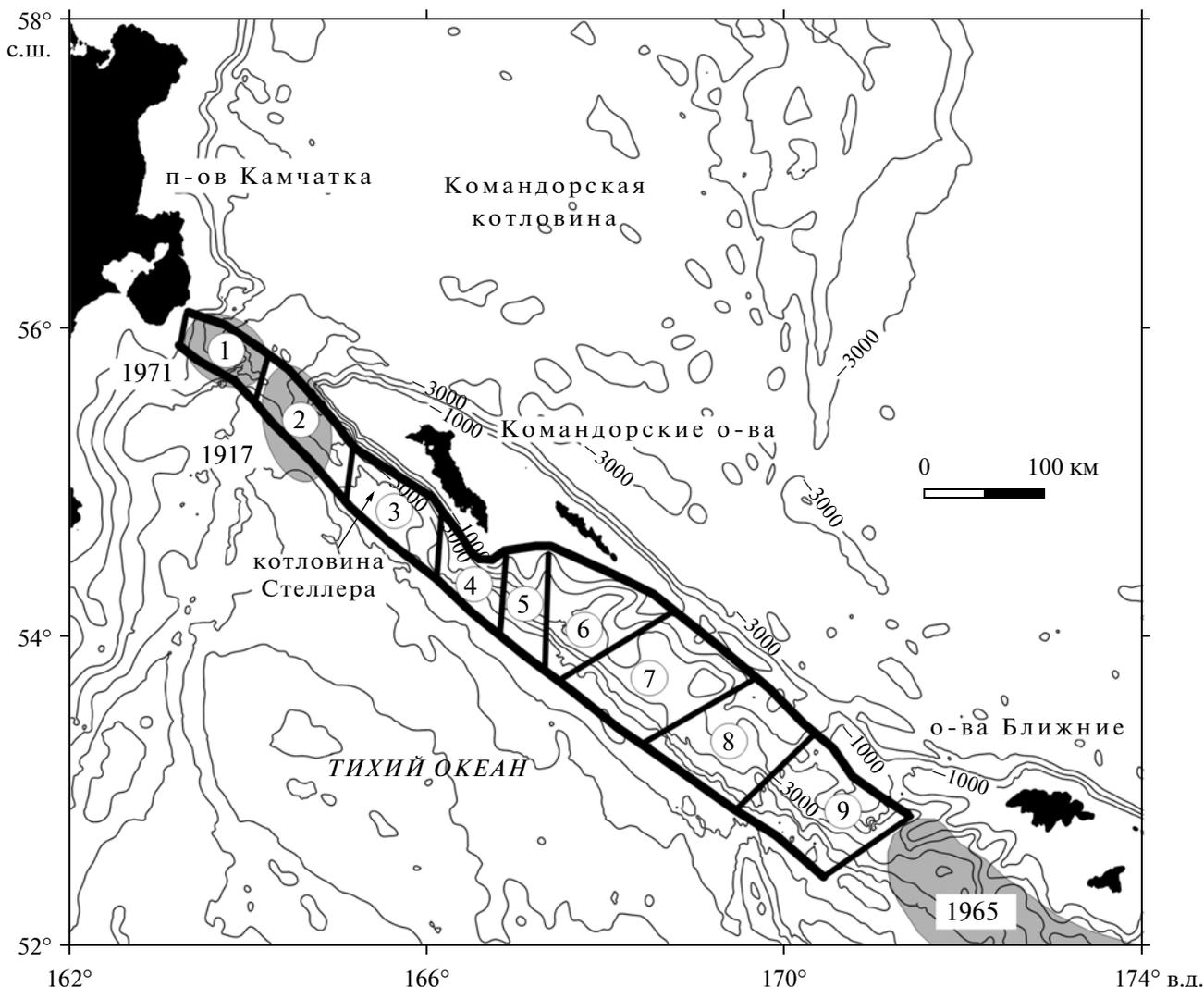


Рис. 2. Схема блоков земной коры Командорской сейсмической бреши и положение очагов сильнейших землетрясений (овалы серого цвета). Жирные линии – правосторонние сдвиги, тонкие линии – поперечные разломы. Основой является батиметрическая карта [30] с сечением изобат 1000 м.

свободного падения,  $Ch = \frac{(H + \eta - B)^{0.4}}{sh}$  – коэффициент донного трения (коэффициент Шеши),  $sh$  – коэффициент шероховатости.

Для моделирования использовалась батиметрическая карта Тихого океана с разрешением в одну угловую минуту. Моделирование проводилось с временным шагом в 1 с. На каждом шаге проводилась проверка условия обрушения волны. Расчетная область, применяемая для данных расчетов, выбиралась в квадрате  $125^\circ$  в.д. –  $100^\circ$  з.д.,  $30^\circ$  с.ш. –  $60^\circ$  с.ш. с сеткой, включающей в себя число узлов:  $4042 \times 1808 = 7307936$ . В последней мористой точке на глубине 10 м поставлено условие полного отражения (вертикальная стенка), позволяющее зафиксировать на этой глубине максимальную и минимальную величины смеще-

ния волнового уровня. Из множества разностных схем, аппроксимирующих уравнения (1), как базовая была взята схема из работы [6], обладающая высокой алгоритмической гибкостью. Схема была модернизирована для возможности использования кинематики и динамики движений в очаге землетрясения. Расчет производился в пределах выбранной акватории, на берегах которой были расположены виртуальные мареографы (рис. 3). Данные, полученные с этих мареографов, были использованы для анализа характеристик волновых полей в расчетной акватории.

Исходя из принятых предположений по реализации возможного землетрясения, был проведен расчет генерации очага цунами сейсмическим источником при учете только вертикальной составляющей смещения блоков, на которые разбит ис-

