

## ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕТАЛЬНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ ДЛЯ ГОРОДОВ о. САХАЛИН

*Б.В. Левин, Ч.У. Ким, В.Н. Соловьев*

*ФГБУН Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, ул. Науки 1Б, г. Южно-Сахалинск 693022; e-mail: lbw@imgg.ru*

Поступила в редакцию 15 мая 2011 г.

В работе кратко изложены основные положения вероятностного анализа сейсмической опасности (ВАСО). Особое внимание уделено идентификации и количественной оценке неопределенностей, связанных с характеристиками сейсмических источников и инженерными моделями предсказания сильных движений. Представлены основные сейсмические модели и результаты применения ВАСО для детального сейсмического районирования территории городов о. Сахалин.

**Ключевые слова:** сейсмичность, сейсмическая опасность, логическое дерево, деагрегация, сейсмическое районирование, о. Сахалин.

### ВВЕДЕНИЕ

Для ряда регионов Российской Федерации, в том числе для Сахалинской области, правильная оценка опасности природных катастроф всегда была и будет насущной задачей. И хотя эта оценка является экспертной, но ее многоплановость требует некоторой общей основы для целостного представления и обоснованности практических решений.

В последнее время для сейсмически активной территории, которой является Сахалинская область, потребность в решении задач, связанных с оценкой сейсмической опасности, значительно возросла вследствие а) заметного повышения в последние десятилетия сейсмической активности, которое выражается рядом сильных землетрясений, таких как: Шикотанское (М 8.2, 1994 г.), Нефтегорское (М 7.2, 1995 г.), Углегорское (М 7.0, 2000 г.), Симуширское (М 8.3, 2006 г.) и Невельское (М 6.2, 2007 г.), и б) начавшегося освоения нефтегазовых месторождений на шельфе о. Сахалин и возведения там объектов, разрушение которых грозит просто страшными экологическими последствиями.

В российских строительных нормах [6] сейсмичность в пункте определяется двумя параметрами: 1) интенсивностью сотрясений грунта  $I_{MSK}$  в баллах по шкале MSK-64 и 2) средним периодом повторения уровня интенсивности  $T$  (формула (6) ниже). Для территории Российской Федерации официаль-

ными документами, определяющими уровень сейсмичности с учетом грунтовых условий, являются нормы СНИП-II-7-81\*[6] и карты ОСР-97 [7].

Карты общего сейсмического районирования территории РФ (ОСР-97) представляют собой комплект из трех карт масштаба 1:2 500 000, каждая из которых соответствует категории ответственности объекта. Ответственность инженерного объекта определяется назначением периода повторения сотрясений  $T$  или, что то же, заданием вероятности  $P$  превышения уровня интенсивности и срока службы  $t$ .

Карты ОСР-97 А, В, С составлены на основе обобщенных сеймотектонических моделей и, по существу, в отношении единственного параметра сейсмического воздействия – баллов по шкале MSK-64. Такие карты решают многие инженерные проблемы, но современные методы проектирования сейсмостойкого строительства, а также оценки уязвимости существующих сооружений, требуют более детального представления сейсмических нагрузок (например, для шельфовых объектов весьма полно эти требования изложены в [21]). Представление динамических нагрузок через физические параметры движения грунта обязательно, например, в отношении таких объектов, как хранилища отравляющих веществ.

В 1999–2000 гг. были разработаны и согласованы с Госстроем России специальные технические условия “Инженерные изыскания для проектирова-

ния и строительства объектов обустройства на нефтегазовых месторождениях “Сахалин-1” (далее СТУ-2001). Раздел “Оценка сейсмической опасности”, разработанный с участием ИМГиГ ДВО РАН, был согласован с Межведомственной комиссией по сейсмическому районированию и сейсмостойкому строительству. Вплоть до настоящего времени этот нормативный документ служит руководством по оценке сейсмической опасности в рамках нефтегазовых проектов Сахалина. Одним из основных требований СТУ-2001 является использование методологии вероятностного анализа сейсмической опасности.

Ниже кратко изложены основные положения вероятностной оценки сейсмической опасности, часто используемой в мировой практике, и ее реализация на примере сейсмического районирования городов о. Сахалина.

Часто термин “сейсмическая опасность” используется в общем смысле для обозначения потенциально разрушительных явлений, связанных с землетрясениями, таких как сотрясения грунта, разжижение, оползни и цунами. В статье этот термин употребляется в узком смысле, только с точки зрения сотрясений грунта.

#### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ (ВАСО)

Вероятностный анализ сейсмической опасности [18, 23] является аналитическим методом, в котором оценивается вероятность превышения (заданного) уровня движения грунта, вызываемого землетрясениями, в заданном пункте в течение заданного будущего периода времени. Целью такого анализа является оценка годовой частоты превышения уровня движения, а главный результат состоит в определении зависимости годовой частоты превышения от уровня движения, которая называется кривой опасности. Чаще всего, а во многих случаях обязательно, в качестве параметра движения грунта используется спектральное ускорение  $S_a(f, \xi)$ , зависящее от частоты  $f$  и затухания  $\xi$  осциллятора, поскольку спектр реакции адекватно описывает динамическую нагрузку и удобен при подборе проектных акселерограмм, эмпирических или синтетических.

Двумя главными компонентами модели ВАСО являются 1) характеристика сейсмичности в окрестности исследуемого пункта и 2) предсказание движения грунта в пункте, вызванного воздействием землетрясения заданного размера (магнитуды) и происшедшего на заданном расстоянии от пункта. Подчеркнем здесь, что обе компоненты суть экспертные оценки, т.е. не единственны.

Положим, что сеймотектоническая модель региона разработана и сейсмичность описывается набором из  $N_s$  независимых источников: линейных, т.е. разломов или зон разломов, и площадных, представляющих рассеянную сейсмичность, не имеющую явной связи с известными разломами. Предсказание движения грунта выполняется посредством функции  $g(m, r)$ , которая определяет зависимость среднего значения (натурального) логарифма параметра движения грунта  $\ln S_a$  от события с магнитудой  $m$  на расстоянии  $r$ . Эта функция, называемая соотношением затухания (или инженерной моделью затухания), представляется регрессионным соотношением, построенным на основе региональной базы данных по сильным движениям. Обычно она имеет вид [14]:

$$g(m, r) = \ln S_a(f, \xi, m, r) = c_1 + c_2 m - c_3 \ln r + c_4 r + c_5 F + c_6 S + \sigma_{\ln S_a}, \quad (1)$$

где  $c_1 - c_6$  – регрессионные коэффициенты, а  $F$  и  $S$  описывают, соответственно, зависимость от типа движения на разломе и от характеристик грунта в пункте. Изменчивость (от события к событию и от пункта к пункту), наблюдаемая в измерениях движений грунта, описывается нормальным распределением  $\ln S_a$  в каждой точке  $(m, r)$  с нулевым средним и стандартной ошибкой  $\sigma_{\ln S_a}$ , которая иногда зависит от  $m$ . Затухание  $\xi$  для реальных сооружений обычно находится в интервале от 2 до 8 %, и поэтому в последнее время модели вида (1) разрабатываются для  $\xi = 5$  % как для пиковых движений, так и для спектральных ускорений.

