

**ОБ ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ДЛЯ ГОРОДА  
ПЕТРОПАВЛОВСКА–КАМЧАТСКОГО НА ОСНОВЕ НАБОРА СЦЕНАРНЫХ  
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

**А.А. Гусев,\* Л.С. Шумилина, К.Н. Акатова \*\***

*\*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006*

*\*\* Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, 123995*

*УДК 550.34*

*URL: [http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h\\_dgggms/1-2005/screp-2.pdf](http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2005/screp-2.pdf)*

*Опубликовано 11 февраля 2005 г.*

*© 2005, Гусев и др., ОНЗ РАН*

**Аннотация.** В отличие от обычной вероятностной схемы характеристики сейсмической опасности, в ряде случаев целесообразно ее детерминистическое описание в виде серии конкретных примеров так называемых «сценарных землетрясений». Это необходимо в задаче прогноза последствий землетрясения для жителей, застройки и инфраструктуры населенных пунктов и территорий, для прогноза воздействия в виде реалистических акселерограмм, а также для планирования мер по снижению ущерба от землетрясений. В работе предложен первый вариант такого набора сейсмических сценариев для района г. Петропавловска-Камчатского. В качестве сценарных событий выбраны шесть типичных представителей возможных опасных землетрясений из разных окрестных очаговых зон. Для этих землетрясений созданы модели разломов-очагов. Наиболее сложная проблема – определить параметры колебаний на малом расстоянии от очага землетрясения с  $M_w=9$ . Были оценены следующие параметры воздействия – макросейсмическая интенсивность в баллах, максимальные ускорения и скорости, длительности и характерные периоды колебаний. Для расчета параметров использована ранее разработанная методика, основанная на описании очага как протяженного некогерентного широкополосного излучателя. Эта модель откалибрована с использованием макросейсмических данных и данных сильных движений Камчатки. Для каждого сценарного землетрясения дана также грубая оценка повторяемости. Выполненное исследование – важный шаг в отработке современной методики детерминистической оценки сейсмической опасности. Однако, чтобы получить численные оценки, применимые для прямого практического использования, необходимы дальнейшие уточнения, список которых приводится.

**Abstract.** A specification of seismic hazard for the town of Petropavlovsk-Kamchatsky through scenario earthquakes.

In contrast to the usual probabilistic seismic hazard analysis, in a number of cases it is useful to consider the hazard in a deterministic manner, through a series of example events labeled “scenario earthquakes”. This is needed for the prediction of earthquake effects on population, built-up areas and infrastructure, for advanced seismic load specification through realistic accelerograms, as well as for planning earthquake countermeasures. The first version of the set of scenario earthquakes for the town of Petropavlovsk-Kamchatsky is proposed in the study. Six possible earthquakes, that are typical representatives of the seismic hazard for the town are selected within the nearby seismic zones as scenario earthquakes. For each of these, source/fault models was proposed. The greatest challenge was to determine ground motion parameters very near to the source of a  $M_w=9$  event. The following parameters of earthquake effects were determined: macroseismic intensity, peak accelerations and velocities, durations and characteristic periods of the strong ground motion. To calculate these parameters we apply the previously developed technique based on the description of the earthquake source as an extended incoherent wideband radiator; the model is calibrated using macroseismic and strong motion data from Kamchatka. A rough estimate of the return period for each earthquake is also given. The study is a significant step in the development of a modern technique for the deterministic seismic hazard analysis. Still, to obtain numerical estimates sufficiently reliable for a direct practical application, one needs more accurate analysis, along the lines explicitly listed.

## ВВЕДЕНИЕ

Прогноз сейсмических воздействий – важнейшая прикладная проблема сейсмологии. Для целей массового строительства она в настоящее время решается на основе вероятностного подхода. В этом случае решением проблемы является параметр колебаний грунта с определенной, заранее заданной повторяемостью. Например, современная карта общего сейсмического районирования России ОСР-97А [Страхов, Уломов и др., 1998; Уломов, Шумилина, 1999; Сейсмическое районирование территории..., 2000; СНиП..., 2000] выражена в терминах балла макросейсмической интенсивности («балльности») с периодом повторяемости 500 лет. Популярно использование, в рамках того же вероятностного подхода, таких параметров как максимальное ускорение или значение спектра реакции на том или ином периоде. Сегодня, однако, вероятностные подходы к оценке сейсмической опасности развиты лишь для относительно простых (и менее ответственных) случаев, когда допустимо описание опасности одним-тремя параметрами, и притом в отдельной точке территории. Когда же нужны более полные характеристики опасности, вероятностные подходы сегодня, как правило, неработоспособны. Это случаи, когда требуются более детальные прогнозы для конкретной точки (площадки), например прогнозы движения грунта (акселерограмм), или сейсмогеологических эффектов (обвалов, оползней). Это также случаи, когда необходима характеристика эффекта сразу во многих точках. Типичные случаи – характеристики нагрузок на протяженные сооружения (акселерограммы для многих точек с учетом корреляции), прогноз эффектов землетрясения для населенных пунктов, линейных сооружений и территорий в целом (для жителей, застройки и инфраструктуры), планирование мер для снижения ущерба от землетрясения. В этих случаях обычно приходится вернуться на более примитивный детерминистический уровень описания опасности и задавать ее в виде серии конкретных примеров возможных землетрясений. Такой подход, в сущности, не обладает новизной, но в последние годы, когда он активно развивается, он получил новое имя «сейсмического сценария» или «сценарного землетрясения». Конечно, для практических целей число «сценариев» не может быть слишком большим. Поэтому при выборе сценариев основное значение имеет учет фактической сейсмологической ситуации. И, конечно, желательно снабжать «сценарии» хотя бы грубыми характеристиками повторяемости. (В отличие от оценок повторяемости *сотрясений* на карте ОСР, здесь речь идет о повторяемости *очагов землетрясений*). Упомянем еще растущую популярность частично формализованного подхода к подбору вариантов сценария – через «деагрегацию сейсмоопасности» (deaggregation of hazard [Bazzurro and Cornell, 1999]). В нашем случае подобный подход едва ли имеет какие-то принципиальные преимущества по сравнению с экспертным решением.

Ниже описана первая попытка создать и проанализировать набор вариантов сценарного землетрясения для района г. Петропавловска-Камчатского и его окрестностей. Основная задача работы – методическая. Конкретные параметры сотрясений, приводимые ниже, имеют ориентировочный характер и подлежат уточнению.

## 1. СЕЙСМОЛОГИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА ВБЛИЗИ ПЕТРОПАВЛОВСКА – КАМЧАТСКОГО И ВЫБОР СЦЕНАРНЫХ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Сейсмичность района Камчатки [Ежегодники..., 1967-199 ; Гусев, Шумилина, 1976; Федотов, Чернышева и др., 1987; Fedotov, Chernysheva et al., 1993], также как и сейсмическая опасность на территории полуострова [Сейсмическое..., 1968; Сейсмическое районирование..., 1980; Гусев, 1990; Гусев, Петухин, 1995; Гусев, Гусева и др., 1998; Сейсмическое районирование..., 2000; СНиП..., 2000] было создано формализованное описание зон возникновения очагов землетрясений (ВОЗ), в том числе и для Камчатского сейсмоактивного региона, как основа для оценки сейсмической опасности. При составлении этого описания использовались и анализировались (в рамках принятой для работ по ОСР детальности) все имеющиеся в настоящее время сейсмологические, геолого-тектонические и геофизические материалы. Документированное формальное описание зон ВОЗ [База данных ОСР-97, ИФЗ РАН] может служить основой для выбора «сценарных» землетрясений для Петропавловска-Камчатского (далее Петропавловск) и его окрестностей.

Сейсмическая опасность для территории Петропавловска и побережья Авачинской бухты высокая: согласно карте ОСР-97-А [*Сейсмическое районирование...*, 2000], расчетная балльность 9 для повторяемости  $0,02 \text{ год}^{-1}$  (см. также, сводку макросейсмических данных для Петропавловска в [*Сейсмическое районирование...*, 1980]). Вклады в эту повторяемость создают землетрясения, возникающие в нескольких окрестных сейсмоактивных зонах. В первую очередь это землетрясения из тихоокеанской фокальной зоны (зоны субдукции). Определенную роль играют также землетрясения, принадлежащие зонам коровой (блоковой) сейсмичности, расположенным собственно на полуострова Камчатка. Для целей данной работы рассмотрены три важнейших для Петропавловска зоны ВОЗ, далее обозначенные ВОЗ1, ВОЗ2 и ВОЗ3 [*Сейсмическое районирование...*, 2000, Гусев, 1990] (рис. 1а,б; табл. 1).

Наиболее велика повторяемость сотрясений от землетрясений зоны ВОЗ1 – межплитовых (субдукционных) и внутриплитовых мелкофокусных землетрясений тихоокеанской фокальной зоны (зоны Вадати – Заварицкого -Беньоффа), на глубинах 0-80 (в основном до 50) км. Ближайшая точка ВОЗ1 расположена к ЮВ от Петропавловска на расстояниях 50-70 км. Ближайшие к Петропавловску типичные очаги из этой зоны могут создавать в городе сотрясения 8-8.5 баллов. Вторая, намного менее существенная зона ВОЗ2 – это промежуточные землетрясения зоны Вадати – Заварицкого - Беньоффа на глубинах 80-150 км. Гипоцентральные расстояния от Петропавловска для этих землетрясений порядка 80-100 км. Ближайшие к Петропавловску типичные очаги из этой зоны могут создавать в городе сотрясения 7.5-8 баллов. Третья зона ВОЗ3 – это коровые землетрясения зон блоковой тектоники на самом полуострове Камчатка. Зона ВОЗ3 протягивается по восточному побережью Камчатки и включает Восточные хребты и восточный вулканический пояс Камчатки. Повторяемость землетрясений в этой зоне относительно весьма низкая, но лишь очаги из этой зоны могут возникать в непосредственной близости к Петропавловску.