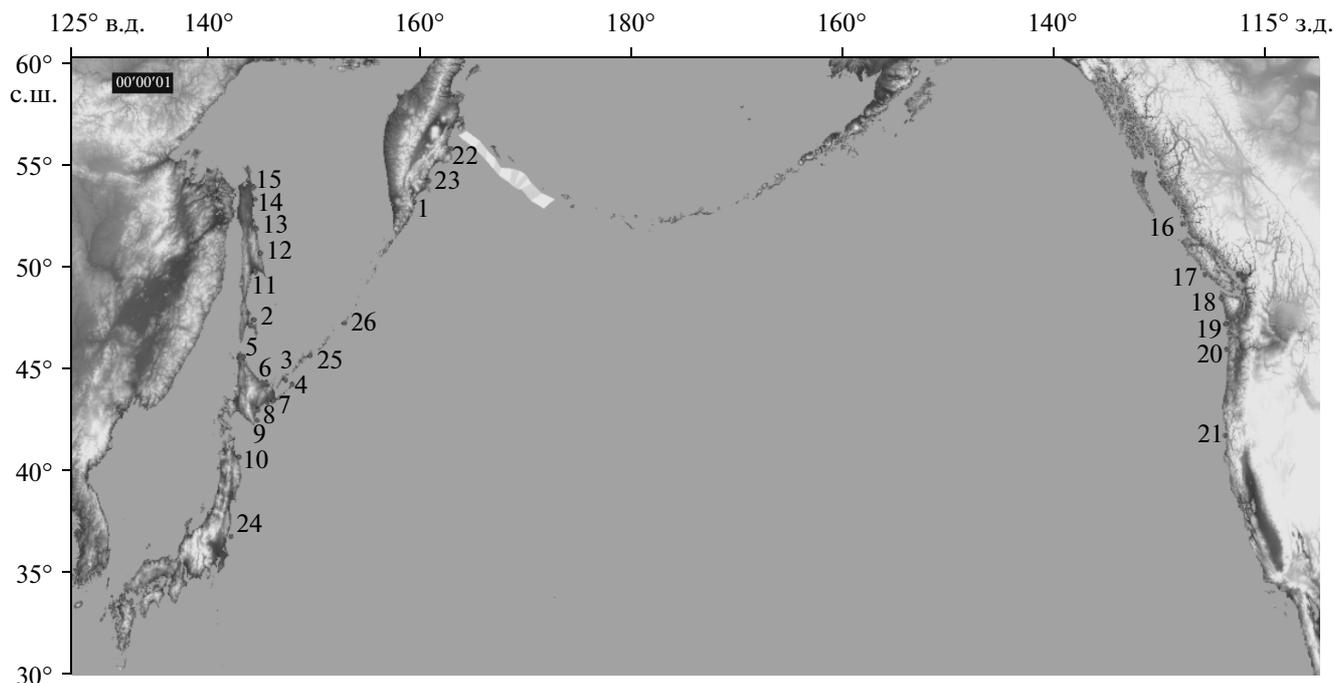


Рис. 3. Акватория для численного моделирования с локализацией сейсмического очага. Точками и цифрами отмечено положения виртуальных мареографов.

точник (рис. 2). В табл. 1 приведены координаты вершин блоков в плане, моменты начала подъема блоков, высоты и время подъема. Для данного сценария очаг цунами полностью сформирован на 300-ой секунде после начала землетрясения (рис. 4). Хорошо видно, что формирование очага происходит с юго-востока на северо-запад, причем форма очага непосредственно зависит от заданной кинематики блоков в сейсмическом очаге (рис. 2, табл. 1). При реализации процесса вертикального смещения дна в очаге землетрясения

необходимо учитывать гидродинамический характер рассматриваемой модели. Поскольку время подъема блоков достаточно мало (табл. 1, рис. 2), то реализуется вариант мгновенной поршневой подвижки, при которой, в силу несжимаемости и гидростатичности жидкости, передающей давление, поверхность океана поднимется на ту же величину, на которую сместился блок на дне. Однако, при более медленном подъеме для блоков 1–6 высота волны будет убывать пропорционально  $1/r^2$ , и для формирования высоты в очаге цунами,

Таблица 1. Параметры блоков-клавиш, принятые для данного моделирования

Номера блоков	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Координаты блоков									
X1	164.37	164.37	165.37	166.17	166.67	167.67	168.07	168.77	169.67
Y1	54.53	54.53	54	53.53	53.235	52.883	52.706	52.588	52.034
X2	164.79	164.79	165.52	166.32	166.82	167.92	169.12	169.72	170.72
Y2	54.895	54.895	54.449	54.037	53.596	53.567	53.302	52.861	52.39
X3	163.4	165.37	166.17	166.67	167.67	168.07	168.77	169.67	170.89
Y3	54.845	54	53.53	53.235	52.883	52.706	52.588	52.034	51.671
X4	163.83	165.52	166.32	166.82	167.92	169.12	169.72	170.72	171.92
Y4	55.162	54.449	54.037	53.596	53.567	53.302	52.861	52.39	52.096
Начало движения блока $T_0$ , с	250	180	130	100	70	40	20	10	0
Окончание движения блока $T$ , с	300	250	180	130	100	70	40	20	10
Смещение блока $B$ , м	12	13	13	13	14	16	18	18	18