Для целей оценки опасности в любом сейсмическом источнике имеет смысл рассматривать лишь те землетрясения, которые представляют “инженерный интерес”, т.е. события выше некоторой пороговой магнитуды  $m_0$  (часто выбирают  $m_0 = 5$ ), которые происходят со средней годовой частотой  $\nu$ . Положим, что  $f_M(m)$  есть относительная частота появления в данном источнике события с магнитудой  $m$ . Как правило, но это необязательно, считают, что для выбранного источника выполняется известное соотношение Гуттенберга-Рихтера, и тогда плотность  $f_M(m)$  есть показательная функция [23, 29]:

$$f_M(m) = \frac{\beta \exp[-\beta(m - m_0)]}{1 - \exp[-\beta(m_{\max} - m_0)]} \quad (2)$$

для  $m_0 \leq m \leq m_{\max}$ ,

где  $m_{\max}$  есть верхняя грань магнитуды, производимой в источнике. Константа  $\beta = b \ln(10)$  выражается через  $b$  – значение из соотношения Гуттенберга-Рихтера.

Часто предполагается, что источник (линейный или площадной) пространственно однороден, т.е.

любая точка в пределах этого источника может быть очагом землетрясения. Из этого условия и из геометрии источника относительно пункта можно вывести функцию плотности  $f_R(r)$ , которая описывает относительную частоту расстояний пункт–землетрясение. Если разделить геометрически сложный источник на малые элементы, то функцию  $f_R(r)$  удобно представлять себе как гистограмму расстояний от этих элементов до пункта. Понятно, что  $f_R(r)$  есть функция положения, размеров и формы источника. Предположение об однородности источника необязательно, и  $f_R(r)$  можно усложнить до определения условной функции распределения  $f_R(r | m)$ .

Из сделанных выше предположений относительно предсказания движения грунта следует, что из всех событий магнитуды  $m$ , происходящих на расстоянии  $r$  от пункта, доля тех событий, которые вызывают движение грунта  $S_a$ , большее или равное  $a$ , есть

$$\Phi' \left( \frac{\ln a - g(m, r)}{\sigma} \right), \quad (3)$$

где  $\Phi'$  есть дополнительная функция распределения стандартной нормальной величины. Поэтому доля всех событий в источнике, движения от которых равны или превышают  $a$ , будет

$$\iint \Phi' \left( \frac{\ln a - g(m, r)}{\sigma} \right) f_R(r | m) f_M(m) dr dm.$$

Чтобы учесть все  $N_S$  источников, следует просто просуммировать среднюю частоту событий по каждому источнику  $i$ , что приводит к следующему выражению для  $\lambda(a)$ , средней годовой частоте событий с уровнем движения грунта в пункте, равным или большим  $a$ :

$$\lambda(a) = \sum_i^{N_S} \nu \iint \Phi' \left( \frac{\ln a - g(m, r)}{\sigma} \right) f_R(r) \times f_M(m) dr dm. \quad (4)$$

Уравнение (4), определяющее кривую опасности  $\lambda(a)$ , есть основное уравнение вероятностного анализа сейсмической опасности. Оно весьма полезно в теории и для решения модельных задач, но не используется в вычислительных процедурах. Вместе с тем стоит отметить, что в этом простом и гибком алгоритме объединены многие важные части полной проблемы оценки сейсмической опасности.

При дополнительном предположении, что события в каждом источнике следуют независимому пуассоновскому процессу, средняя частота  $\lambda(a)$  может использоваться для вычисления вероятности превышения на любом временном интервале длины  $t$ :

$$P[S_a > a] = 1 - \exp[-\lambda(a)t]. \quad (5)$$

Из этого равенства по найденному  $\lambda(a)$  и по заданным  $P$  и  $t$  нетрудно найти отвечающий им (проектный) уровень  $a$  спектрального ускорения в пункте.

Заметим, что для малых вероятностей, представляющих интерес в задачах ВАСО, величина  $\lambda(a)$  мала по сравнению с единицей, и тогда вероятность в уравнении (5) приблизительно будет  $\lambda(a) \cdot t$ . Иными словами, годовая вероятность приблизительно равна средней годовой частоте, и поэтому эти два термина обычно взаимозаменяемы.

По определению,  $\lambda = 1/T$ , и поэтому в случае пуассоновского процесса полезно использовать соотношение для определения периода повторения уровня по заданным значениям  $P$  и  $t$

$$T(a) = \frac{-t}{\ln(1 - P(S_a > a))}. \quad (6)$$

Если же имеются основания полагать, что события или часть событий не являются пуассоновскими в своем стохастическом поведении во времени (например, имеет место зависимость частоты от  $m$ ), то достаточно [19] заменить среднюю частоту  $\nu$  таких событий на среднее по заданному временному интервалу так называемой функции опасности  $h(\tau)$ , которая является функцией времени, прошедшего начиная с последнего “инженерного” события в источнике. И в этом случае уже требуется различать вероятность из уравнения (5) и среднюю годовую частоту из уравнения (4).

#### ДЕАГРЕГАЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

При численном интегрировании (4) диапазон возможных значений  $m$  и  $r$  для каждого источника разбивается на интервалы с центральными значениями  $m_j$  и  $r_k$  и длинами соответственно  $\Delta m$  и  $\Delta r$ , а интегралы заменяются суммированиями. Эта операция подразумевает, что каждый источник способен вызывать землетрясения лишь от дискретного числа магнитуд на дискретном числе расстояний. В процессе численного интегрирования уравнения (4) можно вычислить опасность  $\lambda(S_a > a | m_j, r_k)$  посредством накопления в каждой 2-мерной ячейке  $(m_j, r_k)$  вкладов от всех  $N_S$  источников, так чтобы  $\lambda(S_a > a) = \sum_{j,k} \lambda(S_a > a | m_j, r_k)$ . Иначе говоря,  $\lambda(S_a > a | m_j, r_k)$  есть вклад прямоугольника  $(m_j, r_k)$  в полную опасность. Если далее выполнить деление вклада  $\lambda(S_a > a | m_j, r_k)$ , накопленного в каждой ячейке, на величину  $\lambda(S_a > a)$ , то формально по-

получим относительный вклад каждой ячейки в общую опасность. Если далее выполнить деление вклада  $\lambda(S_a > a | m_j, r_k)$ , накопленного в каждой ячейке, на величину  $\lambda(S_a > a)$ , то формально по-

лучится 2-мерное распределение условной вероятности события с параметрами  $m_j$  и  $r_k$  при условии, что  $S_a$  превышает  $a$  в заданном пункте. Этот процесс называется деагрегацией сейсмической опасности. Часто в определение деагрегации включают третий параметр  $\varepsilon$ , с помощью которого исследуется влияние ошибки  $\sigma_{\ln S_a}$  из модели затухания движений грунта [10].