В этих редких случаях даже типичные землетрясения из этого источника могут вызывать в Петропавловске сотрясения в 9 и более баллов. Следует отметить, что сотрясения интенсивностью 9 и более баллов могут в Петропавловске быть вызваны и очагами из зон ВОЗ1 и ВОЗ2, но не всякими очагами, а лишь имеющими нетипичные, повышенные амплитуды высокочастотных колебаний. С учетом наблюдаемого разброса в величине сотрясений при заданной магнитуде и расстоянии, доля подобных нетипичных землетрясений достаточно заметна.

Для каждой из трех зон ВОЗ были выбраны варианты сценарных землетрясений. Они задавались, исходя из следующих соображений. Во-первых, выбирались очаги, порождающие максимальные по силе воздействия; практически это ближайшие к району Петропавловска очаги данного рода в пределах данной зоны ВОЗ. Во-вторых, в пределах отдельной ВОЗ выбирались варианты, пригодные для того, чтобы описать разнообразие воздействий. Далее, принимались во внимание данные о фактически происходивших землетрясениях. И, наконец, количество вариантов сценария желательно было иметь минимальным. С учетом подобных противоречивых соображений, были выделены шесть типов сценарных землетрясений, а именно (см. табл. 1):

В зоне ВОЗ1 – три варианта близкого очага с магнитудами  $M_w = 9, 8.4 \text{ и } 7.8$ ; им присвоены коды FZ9, FZ8, AVS, соответственно.

В зоне ВОЗ2 – один вариант землетрясения с кодом AVG.

В зоне ВОЗ3 – два варианта: тектоническое землетрясение с очагом непосредственно под Петропавловском (код PET) и вулканотектоническое землетрясение (код VUL) .

Для этих вариантов, используя имеющиеся теоретические разработки, накопленные материалы наблюдений на Камчатке и опыт наблюдений в более изученных регионах, были созданы модели очагов сценарных землетрясений (табл. 2) и расчетные схемы для моделирования соответствующих колебаний грунта. Особенно важно было знать возможные значения моментных магнитуд. Авторы настоящей публикации опирались на значения моментных магнитуд ( $M_w$ ) для сильнейших землетрясений Камчатки, которые были ранее получены авторами и приводятся в [*Кондорская, Уломов, 1995; Гусев, Шумилина, 2004*]. Эта информация была существенным образом использована при выборе вариантов сценария для зон ВОЗ1 и ВОЗ2. Связь моментных магнитуд и магнитуд по поверхностным волнам ( $M_{LH}$ ) принимали по корреляционной зависимости для региона Камчатка-Курилы-Япония из [*Гусев, Мельникова, 1990*].

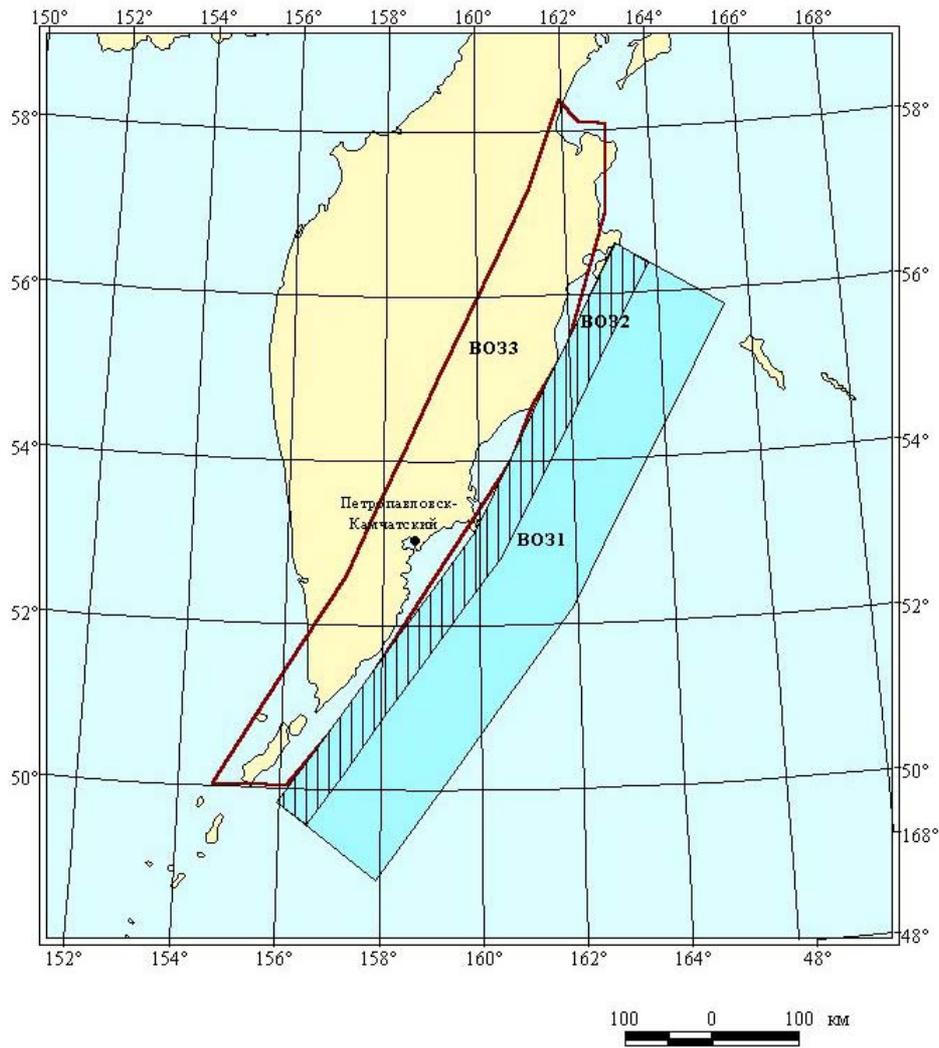


Рис.1а Положение зон ВОЗ (в плане)

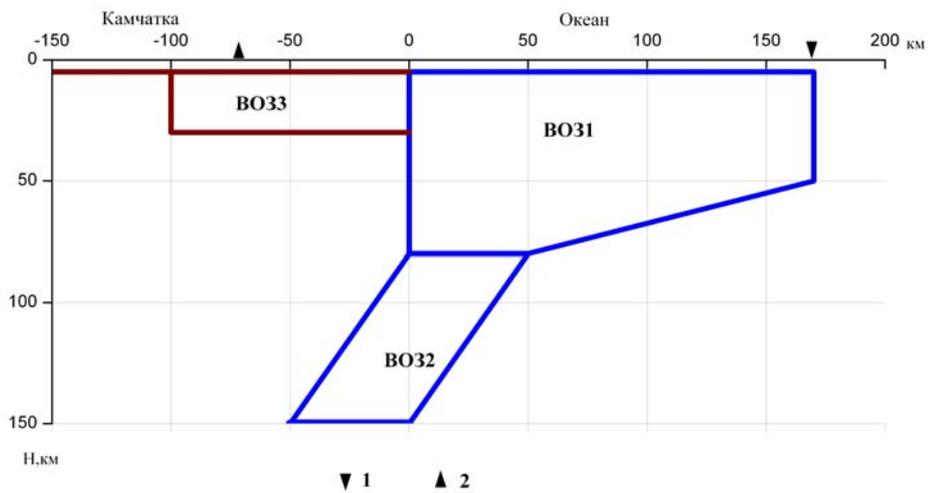


Рис.1б Положение зон ВОЗ в разрезе: 1- ось глубоководного желоба; 2 – ось вулканического пояса

## Зоны ВОЗ и сценарные землетрясения

ЗОНА ВОЗ И ЕЕ ХАРАКТЕРИСТИКА	ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ, ВЫБРАННОЕ КАК СЦЕНАРНОЕ			
	Характеристика	Магнитуда		Код
		$M_w$	$M_{LN}$	
<b>ВОЗ 1:</b> тихоокеанская фокальная зона; мелкофокусные субдукционные землетрясения. Интервал глубин 0-80 км. Магнитуда $M_w$ до 9.0, $M_{LN}$ до 8.5	(1) Субдукционный надвиг от м. Шипунский до м. Лопатка	9.0	8.5	FZ9
	(2) Субдукционный надвиг от м. Шипунский до м. Асача	8.4	8.25	FZ8
	(3) Крутопадающий взброс под зал. Авачинский	7.8	7.9	AVS
<b>ВОЗ 2:</b> тихоокеанская фокальная зона; субдукционные землетрясения с промежуточной глубиной. Интервал глубин 80 - 150 км. Магнитуда $M_w$ до 7.8	(4) Промежуточный очаг в зоне Вадати-Заварицкого-Беньофа под Петропавловском	7.8	7.9	AVG
<b>ВОЗ 3:</b> блоковая, коровая сейсмичность суши Камчатки. Интервал глубин 0-30 км. Магнитуда $M_w$ до 6.5-7, $M_{LN}$ до 6.5-7	(5) Землетрясение тектонического происхождения под Петропавловском	6.8	7.0	PET
	(6) Вулкано-тектоническое землетрясение связанное с Авачинско-Коряжской группой вулканов	6.8	7.0	VUL

Очаги моделировали как прямоугольные площадки - активные разломы в объеме Земли, с жестко заданной геометрией и с излучательной способностью, заданной на полуэмпирической основе. В расчетах принимались эмпирические средние таких параметров, как сброшенное напряжение или макросейсмическая магнитуда; иными словами, рассчитанные далее параметры колебаний от сценарных землетрясений имеют характер «типичных», а не «аномальных». Параметры сценарных очагов приведены в табл. 2, их местоположение отображено на карте (рис.2) и разрезе (рис.3). От каждого из шести очагов были рассчитаны поле макросейсмической интенсивности и карта изосейст. Кроме того, для шести пунктов-«приемников» (гипотетических площадок строительства) (табл. 3) на территории Петропавловска и других важных населенных пунктов вокруг Авачинской губы были рассчитаны параметры ожидаемых сейсмических колебаний.