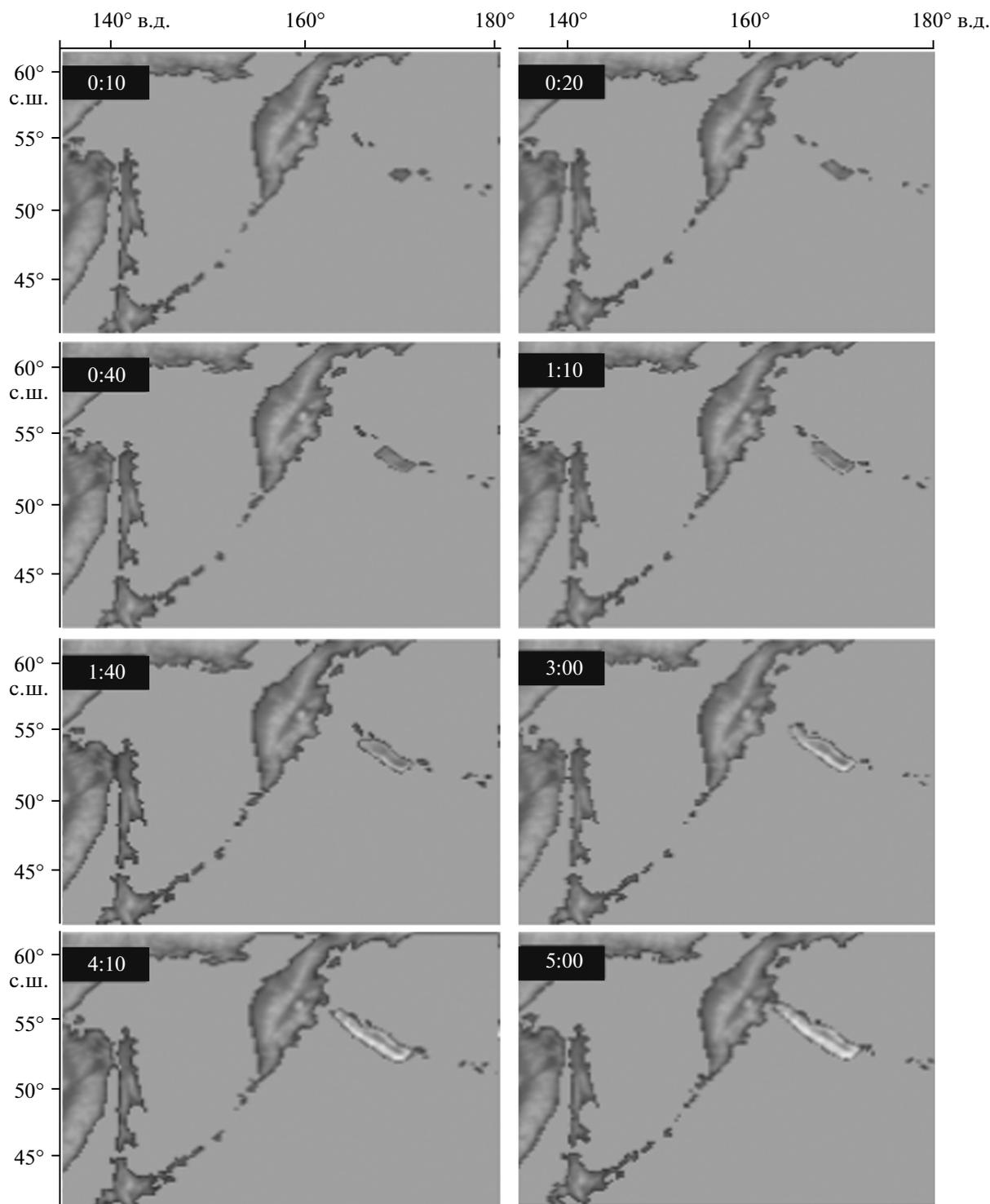


Рис. 4. Генерация очага цунами сейсмическим очагом, приведенным на рис. 2.

рассчитанной по формулам связи магнитуды землетрясения и высоты волны в очаге цунами, необходимо увеличить начальное смещение блока в сейсмическом очаге. Поэтому величины вертикального смещения для блоков 1–6 задаются несколько больше, чем дают формулы связи магнитуды зем-

летрясения и высоты волны в очаге. Формирующийся очаг генерирует волну цунами, при этом одновременно идут два процесса: процесс генерации волны подъемом очередного блока в сейсмическом очаге и процесс распространения этой волны от этого и предыдущих блоков. На 6-й ми-

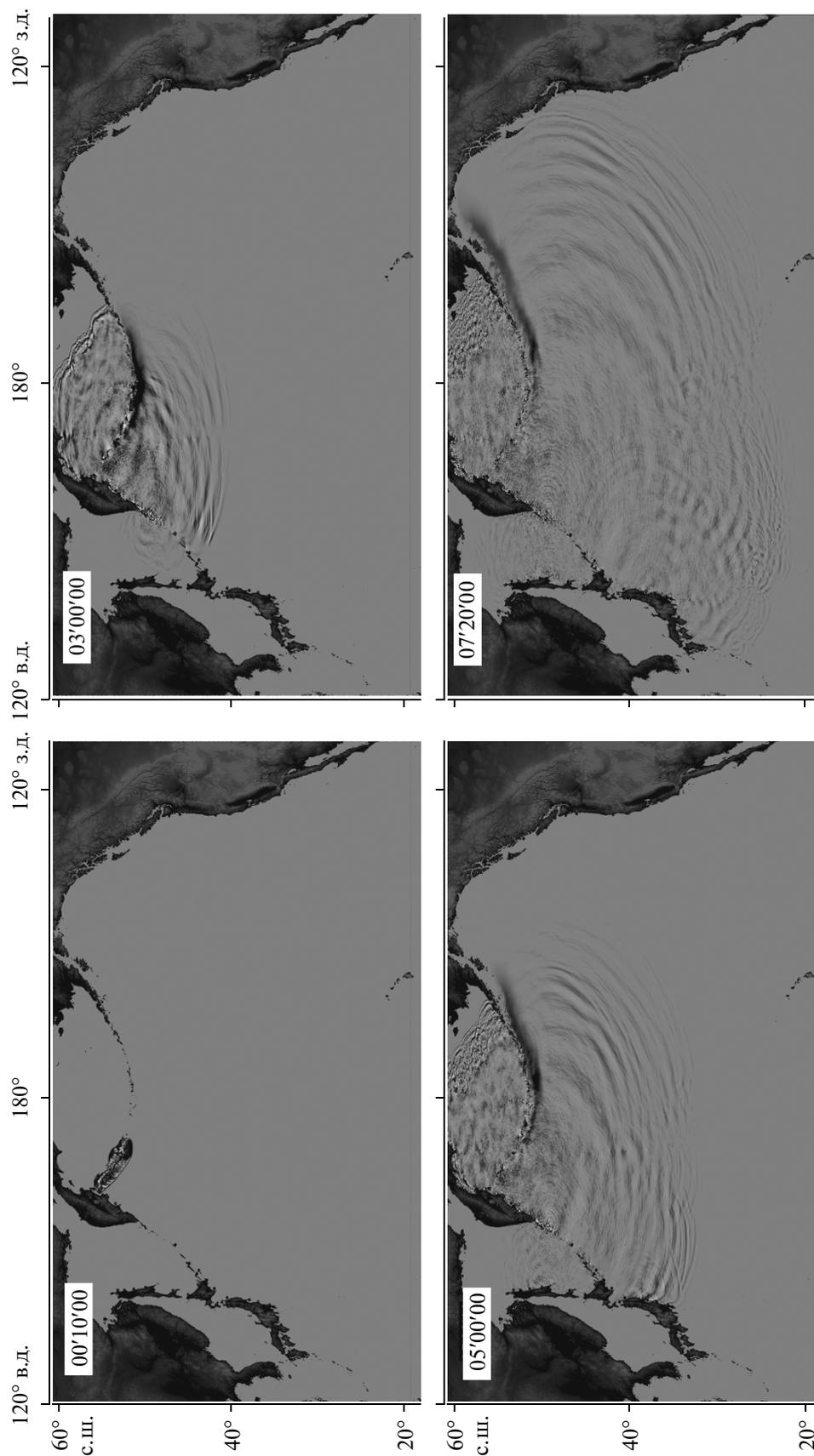


Рис. 5. Распространение волны цунами по расчетной акватории при реализации выбранного сценария.