Деагрегация сейсмической опасности весьма полезна для определения так называемого проектного землетрясения, которым (почти всегда) называется событие с модальными параметрами  $\hat{m}$  и  $\hat{r}$ , соответствующими максимуму указанного распределения условной вероятности, и воздействие которого, тем самым, в заданном пункте наиболее вероятно. В некоторых случаях, однако, в качестве проектного землетрясения выбираются средние значения  $m^*$  и  $r^*$ . Уровень  $a$  в определении деагрегации определяется по проектной вероятности превышения для сооружений и в соответствии со сроком службы сооружения в данном пункте по (4) и (5).

Соотношения затухания для каждой пары  $(f, \xi)$  различны, поэтому понятно, что для каждой из них проектные параметры  $\hat{m}$  и  $\hat{r}$  (или  $m^*$  и  $r^*$ ) будут разными. Поэтому деагрегация для нужных спектральных диапазонов  $f$  и  $\xi$  определяет диапазоны проектных магнитуд и расстояний, важные как для подбора проектных акселерограмм из имеющихся банков данных по сильным движениям, так и для вычисления синтетических сейсмограмм.

### РЕАЛИЗАЦИЯ ВАСО

Реализация ВАСО требует тщательного отношения к проблемам определения и характеристики сейсмических источников и подбора соотношений затухания движения грунта, а также к процедурам выполнения вероятностных расчетов [24].

Характеризация сейсмических источников выполняется, прежде всего, на основе региональных каталогов, поэтому для правильности определения параметров Гутенберга-Рихтера  $a$  и  $b$  становится обязательной проверка полноты существующего каталога [28]. По определению, плотность вероятности появления землетрясения  $f_M(m)$  зависит только от магнитуды, и поэтому до оценки параметров Гутенберга-Рихтера необходимо выполнить декластеризацию каталога [13], т.е. устранить по возможности все зависимые события, обычно это сильные афтершоки, что всегда неоднозначно. Опасность, связанная с зависимыми событиями, должна быть исследована отдельно. Палеосейсмологическими исследованиями крупных активных разломов иногда удается устано-

вить существование и размеры так называемых характеристических землетрясений, и тогда плотность (2) следует изменить на плотность характеристического распределения [29].

Вдобавок крайне важна оценка максимальной магнитуды в источнике  $m_{max}$ , которую с большой степенью доверия можно установить лишь для разломных источников, если использовать хорошо обоснованные эмпирические соотношения между магнитудой и геометрией активных сегментов разломов [27].

По смыслу алгоритма ВАСО соотношения затухания (1) должны быть установлены на основе регионального банка данных с записями сильных движений от местных землетрясений. Однако в настоящее время это возможно лишь для Японии, Калифорнии и Новой Зеландии, в то время как для других районов мира в распоряжении исследователей имеются три возможности: 1) использовать имеющиеся соотношения, разработанные для регионов, сходных в тектоническом и геологическом отношении; 2) вывести региональные соотношения посредством гибридного метода [15] с использованием модельных акселерограмм; 3) применить соотношения, разработанные на основе общемирового банка данных (только для активных тектонических регионов, включая зоны субдукции).

Дополнительная внутренняя трудность состоит в том, что в разработанных соотношениях затухания используются разные метрики, иначе говоря, расстояния в них определены по-разному. Более того, разные определения расстояния используются в вычислительных программах для расчета опасности. Так, строго говоря, в широко используемой программе SEISRISKIII [12] используются эпицентрального расстояние для площадных источников и расстояние Джойнера-Бура (кратчайшее расстояние по поверхности от исследуемого пункта до проекции плоскости разрыва на поверхность) для разломных источников. Необходимые преобразования метрик можно выполнить на основе результатов работы [24]. Сходные трудности возникают из-за использования в каталоге и в соотношениях затухания разных магнитудных шкал. В этом случае необходимо использовать региональные связи магнитуды каталога с моментной магнитудой  $M_w$ , которая предпочтительна и используется во всех известных моделях затухания.

### АНАЛИЗ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В ОЦЕНКЕ ОПАСНОСТИ И ОБЩАЯ СХЕМА ВАСО

Очевидно, что при оценке сейсмической опасности основную роль играют экспертные оценки. Составление сеймотектонической модели, характеристика сейсмических источников и выбор моделей

затухания требуют учета всех региональных особенностей и составления полного списка приемлемых экспертных решений. Соответственно, один из главных аспектов ВАСО состоит в идентификации и в количественной оценке возникающей при этом неопределенности. Несмотря на то, что современная философия науки считает, что всякая неопределенность пристает только из-за недостатка опытных данных, неопределенность в ВАСО удобно разделить на алеаторическую (*aleatoric* = случайный) и эпистемическую (*epistemic* = знание) части.

В соответствии с названием, алеаторическая изменчивость относится к природной неуничтожимой случайности, главным примером которой является стандартная ошибка  $\sigma_{\ln s_a}$  в эмпирических соотношениях затухания. По сути, алеаторическая изменчивость связана с непрогнозируемой индивидуальностью процессов роста разрыва при землетрясениях. Эта часть неопределенности характеризуется двумя обстоятельствами: 1) ее нельзя уменьшить с ростом числа наблюдений и 2) учесть ее не составляет большого труда, например, посредством соотношения (3). Поэтому основное значение приобретает эпистемическая неопределенность, которая связана исключительно с недостатком сведений относительно регионального сейсмического процесса. Примерами эпистемической неопределенности являются короткая длина каталога, неоднозначный выбор соотношения затухания, оценка максимальной магнитуды в источнике, скорость скольжения на разломе и т.п. Считает-

ся очевидным, что с накоплением знания эпистемическая неопределенность уменьшается (в пределе до нуля). К настоящему времени метод объединения полного диапазона экспертных оценок и, тем самым, выполнения количественной оценки эпистемической неопределенности основывается на использовании логического дерева.