Таблица 2

## Очаговые параметры сценарных землетрясений

Код землетрясения	Магнитуда $M_w$	Координаты «эпицентра» <sup>1</sup>		Глубина «гипоцентра» <sup>2</sup> , км	Оrientировка площадки очага		Размеры очага, км	
		с. ш.	в. д.		Простирание <sup>3</sup>	Падение <sup>4</sup>	длина	ширина
FZ9	9.0	51.0°	159.0°	26	216°	14°	450	175
FZ8	8.4	52.1°	159.4°	36	216°	14°	230	88
AVS	7.8	52.7°	159.3°	26	217°	75°	114	44
AVG	7.8	52.8°	159.2°	77	217°	50°	114	44
PET	6.8	53.0°	158.6°	10	120°	135°	39	13
VUL	6.8	53.2°	158.8°	10	260°	135°	39	13

Примечания к табл.2:

<sup>1</sup> «эпицентр» – центр проекции на земную поверхность прямоугольника, моделирующего очаг («макросейсмический эпицентр»);

<sup>2</sup> «гипоцентр» – центр прямоугольника, моделирующего очаг;

<sup>3</sup> простирание: азимут длинной горизонтальной стороны прямоугольника;

<sup>4</sup> падение: угол короткой наклонной стороны прямоугольника с горизонтом.

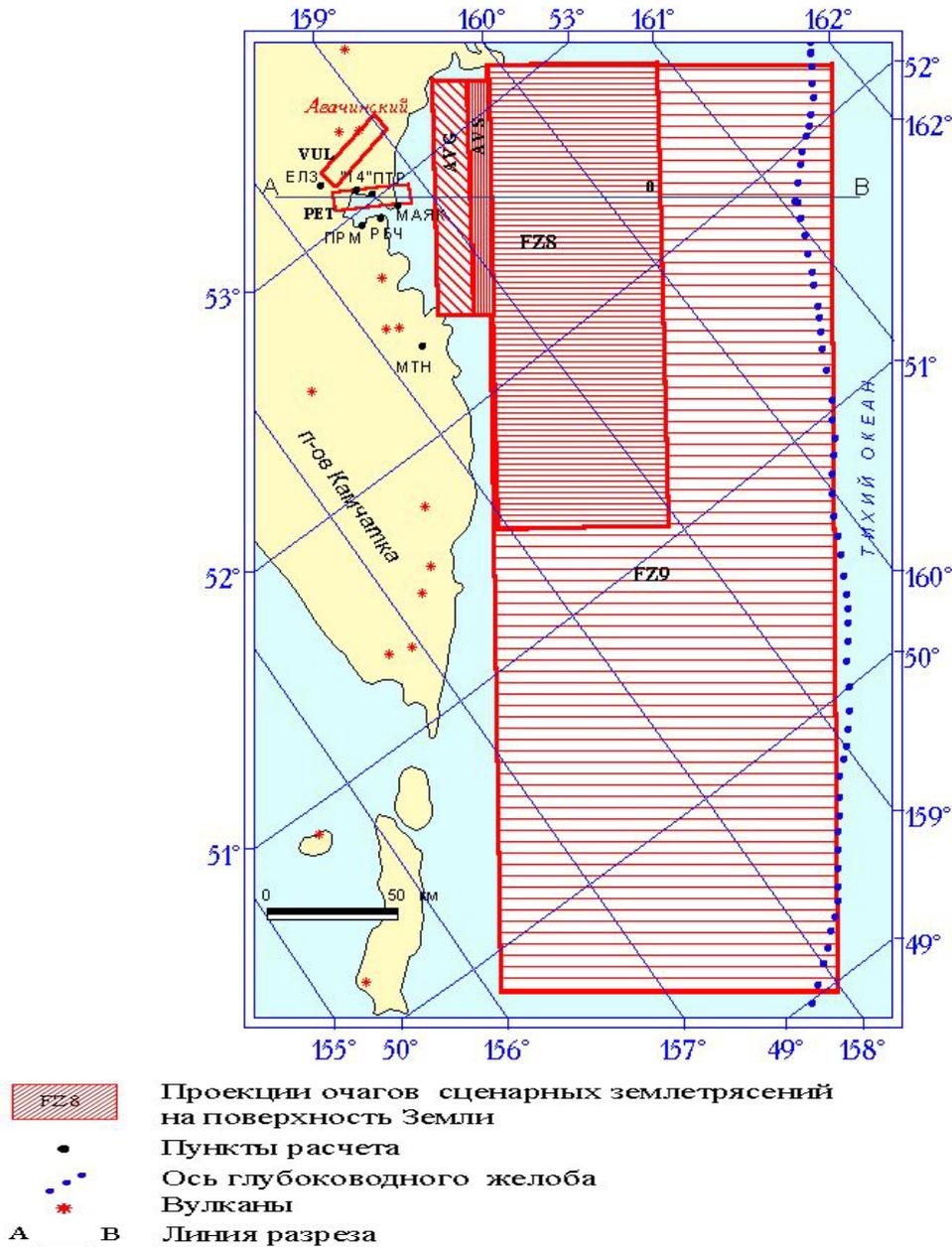


Рис.2 Карта расположения очагов сценарных землетрясений

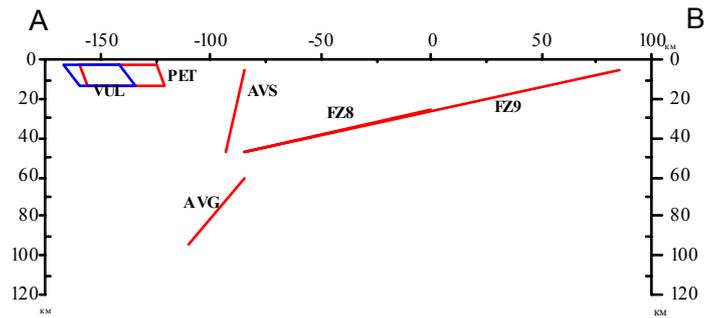


Рис.3 Расположение сценарных очагов по глубине - разрез по линии А-В

Таблица 3

Пункты-«приемники», для которых рассчитывали параметры движения грунта

Название пункта	Координаты,		Код
	с. ш.	в. д.	
Петропавловск-Камчатский - центр	53.0°	158.6°	ПТР
14 км Елизовского шоссе	53.1°	158.6°	«14»
Елизово	53.2°	158.4°	ЕЛЗ
Рыбачий	52.9°	158.6°	РБЧ
Приморский	52.9°	158.4°	ПРМ
Петропавловский маяк	52.9°	158.8°	МАЯК
Мутновская ГеоТЭС	52.4°	158.3°	МТН

## 2. МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ БАЛЛЬНОСТИ И ПАРАМЕТРОВ КОЛЕБАНИЙ

В работе для расчета макросейсмической интенсивности («балльности») применили недавно разработанную методику расчета поля интенсивности вокруг протяженного очага землетрясения – излучателя некогерентных высокочастотных сейсмических волн [Гусев, Шумилина, 1999]. В этом подходе используется идея аддитивности энергетических вкладов элементарных излучателей – компонент очага, формирующих поле в приемнике. В качестве параметра, пригодного для предсказания интенсивности, используется интеграл от квадрата акселерограммы, или «интенсивность по Ариасу». Очаг землетрясения характеризуется в первую очередь моментной магнитудой. Предполагается приблизительное геометрическое подобие очагов. Развитая теория была успешно сопоставлена с наблюдательными данными региона Камчатка – Курилы - Япония, и были оценены основные параметры конкретной модели связи балл – магнитуда - расстояние для этого региона. Применение теоретически обоснованной модели протяженного очага имеет принципиальное значение, так как для очагов важнейших типов FZ9, PEF площадки находятся на расстояниях от очага много менее половины его длины. В такой ситуации использование любых подходов на основе модели точечного источника неизбежно породит грубые ошибки. Вообще говоря, мыслим и чисто эмпирический подход к прогнозу колебаний грунта, но в данной задаче он не имеет сколь угодно надежной наблюдательной основы.

В примененной расчетной схеме модельный очаг считается излучающей площадкой прямоугольной формы, причем длинная сторона прямоугольника параллельна дневной поверхности. Длина и ширина площадки будущего очага неизвестны и их можно было бы трактовать как случайные величины. Однако мы обошли эту проблему и в расчетах принимали среднюю (типичную) геометрию площадки для данного значения моментной магнитуды  $M_w$  [Гусев, Мельникова, 1990; Гусев, Шумилина, 1999]. Для калибровки расчетных карт балльности использовалась средняя зависимость балльности от расстояния  $I(M, r)$ , оцененная для курило - камчатской фокальной

симось балльности от расстояния  $I(M, r)$ , оцененная для курило - камчатской фокальной зоны согласно методике и результатам в [Гусев, Шумилина, 1999]. Параметры моделирования поля балльности приняты следующими:

- коэффициент, характеризующий связь балла с «интенсивностью по Ариасу»  $A$ ,  $C_A=1,667$ ;
- коэффициент, характеризующий связь балла с моментной магнитудой,  $C_M=1,85$ ;
- показатель степени геометрического расхождения для амплитуды волны в среде,  $n=1$ ;
- расстояние, на котором «энергия»  $A$  поглощается средой в  $e$  раз,  $RQ=90$  км;
- балльность на опорном расстоянии  $r_B=100$  км от опорного очага с магнитудой  $M_{wb}=8$  ( $M_{LH}=8$ ),  $I_B=7.75$  балла.

Полученные таким образом оценки балльности относятся к средним грунтовым условиям. Для учета разброса излучательной способности очагов оценки можно рассматривать как средние или медианные значения нормально распределенной случайной величины со среднеквадратическим отклонением около  $\sigma_f=0.7$  балла.