Таблица 2. Результаты численного моделирования

Номер расчетного мареографа	Максимальная высота волны в пункте, м	Минимальная высота волны в пункте, м	Фаза подходящей первой волны	Время подхода первой волны
о. Сахалин				
2	3.06	-3.84	+	2 ч 28 мин
11	2.23	-2.70	+	2 ч 31 мин
12	2.98	-2.15	-	2 ч 15 мин
13	2.52	-2.17	-	2 ч 14 мин
14	4.41	-3.85	-	2 ч 23 мин
15	1.49	-1.92	+	2 ч 33 мин
п-ов Камчатка				
22	13.95	-10.94	+	18 мин
23	10.27	-14.20	+	25 мин
Курильские острова				
3	2.34	-1.94	+	2 ч 28 мин
4	2.76	-2.65	+	2 ч 21 мин
25	3.31	-2.10	+	2 ч 05 мин
26	410	-1.12	+	1 ч 27 мин
Япония. О-ва Хоккайдо и Хонсю				
6	4.13	-4.34	+	2 ч 55 мин
7	3.05	-2.24	+	2 ч 45 мин
9	1.43	-1.26	+	3 ч 05 мин
10	2.55	-1.78	-	3 ч 31 мин
24	3.95	-2.90	+	4 ч 30 мин
Центральная часть западного побережья Северной Америки				
16	0.89	-1.26	-	5 ч 45 мин
18	3.22	-2.89	+	6 ч 37 мин
19	4.53	-3.64	-	6 ч 48 мин
20	3.79	-7.67	+	6 ч 58 мин
21	3.02	-2.96	+	7 ч 50 мин

нута процесс генерации завершен и рассматривается только процесс распространения волны по акватории. Таким образом, выбранная кинематика движения блоков в сейсмическом очаге приводит к сложному динамическому процессу на поверхности воды. При данном расчете рассматривается процесс распространения волны только по части акватории Тихого океана: вдоль островов Курильской гряды, в Охотском море и по направлению к центральной части западного побережья Северной Америки. На рис. 5 приведены характерные моменты при распространении волн по акватории.

Для анализа характеристик волновых полей, полученных в результате реализации данного сценария, были использованы данные 28-ми виртуальных мареографов, расположенных вдоль побережий Тихого океана (рис. 4). Результаты расчета представлены в табл. 2. Для каждого пункта

указаны его координаты, максимальное и минимальное значение высоты волны на 10-метровой изобате, фаза подхода первой волны, и время дохода волны.

На рис. 6 приведено максимальное распределение высот волн по расчетной акватории. Анализ полученных результатов (табл. 2, рис. 6) показывает, что на востоке и юго-востоке Камчатки (п. 22, 23) и на о. Симушир (п. 26) наблюдались наибольшие высоты волн. Волна с меньшими высотами прошла в проливы Буссоль и Крузенштерн, далее в Охотское море и к восточному побережью Сахалина.

Наибольшие высоты наблюдаются в п. 2, 14 и 13. В п. 2 и 14 наиболее сильно проявляет себя фаза отлива (в п. 14 вертикальная составляющая превышает 4.4 м). У Японских островов наблюдается некоторое увеличение высот волн. Так у о. Хоккайдо (п. 7) высота волны на изобате 10 м более 3 м, а у

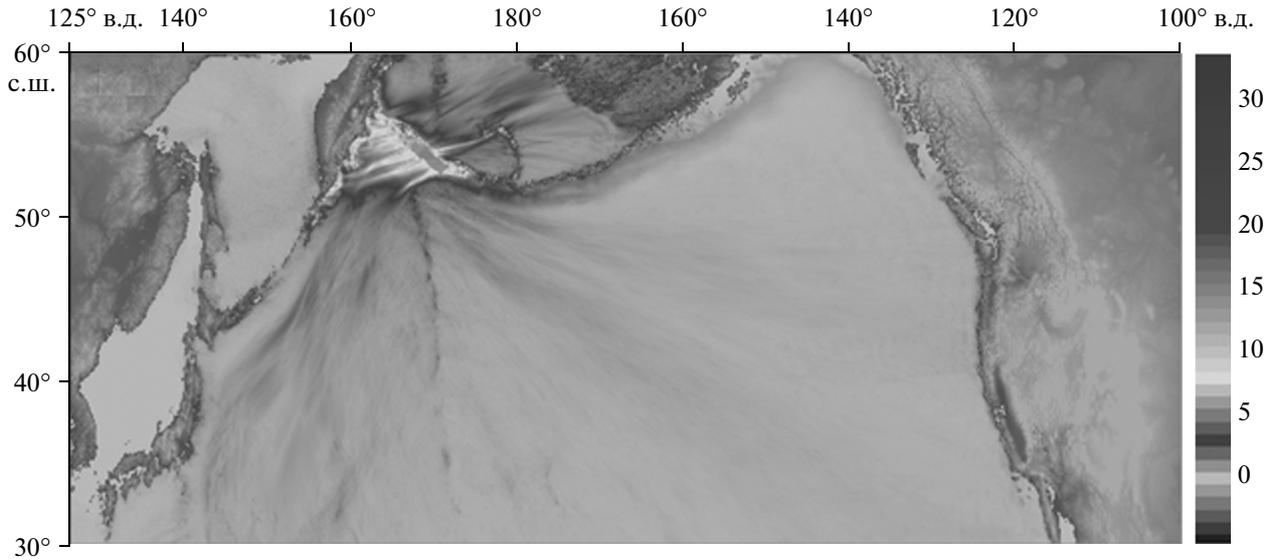


Рис. 6. Распределение максимальных высот волн в данной акватории по результатам численного моделирования.

о. Хонсю (п. 10) волна имеет высоту более 2.5 м. Причем в п. 10 и 24 наблюдается интенсивный откат волны после наката первого горба. В центральной части западного побережья Северной Америки наибольшие высоты приходятся на п. с 19 по 21, где наблюдаются также значительные глубины для волн отката (табл. 2). Хорошо видны светлые цветовые области, определяющие высоты волн от 3 до 4 м: на юго-западе Курильских островов, около Японии (о. Хоккайдо и о. Хонсю), восточное побережье о. Сахалин (наиболее интенсивные на северо-востоке) и вся центральная часть западного побережья Северной Америки.