Логическое дерево (рис. 1) состоит из ряда узлов в именованных точках (например, “Модель затухания” или “Максимальная магнитуда”), в которых заданы альтернативные модели (или параметры моделей) и ветви, присоединенные к каждому узлу. Каждой альтернативной модели (например, каждой экспертной оценке  $m_{max}$ ) приписывается весовой множитель, интерпретируемый как относительная экспертная уверенность в правильности модели. Сумма весов всех ветвей, присоединенных к данному узлу, должна быть равна 1. Если  $n_p$  – полное число именованных точек, то число  $n_p$  полных ветвей будет

$$n_b = \prod_{k=1}^{n_p} n_k$$

где  $n_k$  – число узлов в именованной точке

$k$ . Анализ сейсмической опасности проводится по уравнению (4) для каждой полной ветви, вес которой  $h_b$  равен произведению весов в тех узлах, из которых составлена полная ветвь. Сумма весов всех полных ветвей, как нетрудно сосчитать, также равна 1. Каждой кривой опасности  $\lambda_b(a)$  приписывается вес, равный весу выбранной полной ветви, а конечная оценка опасности представляется как взвешенная сумма

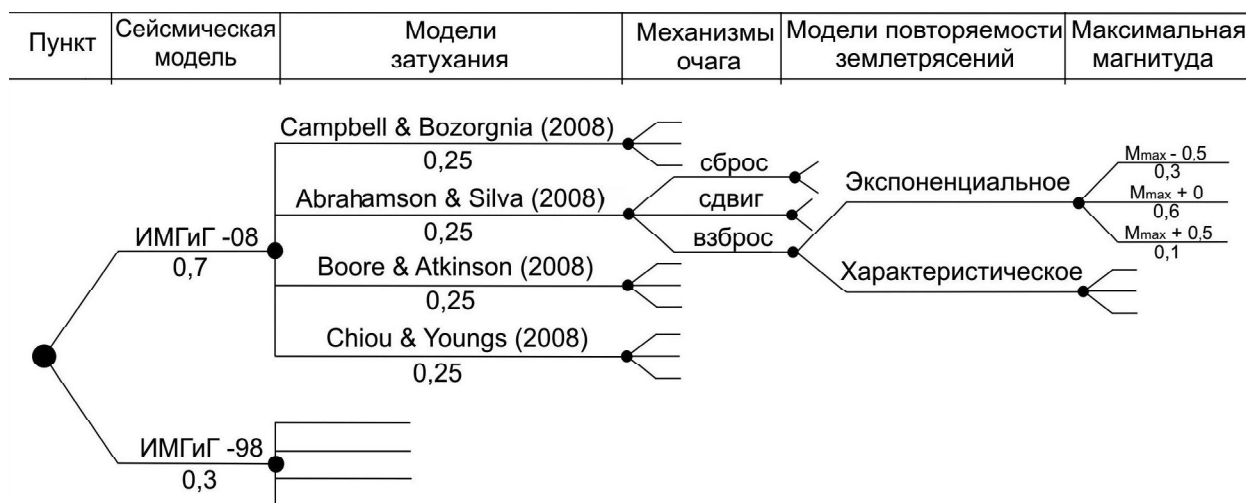


Рис. 1. Пример модели эпистемической неопределенности на основе логического дерева.

Здесь под сеймотектонической моделью понимаются все сейсмические источники, выделенные в данной модели и не показанные на рисунке.  $M_{max}$  означает максимальную известную историческую магнитуду или же магнитуду характеристического землетрясения. Цифры снизу – веса моделей или параметров. Отсутствие веса означает, что он не одинаков для разных источников в моделях.

по всем полным ветвям  $\lambda(a) = \sum_{b=1}^{n_b} h_b \lambda_b(a)$ . Иначе говоря, кривая опасности суть усреднение по ансамблю кривых опасности, определенных для всех полных ветвей логического дерева. Количественной оценкой неопределенности служит величина среднеквадратического отклонения  $\sigma(a)$ , определяемая на том же ансамбле. Часто для этой цели используется безразмерный коэффициент вариации  $COV = \sigma(a)/\lambda(a)$ .

Логическое дерево для о. Сахалина на рис. 1 показано неполностью, оно лишь иллюстрирует самые важные ветви для анализа. Например, здесь не показаны возможные варианты декластеризации каталога и учет влияния на движение грунта висячего блока разлома. Как правило, включение в анализ всех важных экспертных оценок приводит к труднообозримым логическим деревьям, полный расчет по которым оказывается практически невозможным. Один из подходов к решению этой проблемы состоит в устранении маловажных ветвей, что, в конечном счете, приводит к сокращению числа полных ветвей и углубленному пониманию качества оценки опасности. Однако с расчетной точки зрения эта проблема полностью решается использованием методов Монте

Карло. Если веса, приписанные узлам дерева, толковать как распределение вероятностей, то можно сгенерировать достаточно большое число полных ветвей в соответствии с этими распределениями. Ясно, что усреднение опасности по всем таким случайным реализациям полных ветвей в пределе будет эквивалентно указанному выше усреднению по ансамблю полных ветвей логического дерева.

Взаимные связи всех изложенных здесь общих идей и методов представлены на блок-схеме (рис. 2).

### ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ДЛЯ ГОРОДОВ САХАЛИНА

#### Сейсмотектонические модели Сахалина

В 1995–1996 гг. Л.С. Оскорбиным [3] на основе метода качественного сейсмотектонического анализа была построена модель сейсмических источников о. Сахалин (рис. 3). Суть этого метода состоит в экстраполяции сейсмотектонической информации в пространстве на основе общих и частных критериев сейсмичности [1, 5], а именно: 1) выяснение сейсмотектонической ситуации в местах наблюдаемой сейсмичности, 2) нахождение и объединение близких областей со сходными сейсмотектоническими условиями, 3) оценка в этих зонах параметров