Помимо расчетов балльности, была проведена оценка физических параметров колебаний (амплитуд и длительностей). Эта работа проводилась по оригинальной авторской методике, основанной на представлении об очаге землетрясения как широкополосном некогерентном протяженном излучателе. Методика использует расчеты по алгоритмам, детально описанным в [Гусев, Петухин, 1995; Гусев, Шумилина, 1999]. В [Гусев, Петухин, 1995] изложен упрощенный алгоритм моделирования амплитуд и длительностей для некогерентного очага. Определенная слабость этого алгоритма – учет протяженности очага «в среднем», а не для конкретного геометрического расположения излучателя и приемника. Поэтому в дополнение к алгоритму из [Гусев, Петухин, 1995], учет эффектов протяженности очага был проведен более аккуратно на основе подхода из [Гусев, Шумилина, 1999], путем численного интегрирования мощности в приемнике по поверхности очага. Очаг описывается через эквивалентный спектр точечного источника и закон распределения светимости по площадке очага. Площадка принята прямоугольной, а светимость – постоянной по площади. Среда описывается через закон затухания амплитуд, специфичный для Камчатки. Эффекты не-скального («среднего») грунта описываются через спектральные поправки. Поправки реализуют метод линеаризации для нелинейных эффектов в грунте, они оптимальны для диапазона пиковых ускорений на скальном грунте 0,1-0,25g. Длительность колебаний оценивается на сейсмологической основе как комбинация эффектов длительности очагового процесса и эффектов роста длительности при распространении волн в земной среде.

Параметры среды и очагов принимались на основе предыдущих исследований. В частности, связи между  $M_w$  и параметрами размера очага и очаговой длительности приняты по [Гусев, Мельникова, 1990], а форма очаговых спектров Фурье взята из [Гусев, 1984]. При моделировании амплитуд ускорения для калибровки использовали среднее значение максимального ускорения на среднем грунте для наибольшей из двух горизонтальных компонент, оцененное по наблюдениями за сильными движениями на Камчатке [Гусев, Гусева и др., 1998, Gusev, Gordeev et al., 1997], и равное  $181 \text{ см/с}^2$  при  $M_w=8$  и гипоцентрального расстоянии 100 км (от центра очага). Поглощение в среде для условий Камчатки принимали по результатам работ [Абубакиров, Гусев, 1996; Гусев, Шумилина, 1999], а связь длительности с расстоянием - по [Гусев, Шумилина, 1999]. Спектральные поправки за грунт взяты из [Гусев, 1990]. Примененная методика позволяет рассчитывать оценки максимальных ускорений и скоростей грунта. Расчет смещений не выполнялся, в частности потому, что в этом случае гипотеза некогерентности источника неприемлема.

Для события AVG в расчеты была также внесена поправка за повышенную излучательную способность очагов с промежуточной глубиной очага, в виде повышающего коэффициента 2.0. Степень надежности принятого значения коэффициента пока недостаточна, и он подлежит уточнению. Но сам факт существенного влияния глубины установлен достаточно уверенно.

Приняты следующие обозначения для рассчитанных параметров:

$r$  - гипоцентрального расстояние пункта от геометрического центра площадки очага (“гипоцентра”);

$\Delta$  - эпицентрального расстояние пункта (от “эпицентра”, то есть от проекции “гипоцентра” на дневную поверхность;

$\Delta_{\text{пр}}$  - расстояние от данного пункта до ближайшей точки проекции протяженного очага на дневную поверхность;

$a_1, a_2$  - максимальное ускорение (см/сек<sup>2</sup>) колебаний (случайно выбранная компонента колебаний в горизонтальной плоскости) для грунтов категории 1 (скальный) и 2 (средний), соответственно;

$v_1, v_2$  - максимальная скорость (см/сек) колебаний (аналогично, случайная горизонтальная компонента) для грунтов категории 1 и 2;

$d$  - характерная длительность сильных колебаний (с) (смысл пояснен ниже);

$T_{a1}, T_{a2}, T_{v1}, T_{v2}$  - характерный период (с) (обратное значение средневзвешенной частоты) с индексами, смысл которых очевиден.

Приводимые цифры, хотя они и предварительные, могут быть использованы для разного рода ориентировочных расчетов. В первую очередь возможно использование данных о балльности и карт изосейст. Значения  $a_1, a_2$  можно в принципе использовать для спектральных расчетов. Однако следует самым настоятельным образом предостеречь против комбинирования этих цифр с бета-графиками из СНиП редакции 2000 г. Это можно делать только в комбинации с региональными бета-графиками, публикация которых намечается. Значения максимальных скоростей пригодны для оценок динамических деформаций грунта, действующих на подземные сооружения. Наконец, параметры характерного периода и характерной длительности сильных колебаний могут быть непосредственно использованы при синтезе упрощенных модельных акселерограмм с постоянной мгновенной среднеквадратической амплитудой (с “прямоугольной огибающей”); значение  $d$  близко к длительности  $d_{50}$  по Аптикаеву (по уровню 50% от пика) [Аптикаев, Шебалин, 1988]. Следует подчеркнуть, что значения  $T_{a1}, T_{a2}, T_{v1}, T_{v2}$  относятся к процессу с широкой полосой спектра (2-3 октавы), их недопустимо использовать для представления колебаний в виде отрезка синусоиды, функции Берлаге и т.п.

При возможном использовании расчетных результатов следует иметь в виду различную повторяемость событий разных типов, а, значит, и нагрузок от них. Если желательно иметь параметры сценарного землетрясения определенного типа с заданной повторяемостью (а не типичного, среднего события такого типа), следует учесть вероятностный закон распределения амплитуд, который можно принимать логнормальным, со значением стандартного отклонения  $\sigma \lg A$ , приведенном ниже. Пример подобного расчета приведен в [Гусев, 1990].

Охарактеризуем теперь предполагаемую изменчивость рассчитанных параметров. Параметры  $a_1, a_2, v_1, v_2$  при многократных сейсмологически однотипных землетрясениях с совпадающими очагами имеют естественный разброс порядка  $\pm 10-15\%$  от приводимых значений ( $\sigma \lg A \approx 0,07$ ). Это - чисто стохастический разброс, связанный со случайным характером временной функции-акселерограммы. Существующее разнообразие типов очагов землетрясений вносит дополнительный разброс порядка  $+ 70\% \div - 40\%$  от приводимых значений ( $\sigma \lg A \approx 0,20 - 0,25$ ). Суммарный разброс амплитуд имеет величину того же порядка ( $\sigma \lg A \approx 0,20 - 0,25$ ). Эта оценка согласуется с предполагаемым разбросом балла  $\sigma_f = 0,7$ . Именно эту величину разброса целесообразно принимать при оценке параметров сценарных событий с заданной повторяемостью. Все эти оценки не учитывают разброса свойств грунта, они вполне применимы в случаях, когда проведено надежное сейсмическое микрорайонирование. Если же грунт охарактеризован «с точностью до категории», то следует еще учесть разброс среди разных площадок с формально однотипным грунтом; он может составлять порядка  $+ 40 \div - 30\%$  ( $\sigma \lg A \approx 0,10 - 0,15$ ). Таким образом, при учете факторов очага и приемника разброс амплитуд достигает величин порядка  $+ 80\% \div - 45\%$  от приводимых значений ( $\sigma \lg A \approx 0,25 - 0,30$ ). Параметр  $d$  также имеет разброс за счет природного разнообразия типов землетрясений, порядка  $+ 70\% \div - 40\%$  от приводимых значений ( $\sigma \lg d \approx 0,20$ ). Разброс того же порядка или несколько меньший ожидается и для параметров  $T_{a1}, T_{a2}, T_{v1}, T_{v2}$ .

Приведенные значения максимального ускорения на грунте категории 2 получены путем линеаризации нелинейной зависимости в предположении величины ускорений 0,1-0,25 g на скальном основании грунтовой толщи, расположенной под пунктом-«приемником». Для более высоких

уровней ускорения на скальном основании приводимые нами оценки для среднего грунта являются завышенными; на практике они едва ли могут превысить 0,6-0,8 g.

Наибольший интерес имеют оценки балльности и максимального ускорения, так как именно они используются в расчетах спектральным методом. Поэтому надо подчеркнуть, что эти оценки получены на основе обобщения независимых групп данных: макросейсмического каталога и данных регистрации приборами сильных движений. Методикой работы никак не форсировалась их согласованность. Поэтому сопоставление оценок балла и ускорения имеет особый интерес, оно будет сделано в разделе «Обсуждение результатов».

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Землетрясение FZ9** - сильнейшее ( $M_w \approx 9$ ) землетрясение с очагом в фокальной зоне напротив Авачинской бухты (см. рис. 2, 3). Субдукционный надвиг. Очаг протягивается от м. Шипунский до о. Парамушир. На основании всех имеющихся данных о конфигурации и размерах фокальной зоны [Ежегодники..., 1967- 1997; Гусев, Шумилина, 1976; Федотов, Чернышева и др., 1987; Fedotov, Chernysheva et al., 1993], данных о размерах и механизмах очагов сильнейших землетрясений Камчатки [Ежегодники..., 1967- 1997; Гусев, Мельникова, 1990; Антикаев, Шебалин, 1988 и др.; Summery..., 1977] очаг такого землетрясения можно аппроксимировать прямоугольником, азимут длинной стороны которого совпадает с простиранием фокальной зоны у берегов Камчатки. Верхняя кромка очага размещается в районе оси глубоководного желоба на небольшой глубине, очаг наклонен в сторону материка, так что нижняя кромка погружена на глубину около 50 км под оконечностями восточных полуостровов Камчатки. Основные параметры землетрясения см. табл.2. Каталог землетрясений с 1737 г. содержит четыре подобных события на восточном побережье Камчатки: 1737 г. ( $M_w=9.2$ ), 1841 г. ( $M_w=9.0$ ), 1923 г. - февраль ( $M_w=8.8$ ) и 1952 г. ( $M_w=9.0$ ) [Кондорская, Уломов, 1995; Гусев, Шумилина, 2004]. Пробразом подобного события можно считать землетрясения 1737 и 1952 гг. с  $M_{LH} \approx 8,5$  ( $M_w \approx 9$ ), а также землетрясение 1841 г. с  $M_{LH} \approx 8,4$  ( $M_w \approx 9$ ). Землетрясения 1737 и 1841 гг. вызвали в Петропавловске-Камчатском сотрясения 8-9 баллов, при землетрясении 1952 г. интенсивность сотрясений составила 7 баллов [Новый..., 1977; Сейсмическое районирование..., 1980, Гусев, Шумилина, 2004; Кондорская, Уломов, 1995]. Ориентировочная повторяемость события типа FZ9 - 1 раз в 100-300 лет.