## 7. СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ВОЛНОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

На основе результатов проведенных расчетов был выполнен wavelet-анализ для пунктов, расположенных около российского побережья, японских островов Хоккайдо и Хонсю, а также для средней части западного побережья Северной Америки. Спектрограммы, построенные для п. 12 и 14, расположенных около побережья о. Сахалин, практически близки к спектрограммам, полученным при расчетах волновых полей от источников, расположенных в Центрально-Курильской сейсмической брешии [5]. В тоже время, спектральные характеристики, полученные при расчете волновых полей от сейсмического источника, расположенного в Командорской сейсмической брешии, для района Японских островов имеют существенные отличия. Их можно объяснить резонансными эффектами, возникающими в акватории между югом Камчатки и западными Алеутами. Длительные переходные процессы

(множественные переотражения волн) приводят к формированию многочисленных волн, идущих как к Курильским островам, так и к восточным берегам Японии и центральной части западного побережья Северной Америки. Нужно отметить, что при таком расположении сейсмического очага, а, следовательно, и очага цунами (рис. 3), во всех пунктах, где выставлены виртуальные мареографы, высокочастотные (ВЧ) компоненты появляются либо одновременно с низкочастотными (НЧ), либо несколько позже. Это зависит от ха-

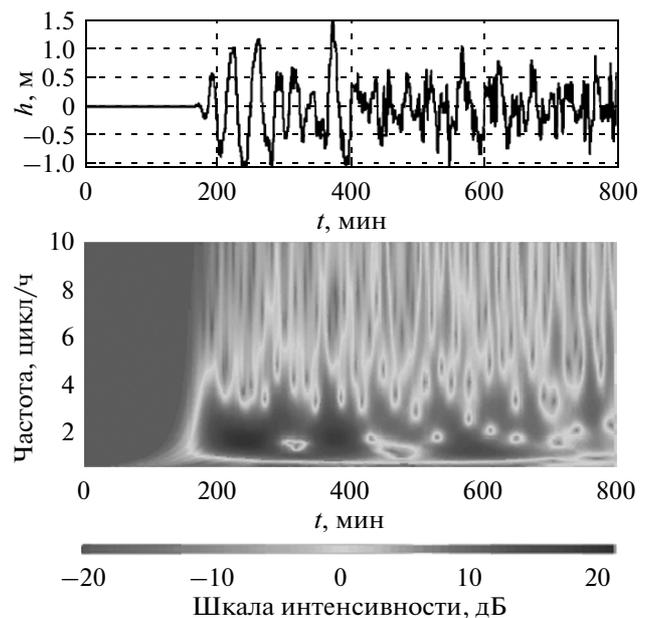


Рис. 7. Мареограмма и спектрограмма для п. 26.

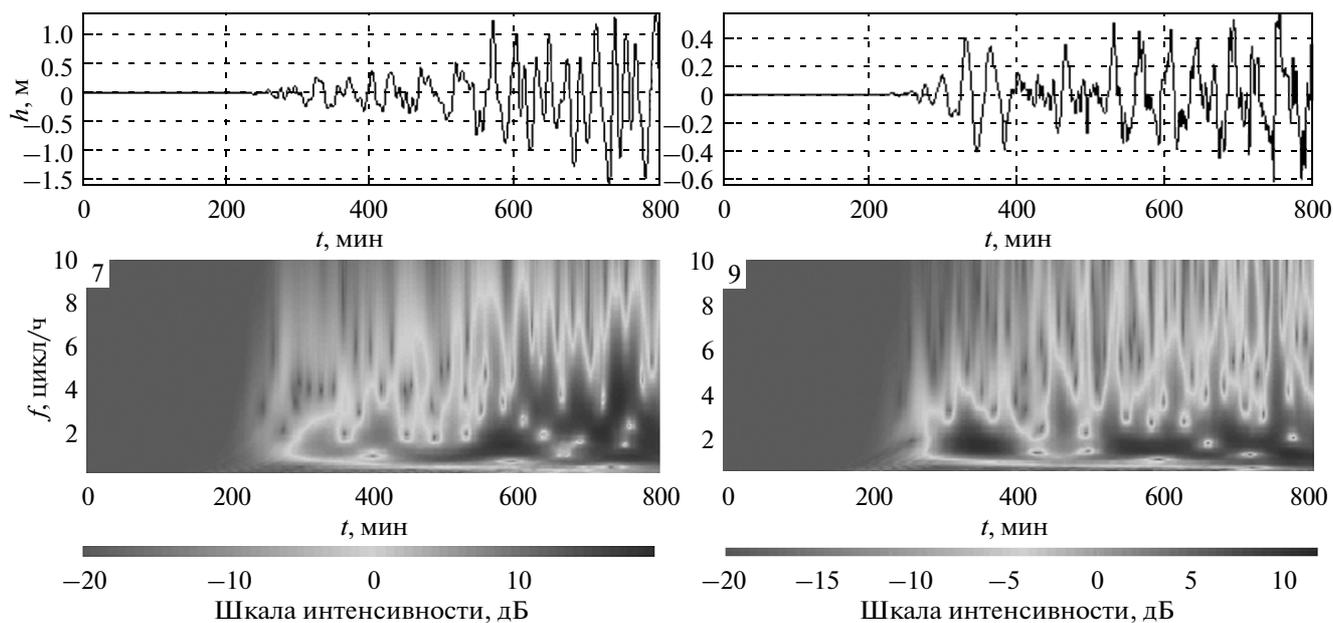


Рис. 8. Мареограммы и спектрограммы для п. 7 и 9.