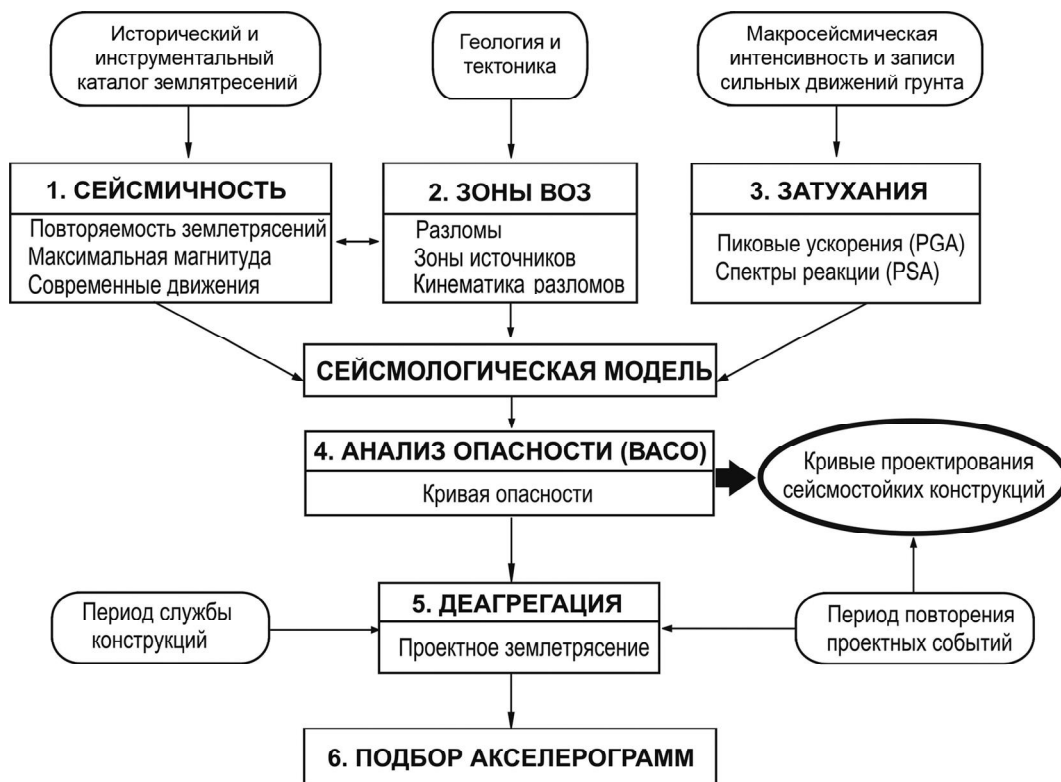
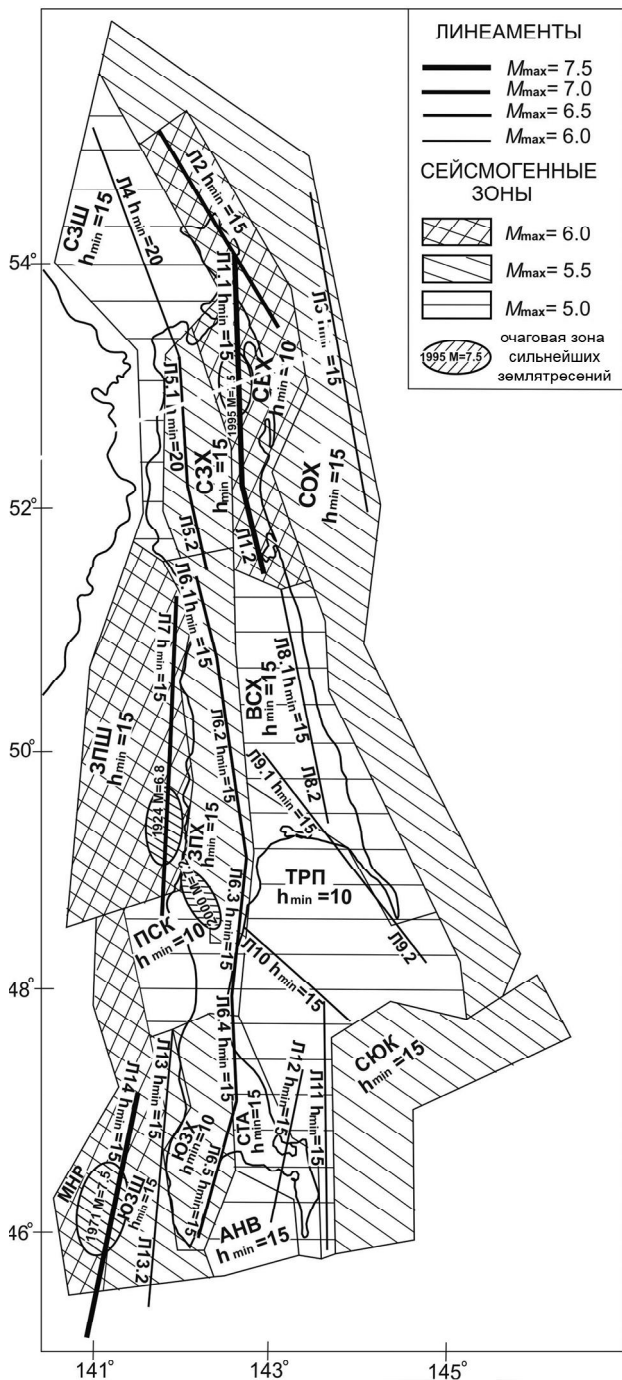


Рис. 2. Блок-схема вероятностного анализа сейсмической опасности (ВАСО).



**Рис. 3.** Конфигурация и параметры зон источников в линеаментно-доменной модели ИМГиГ-97 (по Л.С. Оскорбину [3]).

сейсмичности. Модель Л.С. Оскорбина была положена в основу построения карты ОСР-97 для Сахалина и прилегающих регионов. Однако для детального анализа сейсмической опасности была принята модель ИМГиГ-97, в которой из модели Л.С. Оскорбина используется только оригинальная геометрия сейсмических источников. Для всех источников

модели ИМГиГ-97 принято экспоненциальное магнитудное распределение (2).

Потребность в новой сеймотектонической модели [2] (далее ИМГиГ-07) связана с появлением в последнее десятилетие новой информации, именно: а) палеосейсмическими исследованиями установлены размеры характеристических землетрясений на крупных сегментах активных разломов, б) существенно уточнены положения гипоцентров и, тем самым, определены вариации мощности сейсмоактивного слоя, в) измерены средние скорости смещений на ряде крупных разломов. Модель ИМГиГ-07 (рис. 4) содержит 19 площадных зон источников, которые отвечают структурным элементам Сахалина и прилегающей акватории, а также ряд линейных источников, которые соответствуют прямо или косвенно установленным активным разломам. Главное отличие этой модели состоит в использовании также распределения характеристических землетрясений на ряде крупных разломов.

Параметры Гутенберга-Рихтера для экспоненциальных распределений всех источников в обеих моделях были определены на основе декластеризованного регионального каталога [4]. В качестве максимальной магнитуды здесь были использованы три оценки:  $M_{\max}$  (с весом 0.6),  $M_{\max} + 0.5$  (0.3) и  $M_{\max} - 0.5$  (0.1), где  $M_{\max}$  – максимальная магнитуда по каталогу. В работе [27] указано, что разломы, связанные с событиями магнитуды  $M \geq 6$ , почти всегда выходят на поверхность. Поэтому в обеих моделях для рассеянной сейсмичности всех площадных источников максимальные магнитуды не превышали 6. Параметры характеристических распределений были выбраны на основе изучения палеосмещений на разломах, а сами распределения были построены по методу [29].