Карта изосейст события FZ9 изображена на рис. 4. Данные о сейсмической интенсивности и параметрах колебаний в шести пунктах см. табл. 4. Следует обратить внимание на довольно скромные параметры ускорений и очень большую длительность. Столь большая длительность, определенная как  $d_{50}$  (на уровне 50% от максимума) вполне может быть несколько завышенной, так как в расчетах не принимали во внимание вариации излучательной способности по площадке очага. Реально так определенная длительность может быть несколько меньше, но при этом непременно увеличатся ожидаемые максимальные амплитуды. Длительность колебаний с большими амплитудами в абсолютном смысле, то есть с ощущениями на 6-7 баллов и выше, может достигать 2-3 минут.

**Землетрясение FZ8** - Землетрясение с  $M_w \approx 8.4$  ( $M_{LH} \approx 8.25$ ) с очагом в фокальной зоне под континентальным склоном напротив Авачинского залива. Субдукционный надвиг. Длинная сторона прямоугольной площадки очага ориентирована по простиранию фокальной зоны. Верхняя длинная кромка очага размещается на половине расстояния от оси Курило-Камчатского глубоководного желоба до восточных полуостровов Камчатки и заглублена примерно на 20 км, очаг наклонен в сторону материка, так что нижняя кромка погружена на глубину около 50 км под оконечностями восточных полуостровов Камчатки.

Основные параметры землетрясения приведены в табл. 2. Каталог землетрясений с 1737 г. содержит по крайней мере 3 подобных события на восточном побережье Камчатки: 1792 ( $M_w=8.5$ ), 1923 апрель ( $M_w=8.2$ ), 1959 ( $M_w=8.2$ ) [Кондорская, Уломов, 1995; Гусев, Шумилина, 2004]. Пробразом данного сценарного события можно считать землетрясения 1792 г с  $M_{LH} \approx 8.4$  ( $M_w \approx 8.5$ ) и 1959 г с  $M_{LH} \approx 7.6$  ( $M_w \approx 8.2$ ). Землетрясение 1792 г. вызвало в Петропавловске-Камчатском сотрясения 8-9 баллов, при землетрясении 1959 г. интенсивность сотрясений составила 8 (7-8) баллов [Новый..., 1977; Сейсмическое районирование, 1980 Кондорская, Уломов, 1995; Гусев, Шумилина,

2004]. Ориентировочная повторяемость события типа FZ8 - 1 раз в 50-500 лет Карта изосейст события FZ8 изображена на рис. 5. Данные о сейсмической интенсивности и параметрах колебаний в шести пунктах см. табл. 5.

**Землетрясение AVS** - Землетрясение с  $M_w \approx 7.8$  ( $M_{LH} \approx 7.9$ ), очаг у тыловой (западной) границы фокальной зоны в Авачинском заливе. Крутопадающий взброс. Хотя для этого варианта очага сеймотектонически наиболее приемлем вариант с падением в сторону океана, вариант с падением в сторону материка также нельзя исключить. Этот второй вариант дает чуть более высокие амплитуды в Петропавловске, и поэтому был выбран как сценарный. Длинная сторона площадки очага снова ориентирована по простиранию фокальной зоны, падение на ЗСЗ под углом 75 градусов.

Основные параметры землетрясения см. табл.2. Каталог землетрясений с 1737 г. содержит несколько подобных событий на восточном побережье Камчатки: 1899 ( $M_w = 7.6$ ), 1911 ( $M_w = 7.7$ ), 1915 ( $M_w = 7.8$ ), 1936 ( $M_w = 7.6$ ), 1971 (Усть-Камчатское) ( $M_w = 7.7$ ) [Кондорская, Уломов, 1995; Гусев, Шумилина, 2004]. За прообразы данного сценарного события можно принять два землетрясения 1904 г. с чуть меньшей магнитудой  $M_w$ : 25 июня в 14 час с  $M_w \approx 7.5$  и в 21 час с  $M_w \approx 7.4$ . По телесеismicким данным их очаги – в Авачинском заливе. Они вызвали в Петропавловске-Камчатском сотрясения силой 8 баллов, а также цунами в Авачинской губе [Новый..., 1977, Сейсмическое районирование..., 1980; Кондорская, Уломов, 1995; Гусев, Шумилина, 2004]. Ориентировочная повторяемость события типа AVS - 1 раз в 50-200 лет.

Карта изосейст события AVS изображена на рис.6. Данные о сейсмической интенсивности и параметрах колебаний в шести пунктах см. табл.6.

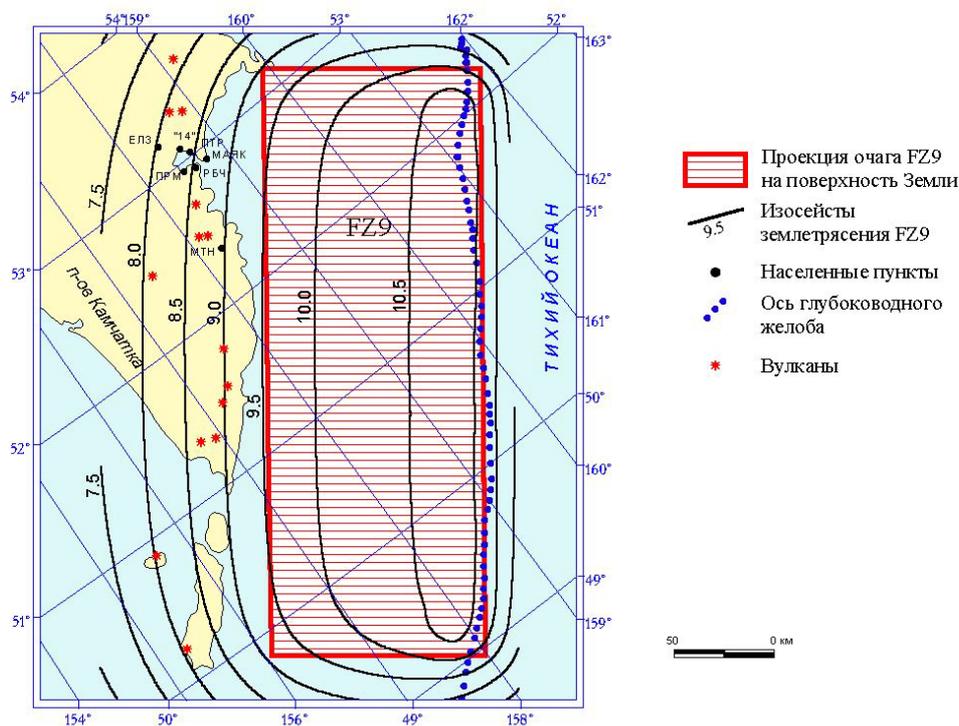


Рис.4 Карта изосейст землетрясения FZ9

Параметры колебаний при землетрясении FZ9

Пункт	$\Delta$ ( $\Delta_{\text{пр}}$ ), км	$r$ , км	$I$ , балл	Ускорение, см/с <sup>2</sup>		Скорость, см/с		Длительность $d$ , с	Период, с			
				$a_1$	$a_2$	$v_1$	$v_2$		$T_{a1}$	$T_{a2}$	$T_{v1}$	$T_{v2}$
ПТР	220 (60)	222	8.4	79	120	9,5	16,4	66	0,26	0,18	0,84	0,95
“14”	225 (70)	227	8.3	73	110	8,8	15,2	68	0,27	0,19	0,85	0,96
ЕЛЗ	240 (85)	241	8.0	60	92	7,5	13,0	65	0,25	0,18	0,80	0,92
РБЧ	205 (55)	208	8.5	89	134	10,2	17,7	66	0,26	0,18	0,84	0,95
ПРМ	220 (65)	222	8.4	81	123	9,7	16,9	70	0,28	0,19	0,88	0,99
МАЯК	210 (50)	212	8.6	94	142	10,9	19,0	64	0,26	0,18	0,81	0,93
МТН	150 (35)	152	8.9	163	235	15,8	27,4	55	0,22	0,15	0,68	0,81

Обозначения см. в тексте.