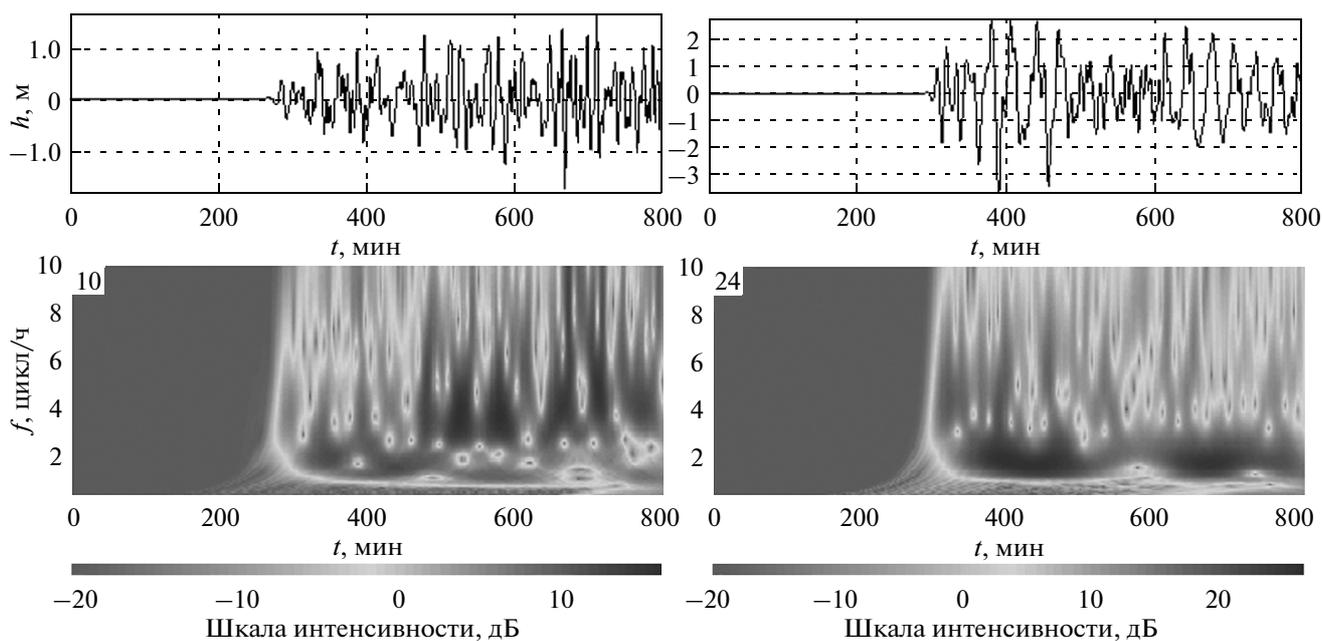


Рис. 9. Мареограммы и спектрограммы для п. 10 и 24.

рактера взаимодействия волн, пришедших из открытого моря и распространяющихся вдоль берегов и островных гряд.

Так, для п. 26, расположенного около о. Симушир (рис. 7), на спектрограмме хорошо видны низкочастотные (НЧ) области на временных интервалах [200, 300] мин и [350, 400] мин. Эти области характеризуются частотами 1.5–2 цикл/ч (что соответствует волновому периоду 30–40 мин) и ин-

тенсивностью 20 дБ. На этих временных интервалах вся волновая энергия концентрируется в НЧ-областях. При  $t > 400$  мин практически вся энергия перетекает в более высокочастотную (ВЧ) область, за исключением области на интервале [550, 650] мин.

На побережье о. Хоккайдо, в п. 7 и 9, фронты волн приходят практически одновременно, причем в п. 9 в большей степени со стороны открытого моря, чем в п. 7. Поэтому НЧ-цуг (~1.7 цикл/ч,

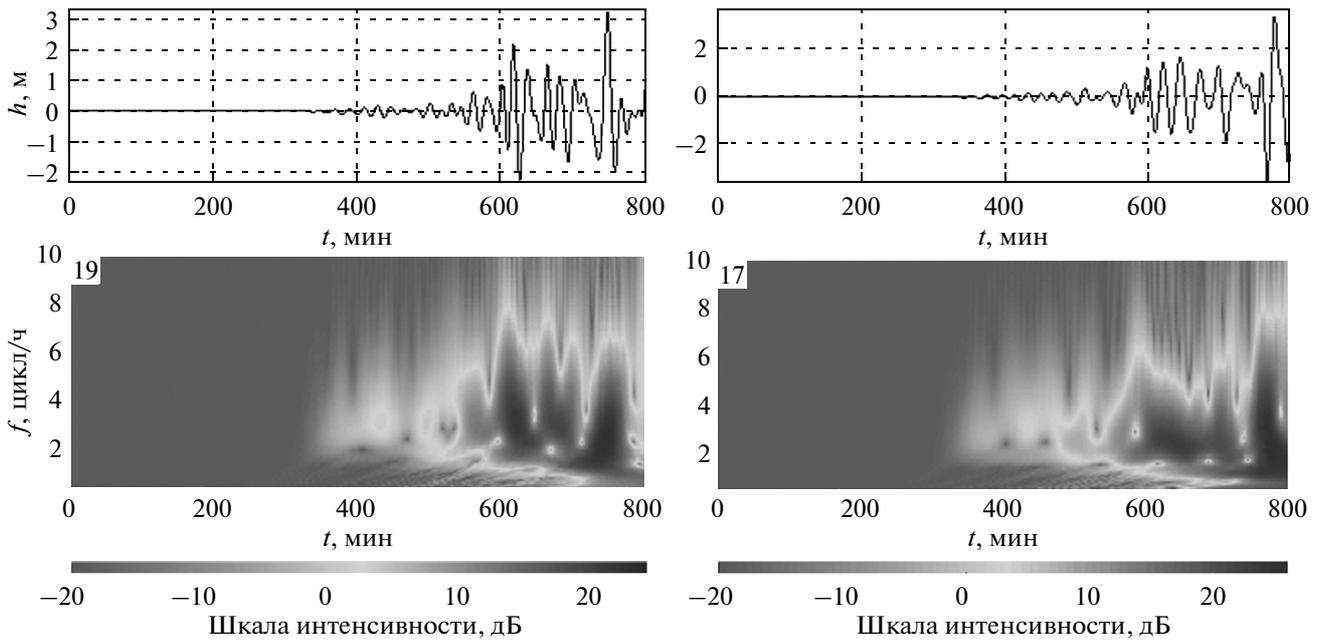


Рис. 10. Мареограммы и спектрограммы для п. 19 и 17.

на интервале [300, 400] мин) в п. 9 не имеет заметного аналога в п. 7. По той же причине в мареограмме для п. 7 в целом доля ВЧ-составляющих заметно выше.

В п. 7 НЧ-составляющая достаточно слаба в интервале [250, 450] мин (рис. 8). При  $t > 450$  мин, ее интенсивность нарастает и достигает максимума на отрезке [550, 600] мин на частоте  $\sim 2$  цикл/ч, что соответствует 30-мин волнам с интенсивностью  $I \sim 15$  дБ. На интервале  $\sim [600, 750]$  мин большая часть энергии сосредоточена в диапазоне от 2 до 6 цикл/ч. ВЧ-составляющие начинают проявлять себя в районе  $t \sim 450$  мин и повторяются регулярно далее через 30–40 мин. Можно видеть, что характер спектрограммы в НЧ-области на интервале [450, 700] мин приблизительно соответствует характеру спектрограммы для п. 26 на интервале [170, 300] мин. Хорошо видно, что, несмотря на то, что п. 7 находится ближе к п. 26, чем п. 9 (рис. 3), характер волновых процессов в п. 9 и 26, судя по спектрограммам, более схож, чем в п. 7 и 26.