### Модели затухания

На Сахалине число инструментальных записей сильных движений грунта, для которых  $I_{MSK} > 5$ , незначительно, поэтому построение регионального соотношения затухания для пиковых и спектральных движений грунта весьма затруднительно. Из-за этого для расчетов опасности использовались модели, созданные в 2008 г. в США в рамках проекта под названием *Next Generation Attenuation* (далее NGA). На основе единой общемировой базы данных (записи ряда сильных турецких, итальянских, китайских и тайваньских землетрясений с естественным преобладанием записей калифорнийских землетрясений) в работах [8, 12, 16, 17, 20, 22] построены пять разных моделей затухания для широкого диапазона (0–10 с) спектральных ускорений и  $\xi = 5\%$ . В ряде работ, например в [25], была установлена их применимость во многих активных сейсмических районах мира. Иными словами, было установлено приемлемое со-

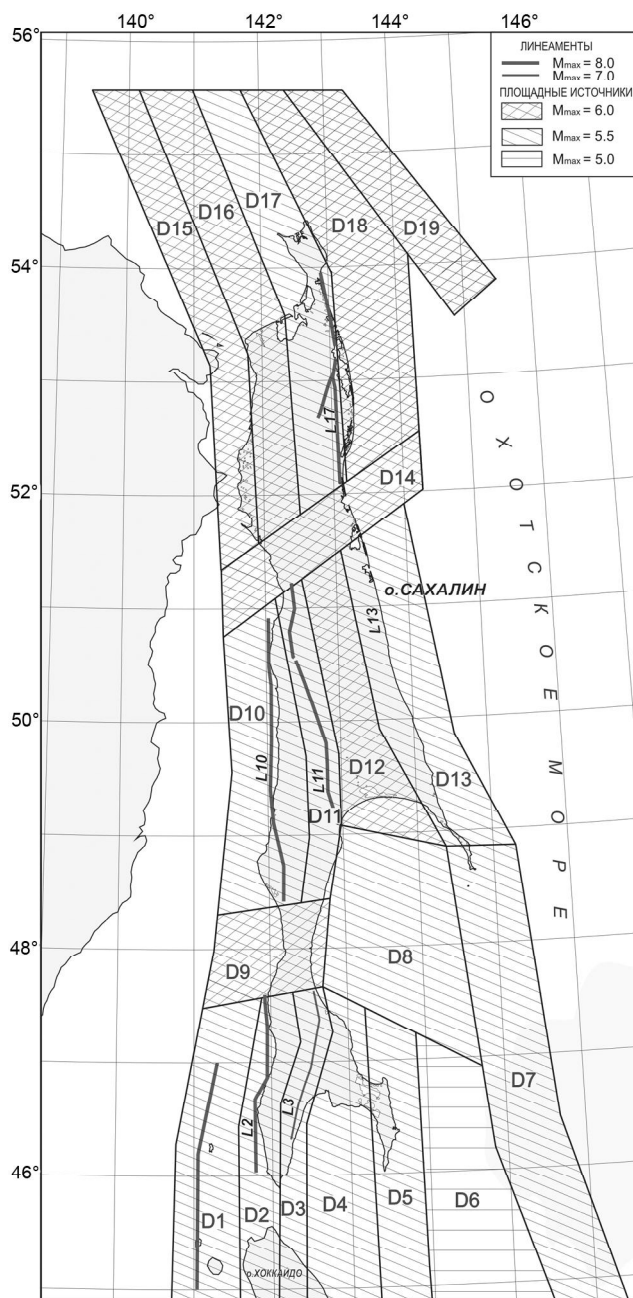


Рис. 4. Конфигурация источников в линейментно-доменной модели ИМГиГ-07.

гласие между соотношениями затухания NGA и местными базами данных по сильным движениям.

Для Сахалина такое соответствие устанавливается лишь по записям событий малых (в инженерном смысле) магнитуд. Однако имеющаяся представительная база данных по макросейсмическим наблюдениям позволяет вполне надежно определить коэффициенты регионального соотношения затухания для макросейсмической интенсивности  $I_{MSK}$ . Затуха-

ние пиковых и некоторых спектральных ускорений, рассчитанных по известным эмпирическим формулам (в частности, [9]) из затухания  $I_{MSK}$  на Сахалине, вполне согласуется с затуханием тех же ускорений в моделях NGA для магнитуд  $M_{LH}$  в диапазоне 5–6.5. Поэтому разумно предполагать, что без заметной ошибки это соответствие можно перенести также на весь диапазон спектральных периодов, магнитуд и расстояний.

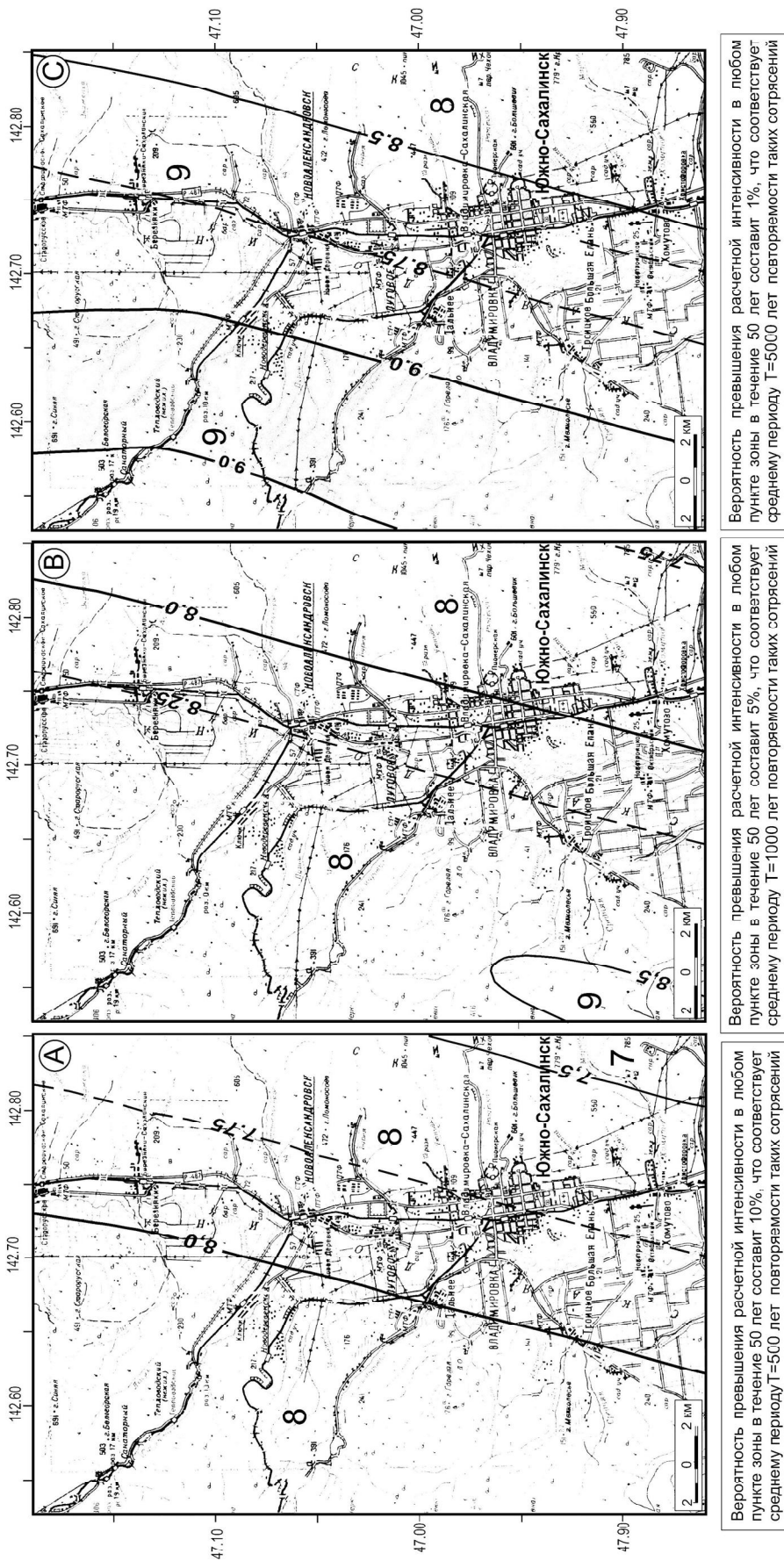
Возможно следует заметить, что спектры реакции, рассчитанные по записям из японских баз данных, часто резко отличаются по форме от спектров реакции записей сахалинских землетрясений, и поэтому японские модели затухания в работе не использовались.