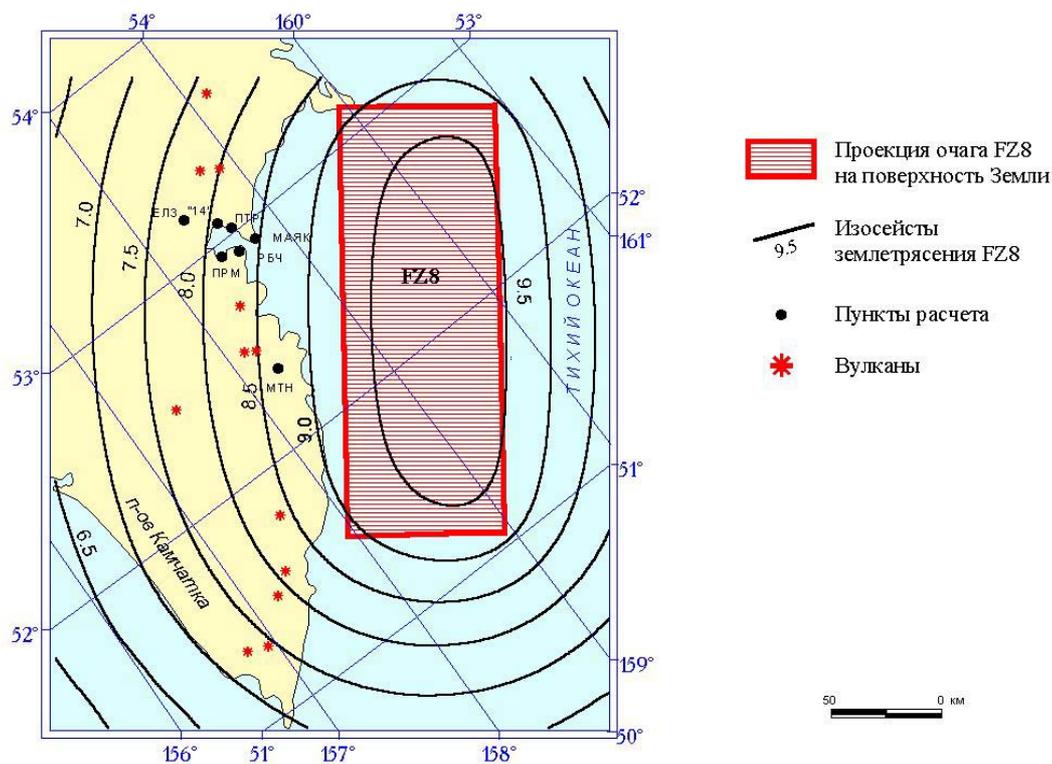


Рис.5 Карта изосейст землетрясения FZ8

Таблица 5

Параметры колебаний при землетрясении FZ8

Пункт	Расстояние, км		Интенсивность, балл	Амплитуды				Длительность d, с	Периоды, с			
	Эпи	Гипо		Ускорения см/с <sup>2</sup>		Скорости, см/с			Ta <sub>1</sub>	Ta <sub>2</sub>	Tv <sub>1</sub>	Tv <sub>2</sub>
				a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	v <sub>1</sub>	v <sub>2</sub>					
ПТР	115 (60)	116	8.2	102	141	8.7	15.0	38	0.14	0.19	0.60	0.74
"14"	120 (70)	122	8.1	91	127	7.9	13.7	39	0.14	0.20	0.61	0.75
ЕЛЗ	140 (85)	140	7.8	173	103	6.7	11.6	40	0.14	0.21	0.65	0.79
РБЧ	105 (55)	106	8.3	116	160	9.6	16.5	37	0.13	0.19	0.58	0.73
ПРМ	110 (65)	114	8.2	104	144	8.8	15.2	38	0.14	0.19	0.60	0.74
МАЯК	105 (50)	105	8.4	125	172	10.3	17.7	37	0.13	0.19	0.58	0.72
МТН	85 (35)	85	8.7	239	323	18.4	31.6	31	0.13	0.18	0.54	0.69

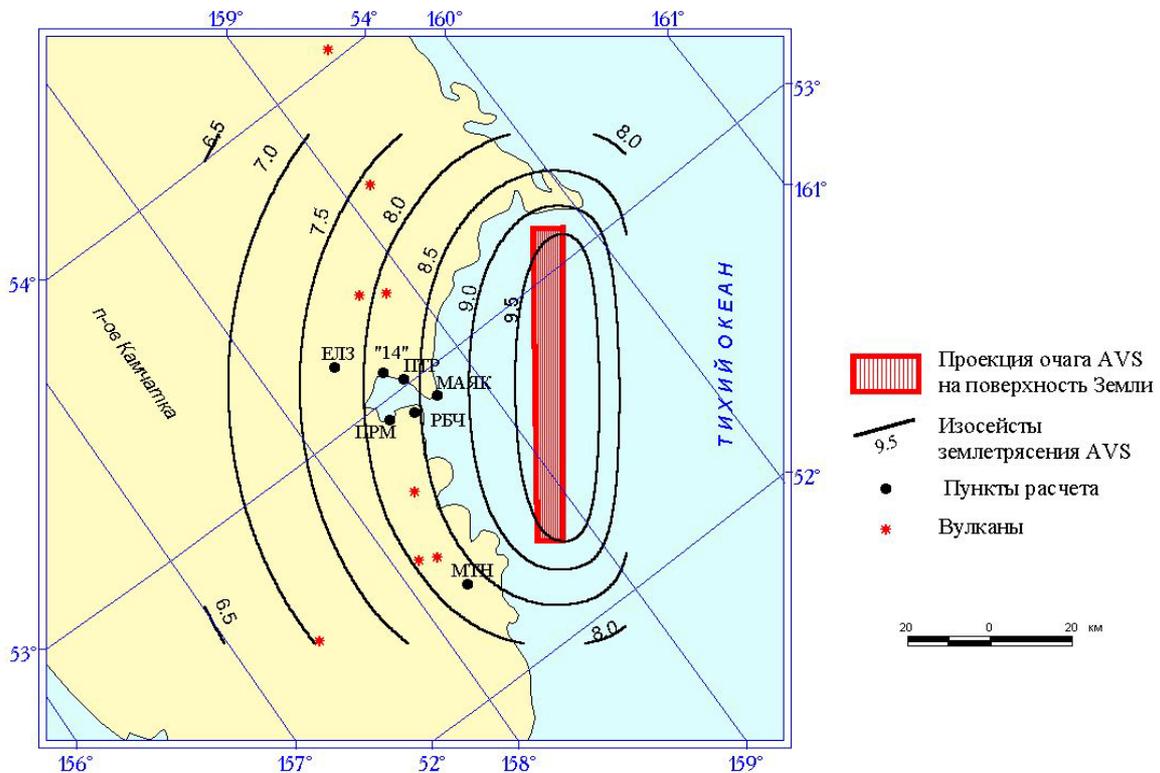


Рис.6 Карта изосейст землетрясения AVS

Параметры колебаний при землетрясении AVS

Пункт	Расстояние, км		Интенсивность, балл	Амплитуды				Длительность d, с	Периоды, с			
	Эпи	Гипо		Ускорения, см/с <sup>2</sup>		Скорости, см/с			T <sub>a1</sub>	T <sub>a2</sub>	T <sub>v1</sub>	T <sub>v2</sub>
				a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	v <sub>1</sub>	v <sub>2</sub>					
ПТР	56 (50)	62	8.3	190	251	13.2	22.6	17	0.12	0.17	0.49	0.64
“14”	63 (57)	68	8.2	163	217	11.6	19.8	17	0.12	0.17	0.50	0.65
ЕЛЗ	80 (73)	84	7.8	119	161	8.9	15.3	17	0.13	0.18	0.53	0.68
РБЧ	51 (44)	57	8.4	214	282	14.7	25.1	17	0.12	0.16	0.48	0.63
ПРМ	61 (53)	66	8.2	179	237	12.6	21.6	17	0.12	0.17	0.50	0.65
МАЯК	43 (37)	50	8.7	247	323	16.5	28.2	17	0.12	0.16	0.47	0.62
МТН	79 (30)	83	8.3	197	265	14.7	25.2	17	0.13	0.18	0.53	0.68

**Землетрясение AVG** – с очагом на промежуточной глубине ( $H=60\div 150$ км) в зоне Вадати-Заварицкого-Беньофа, имеющей характер наклонного слоя, падающего под континент под углом  $\sim 50^\circ$ . Магнитуда максимального возможного землетрясения  $M_w=7.8$  ( $M_{LH}=7.9$  условно). Очаг - прямоугольник с длинной стороной вдоль простираения зоны ВЗБ. Глубина залегания верхней кромки - на кровле наклонного слоя, падение в сторону материка - повторяет падение наклонного слоя.

Основные параметры землетрясения см. табл.2. Каталог землетрясений с 1737 г. содержит 2 подобных события: 1929 ( $M_w=7.7$ ), 1971 (Петропавловское) ( $M_w=7.7$ ) [Кондорская, Уломов, 1995; Гусев, Шумилина, 2004]. Прообразом такого сценарного события можно назвать хорошо изученное Петропавловское землетрясение 1971 г. с  $M_w=7.7$ , произошедшее на глубине 100 км чуть севернее предполагаемого по сценарию места и вызвавшее в Петропавловске-Камчатском сотрясения от 5 до 8 баллов в зависимости от грунтовых условий; средний балл по городу составил 6.5-7.0 баллов [Новый..., 1977; Сейсмическое районирование..., 1980; Кондорская, Уломов, 1995; Гусев, Шумилина, 2004; Борисова, Ершов и др., 1975]. Ориентировочная повторяемость события типа AVG - 1 раз за 300 - 3000 лет

Карта изосейст события AVG изображена на рис.7. Данные о сейсмической интенсивности и параметрах колебаний в шести пунктах см. табл.7.