В п. 10 и 24 в большей степени приходят волны со стороны открытого моря, поэтому соответственно падает доля ВЧ-составляющих в мареограммах (рис. 9). В п. 24 доминирующей является составляющая с частотой 2 цикл/ч (на интервалах [330, 500] мин и [600, 700] мин) с интенсивностью  $I \leq 25$  дБ. В п. 10 НЧ-составляющая достаточно мала,  $I \sim 7-10$  дБ. При  $t > 450$  мин возникают регулярные ВЧ-всплески энергии в диапазоне 3–10 цикл/ч, с  $I \leq 17$  дБ. В п. 24 ВЧ-составляющие, при  $t > 300$  мин, относительно регулярно повторяются до  $t \sim 470$  мин, затем их интенсивность

слабеет, хотя регулярность продолжает проследиваться.

В п. 19 и 17 волны приходят со стороны открытого моря. Энергия и частотный состав волн в них во многом схожи. Для этих пунктов для  $t > 350$  мин идет нарастание энергии с одновременным расширением их полосы частот. Для п. 17, при  $t > 550$  мин, энергия нарастает, на интервале [600, 650] мин возникает резкий всплеск и наблюдается локальный максимум, приблизительно от 3 до 7 цикл/ч (рис. 10). Следующий локальный максимум формируется в районе  $t \sim 750$  мин, от 1.5 до 5 цикл/ч (10–40 мин волны). Для п. 19 в интервале [350, 550] мин интенсивность мала, на интервале [550, 750] мин наблюдается резкое увеличение интенсивности в диапазоне частот от 1 до 6 цикл/ч (10–60 мин волны), а на интервале [750, 800] мин происходит всплеск в диапазоне частот от 0.5 до 6.5 цикл/ч с интенсивностью 25 дБ.

## 8. ОБСУЖДЕНИЕ

Командорская сейсмическая брешь была выделена в западной части Алеутской островной дуги на основании долгосрочного сейсмического прогноза [32]. К настоящему времени период спокойствия Командорской сейсмической бреши составляет около 100 лет, что соответствует максимальной оценке периода повторяемости сильнейших землетрясений Алеутской островной дуги [15].

Ранее предполагалось, что в силу специфики своего строения район Командорской сейсмиче-

ской брешы не способен генерировать сильнейшие землетрясения [14]. После Суматра-Андаманского землетрясения, которое произошло в аналогичной геодинамической ситуации, это предположение подверглось ревизии и в настоящее время считается, что сейсмический потенциал Командорской сейсмической брешы является высоким с возможностью генерировать землетрясения с  $M_{\max} = 9.2$  [33].

Проведенное на основе численного моделирования исследование генерации и распространения волн цунами при возникновении сильнейшего землетрясения в Командорской сейсмической брешы позволяет оценить максимальные высоты наката для ряда побережий Тихого океана. На Камчатке при данном сценарии волны цунами могут достигать большой высоты на всем побережье. Курильские острова также подвергнутся интенсивному воздействию волн, идущих вдоль островов, однако здесь наблюдается затухание волн на некоторых участках островной дуги. На Сахалине наибольшие высоты волн наблюдаются на северо-востоке острова за счет влияния наиболее интенсивного фронта волны, прошедшего через пролив Крузенштерна и развернувшегося под углом к о. Сахалин. На Японских островах возможны значительные высоты волн, особенно на восточном побережье о. Хоккайдо. Вся центральная часть западного побережья Северной Америки при таком расположении очага землетрясения подвергается воздействию волн цунами, волны от 1.5 до 3 м на 4-х метровой изобате могут дать усиление в береговой зоне в 1.5–3 раза.

Проведенный спектральный анализ показывает, что при расположении источника в Командорской сейсмической брешы, характер распространения волн по рассматриваемой части акватории Тихого океана имеет существенное отличие от волновой картины при распространении волн от источников, находящихся в районе Центрально-Курильской сейсмической брешы, главным образом за счет формирования некоторого “резонатора” при локализации протяженного очага в районе западных Алеутов. Расположенный таким образом клавишный очаг формирует дуги волн, направленные как вдоль Курильской островной гряды, так и в открытый океан. Эффекты интерференции волновых фронтов наиболее ярко начинают проявляться при подходе волн к японским островам Хоккайдо и Хонсю (что хорошо отражают спектрограммы). Аналогичная, но менее выраженная картина, наблюдается для центральной части западного побережья Северной Америки.

## 9. ВЫВОДЫ

Для Алеутской островной дуги максимальная оценка времени повторяемости сильнейших зем-

летрясений составляет 103 года. В пределах ее западного отрезка (Командорской сейсмической брешы), сильнейшие землетрясения не регистрировались с 1917 г., таким образом, период спокойствия приближается к максимальному. Это дает основание предполагать, что величина накопленного напряжения близка здесь к критической и происходит формирование очага сильнейшего землетрясения.

Моделирование цунами от гипотетического очага этого землетрясения показало, что высоты волн на ряде побережий Тихого океана колеблются от 3 до 9 м. Волна цунами, имеющая высоту 9 м, способна проникнуть достаточно далеко от береговой линии и вызвать значительные разрушения и гибель людей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-05-00808).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Викулин А.В. Вариант долгосрочного сейсмического прогноза для Камчатского залива и Кроноцкого полуострова // Вулканология и сейсмология. 1986. № 3. С. 72–83.
2. Лаверов Н.П., Лобковский Л.И., Баранов Б.В. и др. Катастрофа на Суматре: уроки и прогнозы // Наука в России. 2007. № 1. С. 4–11.
3. Левин В.Е., Магуськин М.А., Бахтияров В.Ф. и др. Мультисистемный геодезический мониторинг современных движений земной коры на Камчатке и Командорских островах // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 54–67.
4. Лобковский Л.И., Мазова Р.Х., Катаева Л.Ю., Баранов Б.В. Генерация и распространение катастрофических цунами в акватории Охотского моря. Возможные сценарии // Докл. РАН. 2006. Т. 410. С. 528–531.
5. Лобковский Л.И., Мазова Р.Х., Кисельман Б.А., Морозова А.О. Численное моделирование и спектральный анализ цунами 15 ноября 2006 г. в Курило-Камчатском регионе // Океанология. 2010. Т. 50. № 4. С. 1–10.
6. Марчук А.Г., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И. Численное моделирование волн цунами. Новосибирск: Наука, 1983. 160 с.
7. Селиверстов Н.И. Строение дна прикамчатских акваторий и геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. М.: Научный Мир, 1998. 164 с.
8. Селиверстов Н.И. Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. П-К.: КамГРУ им. Витуса Беринга, 2009. 191 с.
9. Федотов С.А. Закономерности распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии // Тр. ИФЗ. 1965. № 36. С. 66–93.
10. Ammon C.J., Ji C., Thio H.-K. et al. Rupture Process of the Great Sumatra-Andaman Earthquake // Science. 2005. V. 308. P. 1133–1139.