### Грунтовые условия

Соотношения затухания NGA составлены для грунтов, характеризуемых  $170 \leq V_{S30} \leq 2200$  м/с, где  $V_{S30}$  – средняя скорость поперечных волн в верхнем 30-метровом слое грунта. Грунтовые условия, характеризуемые в моделях NGA единственным параметром  $V_{S30}$ , крайне изменчивы по площади и оказывают большое влияние на сотрясения в пункте. Вообще говоря, при расчете опасности, даже для территории небольшого города, самый очевидный способ учета влияния грунтов состоит в расчете проектного спектра реакции ускорения  $S_a(f)$  для коренных пород ( $V_{S30} \geq 540$  м/с) и в подборе по нему проектных акселерограмм. Движение на поверхности и внутри известного грунтового разреза в пункте можно затем рассчитать по известным алгоритмам [23]. Однако в традициях карт ОСР-97 и для определения общего уровня опасности необходим выбор среднего (эталонного) грунта.

Для подбора эталонного грунта на территории г. Южно-Сахалинска были проанализированы сейсмические характеристики грунтов, относящихся ко II категории СНиП II-7-81\* [6] по сейсмическим свойствам: твердых, полутвердых и тугопластичных суглинков, дресвяных и галечниковых грунтов. Наибольшей распространенностью на территории города и устойчивостью физико-механических характеристик отличаются галечниковые грунты с суглинистым заполнителем от 25 % до 40 %. По данным инженерной сейсморазведки, эти грунты характеризуются скоростью продольных волн  $V_p = 580–880$  м/с, скоростью поперечных волн  $V_s = 310–430$  м/с со средними значениями:  $V_p = 830$  м/с и  $V_s = 350$  м/с и плотностью  $\rho = 2.13$  г/см<sup>3</sup>. Грунты с такими характеристиками соответствуют грунтам II категории и были выбраны для детального сейсмического райо-





Вероятность превышения расчетной интенсивности в любом пункте зоны в течение 50 лет составит 1%, что соответствует среднему периоду  $T=5000$  лет повторяемости таких сотрясений

Вероятность превышения расчетной интенсивности в любом пункте зоны в течение 50 лет составит 5%, что соответствует среднему периоду  $T=1000$  лет повторяемости таких сотрясений

Вероятность превышения расчетной интенсивности в любом пункте зоны в течение 50 лет составит 10%, что соответствует среднему периоду  $T=500$  лет повторяемости таких сотрясений

Рис. 5. Карты детального сейсмического районирования в параметрах сейсмической интенсивности сотрясения ( $I_{MSK}$ ) для г. Южно-Сахалинска.

нирования территории городов о. Сахалин в качестве среднего (эталонного) грунта.

### Результаты оценки сейсмической опасности

По описанной методике в Институте морской геологии и геофизики ДВО РАН были проведены расчеты сейсмической опасности для территории городов о. Сахалина с использованием логического дерева, главные ветви которого показаны на рис. 1. В качестве параметров движения были выбраны пиковое горизонтальное (геометрическое среднее по двум компонентам) ускорение (PGA), горизонтальное псевдоспектральное ускорение (PSA) для 5 %-ного затухания на спектральных периодах 0.2 с (фундаментальная мода для низких сооружений) и 1.0 с (для высоких сооружений). Расчеты проведены для вероятности превышения в 10 %, 5 % и 1 % на период в 50 лет, что соответствует средним периодам повторения 500, 1000 и 5000 лет.

Выборки по методу Монте Карло составляли 1000–3000 полных ветвей логического дерева, по которым были определены средние значения PGA и PSA, а также соответствующие коэффициенты вариации  $COV$ . Расчеты производились для узлов квадратной сетки, накрывающей с шагом  $2 \times 2$  км<sup>2</sup> окрест-

ности городов. Коэффициент вариации  $COV$  на период повторения в 500 лет составляет около 0.2–0.3 как для PGA, так и для PSA.

Для прогноза сотрясений в параметрах макросейсмической интенсивности  $I_{MSK}$  для средних (эталонных) грунтовых условий применялась та же зависимость, которая использовалась для карты сейсмической опасности Северной Евразии [7]. На основе полученных данных были построены карты детального сейсмического районирования территории городов Сахалинской области в параметрах расчетной макросейсмической интенсивности в шкале MSK-64 для вероятности превышения 10 %, 5 % и 1 % на интервале  $t = 50$  лет (табл., рис. 5). Из результатов видно, что для двух городов (Южно-Сахалинск и Долинск) оценка сейсмической опасности по ОСР-97 в целочисленных баллах не изменилась, а в остальных городах для различных периодов повторения получены более либеральные оценки сотрясений. В частности, для г. Оха при повторяемости  $T = 1000$  лет получено  $I_{MSK} = 9$ , вместо 10 по ОСР-97.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты детального сейсмического районирования территории городов Сахалинской области, на основе экспертного заключения ведущих учреждений России, утверждены Департаментом строительства Администрации Сахалинской области приказом №104-1 от 14 декабря 2007 г. для применения при сейсмостойком строительстве гражданских и промышленных сооружений.