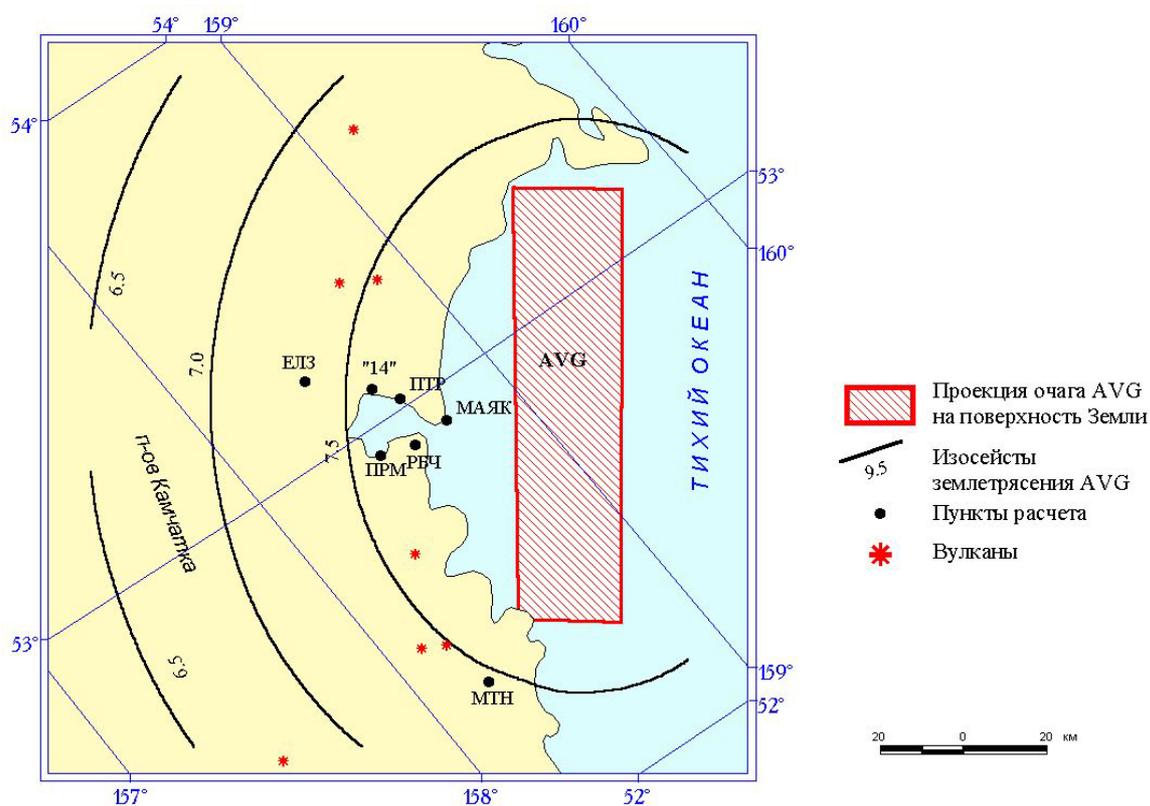


Рис.7 Карта изосейст землетрясения AVG

Таблица 7

Параметры колебаний при землетрясении AVG

Пункт	Расстояние, км		Интенсивность, балл	Амплитуды				Длительность d, с	Периоды с			
	Эпи	Гипо		Ускорения, см/с <sup>2</sup>		Скорости, см/с			T <sub>a1</sub>	T <sub>a2</sub>	T <sub>v1</sub>	T <sub>v2</sub>
				a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	v <sub>1</sub>	v <sub>2</sub>					
ПТР	48 (33)	91	7.7	116	158	8.9	15.3	17	0.13	0.18	0.54	0.69
"14"	54 (40)	94	7.6	108	147	8.4	14.3	18	0.13	0.18	0.55	0.70
ЕЛЗ	71 (57)	105	7.4	89	122	7.2	12.3	18	0.13	0.19	0.57	0.72
РБЧ	43 (27)	88	7.7	119	162	9.1	15.6	17	0.13	0.18	0.54	0.69
ПРМ	53 (37)	93	7.6	109	148	8.4	14.4	17	0.13	0.18	0.55	0.69
МАЯК	34 (20)	84	7.8	129	174	9.7	16.6	17	0.13	0.18	0.53	0.68
МТН	76 (18)	108	7.5	84	116	6.9	11.8	17	0.13	0.19	0.58	0.72

**Землетрясение РЕТ** – редкое и чрезвычайно опасное тектоническое землетрясение в непосредственной близости от Петропавловска (образно - «под ногами»), обусловлено зоной коровых камчатских землетрясений, протягивающейся по восточному побережью Камчатки и включающей Восточные хребты и восточный вулканический пояс Камчатки.

Местоположение, простирание и наклон площадки разлома-очага сегодня невозможно уверенно зафиксировать по сейсмогеологическим или иным данным. Для целей сценария было с большой долей произвола выбрано простирание очага вкост островной дуги и вдоль направления местной поперечной структуры, определяющей расположение Авачинско-Корякской группы вулканов и другие морфологические особенности территории. В том же направлении вытянулся и сам город Петропавловск. Положение центра очага выбрано как наиболее опасное для Петропавловска. Глубина очага и угол падения выбраны как типичные для коровых взбросов. Магнитуда выбрана как предельная из известных для коровых очагов суши Камчатки. Основные параметры землетрясения см. табл.2. Прообразом подобного события можно считать землетрясение 18 июня 1959 года с  $M_{LH} = 7$ , произошедшее в районе поселка Жупаново на глубине 15 км и вызвавшее в поселке и его окрестностях сотрясения в 9 баллов на среднем и 10 баллов на слабом грунте [Новый..., 1977; Сейсмическое районирование..., 1980, Кондорская, Уломов, 1995]. Ориентировочная повторяемость события типа РЕТ - 1 раз в 5-50 тыс. лет

Карта изосейст события РЕТ изображена на рис. 8. Данные о сейсмической интенсивности и параметрах колебаний в шести пунктах см. табл. 8.

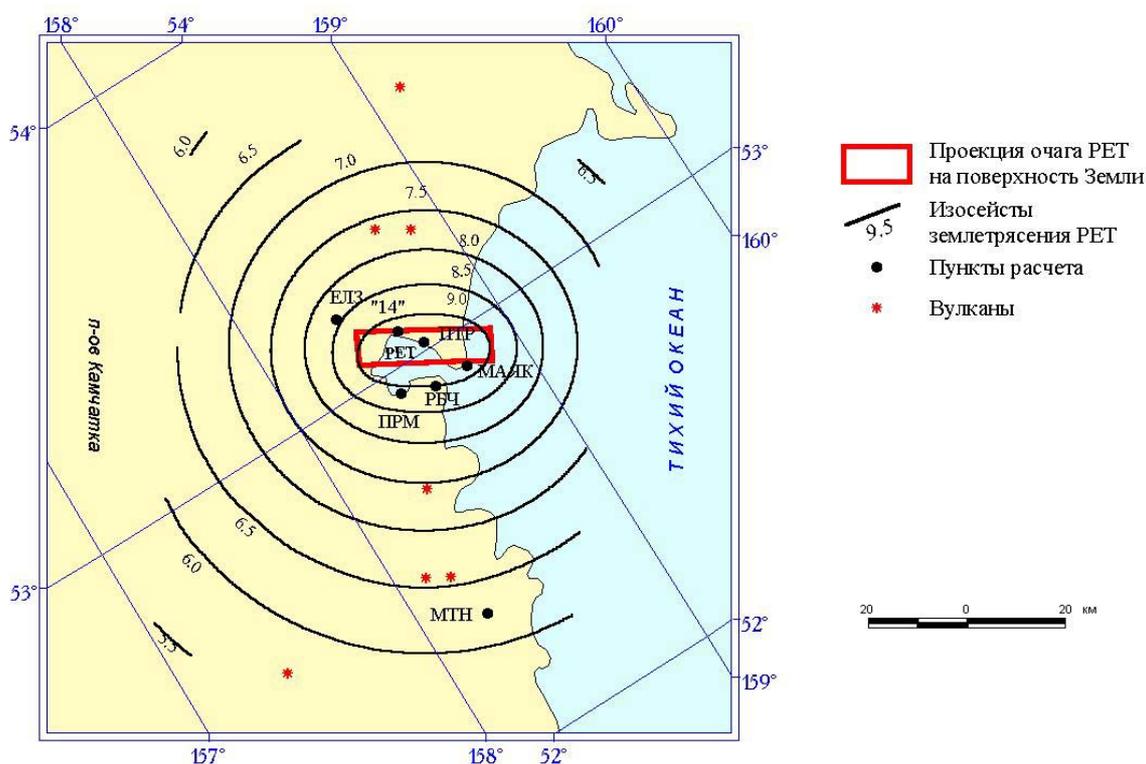


Рис.8 Карта изосейст землетрясения РЕТ

Параметры колебаний при землетрясении РЕТ

Пункт	Расстояние, км		Интенсивность, балл	Амплитуды				Длительность, с	Периоды, с			
	Эпи	Гипо		Ускорения, см/с <sup>2</sup>		Скорости, см/с			d, с	Ta <sub>1</sub>	Ta <sub>2</sub>	Tv <sub>1</sub>
				a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	v <sub>1</sub>	v <sub>2</sub>					
ПТР	2	8	9.4	841	1047	46.1	76.8	5.2	0.11	0.14	0.49	0.53
“14”	9	12	9.2	826	1031	45.8	76.5	5.2	0.11	0.14	0.50	0.54
ЕЛЗ	25	26	8.4	367	463	21.3	35.7	5.4	0.11	0.15	0.53	0.56
РБЧ	12	14	9.0	628	785	35.1	58.6	5.2	0.11	0.14	0.48	0.54
ПРМ	14	16	8.8	435	545	24.5	40.9	5.2	0.11	0.15	0.50	0.55
МАЯК	12	14	9.2	809	1011	45.2	75.4	5.2	0.11	0.14	0.47	0.54
МТН	77	77	6.2	72	94	5.0	8.4	7.4	0.12	0.17	0.53	0.64

**Землетрясение VUL** - землетрясение, связанное с вулканической деятельностью. Данное сценарное событие выбрано как гипотетическое землетрясение, сопровождающее вулканическую активность Авачинско - Корякской группы вулканов, расположенной в непосредственной близости от Петропавловска. С учетом этого выбраны: местоположение, азимут простирания, угол падения площадки разлома-очага. Значение магнитуды выбрано по аналогии с землетрясением, произошедшим в 1996 г. при извержении в Карымском вулканическом центре,  $M_{LH}=7.0$  ( $M_w=6.8$  по корреляционному соотношению  $M_w(M_{LH})$  из [Гусев, Мельникова, 1990];  $M_w=6.3$ , определение В.М. Павлова, КамОМСП ГС РАН).

Возможно, магнитуда выбрана с запасом, так как обычно магнитуда вулканических землетрясений не превышает  $M_{LH} = 6.5$  [Зобин, 1979].

Основные параметры землетрясения приведены в табл.2. Прообразом подобного события можно считать землетрясение, сопровождавшее извержение Авачинской сопки 9-10 августа 1827 г., для него принято  $M_w \geq 7.0$  [Гусев, Шумилина, 2004] и уже упомянутое землетрясение 1 января 1996 г. с  $M_{LH} = 7$  ( $M_w=6.8$ ), связанное с извержениями вулкана Карымский и в кальдере Академии наук [Федотов, 1997; Левина, Иванова и др., 2002 а,б]. Макросейсмические данные для этих землетрясений-прообразов весьма ограничены. Про событие 1827 г. известно, что «во многих избах Авачинской деревни (современное Елизово, пункт ЕЛЗ) разбились стекла и расселись бревна», что соответствует приблизительно 8-9 баллам. Землетрясение 1996 г. произошло в ненаселенной местности в зимнее время. Имеются сведения всего из 8 пунктов, в одном из них (верховья р. Карымской) на эпицентральной расстоянии 10 км отмечены сотрясения, оцениваемые приблизительно в 7 баллов. Ориентировочная повторяемость события типа VUL - 1 раз в 2-50 тыс. лет.