11. *Ammon C.J., Lay T., Simpson D.W.* Great earthquakes and Global Seismic Networks // *Seism. Res. Lett.* 2010. V. 81. P. 965–971.
12. *Avé Lallemant H.G., Oldow J.S.* Active displacement partitioning and arc-parallel extension of the Aleutian volcanic arc based on Global Positioning System geodesy and kinematic analysis // *Geology.* 2000. V. 28. № 8. P. 739–742.
13. *Baranov B.V., Seliverstov N.I., Muravev A.V. et al.* The Komandorsky Basin as a product of spreading behind a transform plate boundary // *Tectonophysics.* 1991. V. 199. P. 237–269.
14. *Cormier V.F.* Tectonics near the junction of the Aleutian and Kuril-Kamchatka Arcs and a mechanism for Middle Tertiary magmatism in the Kamchatka Basin // *Geol. Society of America Bulletin.* 1975. V. 86. P. 443–453.
15. *Davies J.N., Sykes L., House L., Jacob K.* Shumagin seismic gap, Alaska: History of great earthquakes, tectonic setting and evidence for high seismic potential // *J. Geoph. Res.* 1981. V. 86. P. 3821–3855.
16. *DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F. et al.* Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motion // *Geoph. Res. Letters.* 1994. V. 21. P. 2191–2194.
17. *Fine I.V., Rabinovich A.B., Thomson R.E.* The dual source region for the 2004 Sumatra tsunami // *Geoph. Res. Letters.* 2005. V. 32. L16602, doi:10.1029/2005GL023521.
18. *Gaedicke Ch., Baranov B., Seliverstov N. et al.* Structure of an active arc-continent collision area: the Aleutian–Kamchatka junction // *Tectonophysics.* 2000. V. 325. P. 63–85.
19. *Geist E.L., Childs J.R., Scholl D.W.* The origin of summit basins of the Aleutian Ridge: implications for block rotation of an arc massif // *Tectonics.* 1988. V. 7. № 2. P. 327–341.
20. *House L.S., Sykes L.R., Davies J.N., Jacob K.H.* Identification of a possible seismic gap near Unalaska Island, Eastern Aleutians, Alaska // *Earthquake Prediction.* 1981. V. 4. P. 81–92.
21. *Ji C.* Magnitude 9.0 earthquake off the west coast of northern Sumatra: Preliminary rupture model, report. U.S. Geol. Surv. Denver, Colo. 2005. [http://neic.usgs.gov/neis/eq\\_depot/2004/eq\\_041226/neic\\_slav\\_ff.html](http://neic.usgs.gov/neis/eq_depot/2004/eq_041226/neic_slav_ff.html)
22. *Lay T., Kanamori H., Ammon C.J. et al.* The Great Sumatra-Andaman Earthquake of 26 December 2004 // *Science.* 2005. V. 30. P. 1127–1133.
23. *Lay T., Kanamori H.* Insight from the great 2011 Japan earthquake // *Physics Today.* 2011. № 12. P. 33–39.
24. *Lobkovsky L.I., Kerchman V.I., Baranov B.V., Pristavkina E.I.* Analysis of seismotectonic processes in subduction zones from the standpoint of a keyboard model of great earthquakes // *Tectonophysics.* 1991. V. 199. P. 211–236.
25. *Lobkovsky L.I., Mazova R.Kh., Garagash I.A. et al.* To analysis of source mechanism of the 26 December 2004 Indian Ocean tsunami // *Russ. J. Earth Sci.* 2006. V. 8: ES5001, doi:10.2205/2006ES000208.2006a, <http://dx.doi.org/10.2205/2006ES000208>
26. *McCann W., Nishenko S.P., Sykes L.R., Krause J.* Seismic gaps and plate boundaries: seismic potential for major boundaries // *Pure and Applied Geophysics.* 1979. V. 117. P. 1082–1147.
27. *Mogi K.* Some features of recent seismic activity in and near Japan // *Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo University.* 1968. V. 46. P. 1225–1235.
28. *Nishenko S.P.* Circum-Pacific seismic potential, 1989–1999 // *Pure and Applied Geophysics.* 1991. V. 135:2/3. P. 169–260.
29. *Sipkin S.A., Person W.J., Presgrave B.W.* Earthquake bulletins and catalogs at the USGS National Earthquake Information Center // *IRIS Newsletter.* 2000. V. 1, 2–4. PDE-USGS: <http://earthquake.usgs.gov/research/data/pde.php>.
30. *Smith W.H.F., Sandwell D.T.* Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth sounding // *Science.* 1977. V. 277. P. 1956–1962.
31. *Stein S., Okal E.* Speed and size of the Sumatra earthquake // *Nature.* 2005. V. 434:7053. P. 581–582.
32. *Sykes L.R.* Aftershock zones of great earthquakes, seismicity gaps, and earthquake prediction for Alaska and Aleutians // *J. Geoph. Res.* 1971. V. 76. P. 8021–8041.
33. *Wesson R.L., Boyd O.S., Mueller C.S., Frankel A.D.* Challenges in Making a Seismic Hazard Map for Alaska and the Aleutians // *Active Tectonics and Seismic Potential of Alaska Geophysical Monograph Series 179.* American Geophysical Union. 2008. V. P.10.1029/179GM22. P. 385–397.

## Komandor Seismic Gap: Earthquake Forecast and Tsunami Simulation

L. I. Lobkovsky, B. V. Baranov, K. A. Dozorova, R. Kh. Mazova, B. A. Kisel'man, N. A. Baranova

Komandor seismic gap's period of "seismic silence" comes close to maximum recurrence interval for great earthquakes in the Aleutian Island Arc; thus great earthquake may be expected here. The results of numerical simulation of tsunami generated by such event are presented in this work. Authors applied modeling scheme successfully used in case of the closest analog – Sumatra-Andaman catastrophic event. It was assumed that magnitude of possible earthquake is 8.5, tsunami source is 650 km long and consists of 9 blocks. Several block motion scenarios were considered. Tsunami generation and propagation in Pacific Ocean and possible wave characteristics on coasts were estimated. Spectral analysis of obtained wave characteristics was carried out and wave fronts interference effects were determined. Modeling has shown that wave heights in separate areas of Pacific coasts may reach 9 meters. Such waves are capable to cause significant human losses and economic damage.