Авторы обязаны отметить, что большой вклад в анализ и разработку приведенной здесь методики внесли А.И. Иващенко и С.П. Никифоров. Их большая эрудиция и плодотворное участие во многом определили выполнение оценки сейсмической опасности на Сахалине.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллова И.В., Сорский А.В. О методике составления карты сейсмического районирования на примере Кавказа. 1:1 000 000 // Бюл. Совета по сейсмологии. 1970. № 8. С. 121–124.
2. Невельское землетрясение и цунами 2 августа 2007 года, о. Сахалин / Б.В. Левин, И.Н. Тихонов, В.М. Кайстренко и др.; ред. Б.В. Левин, И.Н. Тихонов. М.: Янус-К, 2009. 204 с.
3. Оскорбин Л.С. Сейсмогенные зоны Сахалина и сопредельных областей // Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона. Южно-Сахалинск, 1997. С.154–178.
4. Региональный каталог землетрясений острова Сахалин / Л.Н. Поплавская, А.И. Иващенко, Л.С. Оскорбин и др.; ред. Л.Н. Поплавская. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 104 с.

Таблица. Сравнение результатов ОСР-97 и ДСР для территории городов о. Сахалин.

Название городов Сахалинской обл.	ОСР-97			ДСР-2007		
	А	В	С	А	В	С
Александровск	9	9	10	8	8–9*	9
Анива	8	9	9	8	8	9
Долинск	8	8	9	8	8	9
Корсаков	8	8	9	7–8*	8	9
Макаров	8	9	9	8	8	9
Невельск	9	9	9	8	8	8
Ноглики	9	9	10	8	8	9
Оха	9	10	10	8	8–9*	9
Поронайск	8	9	9	8	8	9
Смирных	8	9	9	8	8	9
Томари	8	8	9	7	7	8
Тымовское	9	9	10	8	8	9
Углегорск	9	9	10	8	8	9
Холмск	8	9	9	8	8	9
Южно-Сахалинск	8	8	9	8	8	9

\* – через территорию города проходит граница соседних значений макросейсмической интенсивности. Сейсмическая интенсивность 7 и более баллов макросейсмической шкалы MSK-64 для средних грунтовых условий и трех уровней сейсмической опасности – 10 % (А), 5 % (В) и 1 % (С) возможного превышения расчетной интенсивности в течение 50 лет.

5. Рейснер Г.И. Геологические методы оценки сейсмической опасности. М.: Недра, 1980. 172 с.
6. Строительные нормы и правила (СНиП II-7-81\*); Строительство в сейсмических районах. М., 2000. 52 с.
7. Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации // Сейсмостойкое строительство. 1998. № 4. С. 30–34.
8. Abrahamson N., Silva W. Summary of Abrahamson and Silva NGA ground-motion relations // Earthq. Spectra. 2008. V. 24. 67–98.
9. Atkinson G., Sonley E. Empirical relationships between modified mercalli intensity and response spectra // Bull. Seism. Soc. Am. 2000. V. 90, N 2. P 537–544.
10. Bazurro P., Cornell C.A. Disaggregation of seismic hazard // Bull. Seismol. Soc. Am. 1999. V. 89, N. 2. P. 501–520.
11. Bender D., Perkins D.M. SEISRISK III: A computer program for seismic hazard estimation. U.S. Geological Survey Bulletin 1772. Washington, 1987. 48 p.
12. Boore D.M., Atkinson G.M. Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5 %-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 // Earthq. Spectra. 2008. V. 24. P. 99–138.
13. Gardner J.K., Knopoff L. Is the sequence of earthquake in Southern California with aftershocks removed, Poissonian? // Bull. Seismol. Soc. Am. 1974. V. 64. P. 1363–1367.
14. Campbell K.W. Engineering models of strong ground motion // Earthquake Engineering Handbook / W.F. Chen and C. Scawthorn (eds). CRC Press, Boca Raton, Florida, 2003. 5-1-5-76.
15. Campbell K.W. Prediction of strong ground motion using hybrid empirical method and its use in the development of ground motion (attenuation) relations in eastern North America // Bull. Seismol. Soc. Am. 2003. V. 93. P. 1012–1033.
16. Campbell K.W., Bozorgnia Y. NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5 % damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s // Earthq. Spectra. 2008. V. 24. P. 139–172.
17. Chiou B.S.J., Youngs R.R. NGA ground motion relations for the geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters // Earthq. Spectra. 2008. V. 24. P. 173–216.
18. Cornell C.A. Engineering seismic risk analysis // Bull. Seismol. Soc. Am. 1968. V. 58. P. 1583–1606.
19. Cornell C.A., Winterstein S.R. Temporal and magnitude dependence in earthquake recurrence models // Bull. Seismol. Soc. Am. 1988. V. 78. P. 1522–1537.
20. Idriss I.M. An NGA empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes // Earthq. Spectra. 2008. V. 24. P. 217–242.
21. ISO 19901-2:2004. Petroleum and natural gas industries - Specific requirements for offshore structures. P. 2: Seismic design procedures and criteria, European Committee for Standardization. Brussels, 2004. 54 p.
22. Kaklamanos J., Baise L.G., Boore D.M. Estimating unknown input parameters when implementing the NGA ground-motion prediction equations in engineering practice // Earthq. Spectra. 2008. V. 27. P. 1219–1235.
23. Kramer S.L. Geotechnical earthquake engineering. Prentice-Hall Publishers, New Jersey, 1996. 653 p.
24. Scherbaum F., Schmedes J., Cotton F. On the conversion of source-to-site distance measures for extended earthquake source models // Bull. Seism. Soc. Am. 2004. V. 94. P. 1053–1069.
25. Stafford P.J., Strasser F.O., Bommer J.J. An evaluation of the applicability of the NGA models to ground-motion prediction in the Euro-Mediterranean region // Bull. Earthq. Engineering. 2008. P. 149–177.
26. Thenhaus P.G., Campbell K.W. Seismic hazards analysis, in Earthquake Engineering Handbook / W.F. Chen and C. Scawthorn (eds.). CRC Press, Boca Raton, Florida, 2003. 5-1-5-76.
27. Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // Bull. Seismol. Soc. Am. 1994. V. 84, N. 4. P. 974–1002.
28. Woessner J., Wiemer S. Assessing the quality of earthquake catalogues: Estimating the magnitude of completeness and its uncertainty // Bull. Seismol. Soc. Am. 2005. V. 95, N 2. P. 684–698.
29. Youngs R.R., Coppersmith K.J. Implication of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates // Bull. Seismol. Soc. Am. 1986. V. 76, N 4. P. 939–964.

*Рекомендована к печати Т.К. Злобиным*

***B.V. Levin, Chun Un Kim, V.N. Solovjev***

### **Seismic hazard estimate and results of detailed seismic zoning for the cities of Sakhalin Island**

The paper briefly deals with the basics of probabilistic seismic hazard analysis (PSHA). Special attention is paid to identification and quantitative estimation of uncertainties associated with description of seismic sources and engineering models for prediction of strong motions. Basic seismic models and results of implication of PSHA for detailed seismic zoning for the territories of the Sakhalin cities are offered.

***Keywords:*** seismicity, seismic hazard, logic tree, disaggregation, seismic zoning, Sakhalin Island.