Карта изосейст события VUL изображена на рис.9. Данные о сейсмической интенсивности и параметрах колебаний в шести пунктах см. табл.9.

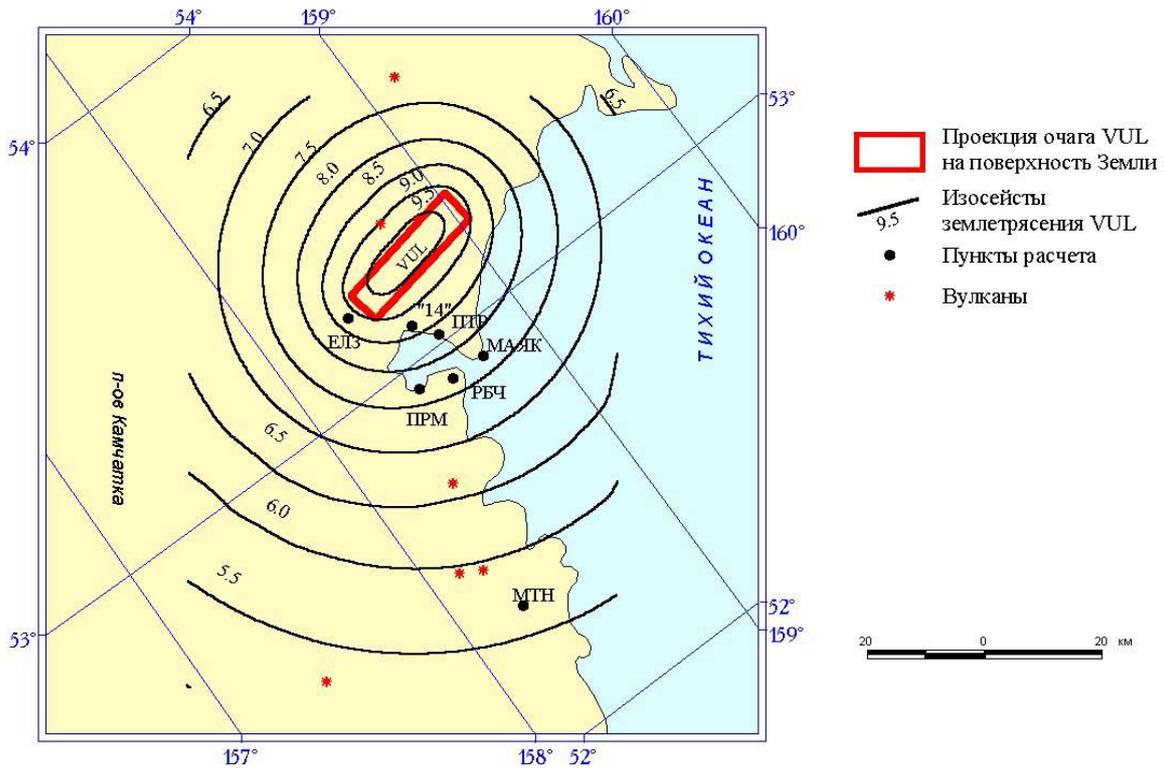


Рис.9 Карта изосейст землетрясения VUL

Таблица 9

Параметры колебаний при землетрясении VUL

Пункт	Расстояние, км		Интенсивность, балл	Амплитуды				Длительность d, с	Периоды, с			
	Эпи	Гипо		Ускорения, см/с <sup>2</sup>		Скорости, см/с			Ta <sub>1</sub>	Ta <sub>2</sub>	Tv <sub>1</sub>	Tv <sub>2</sub>
				a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	v <sub>1</sub>	v <sub>2</sub>					
ПТР	23	24	8.3	283	358	16.3	27.4	6.9	0.11	0.15	0.42	0.56
"14"	19	20	8.6	345	434	19.6	32.9	6.7	0.11	0.15	0.41	0.55
ЕЛЗ	25	27	8.6	349	442	20.4	34.1	6.6	0.11	0.15	0.43	0.56
РБЧ	37	38	7.6	174	222	10.5	17.7	7.4	0.11	0.16	0.44	0.58
ПРМ	30	38	7.7	171	219	10.3	17.4	7.4	0.11	0.16	0.44	0.58
МАЯК	30	31	7.7	186	237	11.0	18.5	7.4	0.11	0.15	0.43	0.57
МТН	100	101	5.7	50	68	3.8	6.5	8.5	0.13	0.19	0.54	0.69

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

С учетом многих неопределенностей, а также упрощенного характера предположений, заложенных в расчет, все приводимые выше численные оценки можно рассматривать только как сугубо предварительные, не более чем ориентировочные. Используемые теоретические модели неполны и далеки от совершенства. Уровень изученности землетрясений Камчатки совершенно недостаточен для уверенных прогнозов. Для получения достаточно надежных оценок будущих колебаний грунта нужны обширные дальнейшие исследования.

Тем не менее отметим некоторые свойства результатов. Любопытен тот факт, что землетрясения с наибольшей повторяемостью – FZ9, FZ8 и AVS – дают весьма близкий балл в Петропавловске, (около 8.3), несмотря на большое различие в магнитуде и расстоянии до центра очага. Причина в том, что при аккуратном учете эффектов протяженности очага уровень балльности вблизи очага мало зависит от магнитуды. Эта тенденция - хорошо известная макросейсмическая закономерность, которая успешно воспроизведена использованной в расчетах теоретической моделью. Любопытно узнать, какой уровень балльности здесь следует ожидать при типичном для инженерных расчетов периоде повторяемости 500 лет, если исходить из примитивного предположения, что вариациями положения очагов классов FZ9, FZ8, AVS и AVG, а также вкладом очагов «редких» классов PET и VUL можно пренебречь. Период повторяемости для суммарного потока сотрясений от событий типов FZ9, FZ8, AVS и AVG по приведенным выше оценкам получается около 50 лет (25 – 100 лет), в согласии более ранней оценкой (60 лет) для мелкофокусных событий из зон ВОЗ1 и ВОЗ2 по [Гусев, 1990]. По обычной логике вероятностного расчета (см.[Гусев, 1990]) из принятой выше оценки  $\sigma_T=0.7$  балла и периода повторяемости 50 лет для  $I = 8.3$ , следует, что период повторяемости 500 лет в Петропавловске имеют сотрясения, равные или превышающие 9.2 балла. Это вполне согласуется с оценкой расчетной балльности по карте ОСР-97-А, равной 9 баллам. При редких землетрясениях типа PET балл в Петропавловске приближается к 9.5, что не следует считать слишком большой величиной для события с периодом повторения 5-50 тыс. лет.

Перечислим кратко главные источники погрешностей в наших оценках, и тем самым наметим пути их уточнения. Мы здесь имеем в виду возможные систематические ошибки, а не обсуждавшийся выше неизбежный разброс оценок за счет эффектов стохастичности сигнала, разнообразия свойств очагов при заданных гипоцентре и магнитуде, и разнообразия реальных грунтовых условий в пределах одной и той же «категории СНИП». Источники возможных систематических ошибок связаны с очагом, трассой и условиями в приемнике.

Что касается свойств очага, то здесь главная проблема переупрощенная, слишком примитивная модель источника с постоянной мощностью по поверхности (постоянной светимостью). Необходимо учесть структуру источника (субочаги, всплески излучения и т.п.). Кроме того, определенно-го улучшения использованной модели можно было бы достичь при учете диаграммы направленности излучения поперечных волн от точечного источника. В расчетах длительности не были проанализированы эффекты направленности излучения за счет одностороннего испарывания разрыва. Наконец, оценки формы и уровня очагового спектра опираются на малый объем данных и подлежат уточнению.

Существенный элемент неточности в наших расчетах связан с неучетом трехмерной структуры поля затухания сейсмической энергии. Хорошо известно, что на Камчатке затухание на лучах поперек структур намного выше, чем вдоль побережья; в то время как в наших расчетах принималась простейшая модель с единым затуханием для всех направлений.

Еще один, почти неисследованный источник погрешностей для случаев нескального грунта – это нелинейность поведения грунтовых толщ под пунктом приема при больших амплитудах колебаний.

Надо иметь также в виду, что для ряда факторов прогноз безнадежен, и можно лишь принять во внимание набор вариантов (вспарывание разрыва от наблюдателя или к наблюдателю, обычная и повышенная величина сброшенного напряжения, и т.п.). При этом попытка действовать систематически в этом направлении скорее всего привела бы к неприемлемому размножению вариантов сценария. Так что даже изученные факторы могут оказаться полезнее - не моделировать явно, а включать эффект от их вариаций в ожидаемый разброс оценок.

Следует также предостеречь читателя публикации от прямого сопоставления значений балла и максимального ускорения. Взгляд на табл. 4 и 5 производит впечатление, что значения балла и ускорения не согласуются: либо баллы завышены, либо ускорения занижены. Рассмотрение же табл. 8 и 9 производит впечатление аналогичной несогласованности, но противоположного знака. Обсудим причины кажущихся противоречий. Начнем с кажущегося занижения ускорений в табл. 4 и 5. Причина такого впечатления состоит в том, что опубликованные корреляции балл-ускорение опираются в основном на записи толчков с магнитудами не выше 7, и их нельзя использовать для прямого сопоставления с нашими результатами для колебаний большой длительности. В этом случае следует принять во внимание длительность воздействия, что позволяет учесть факт

следует принять во внимание длительность воздействия, что позволяет учесть факт нарастания степени повреждения реальных зданий и сооружений (а с нею и балла) с ростом продолжительности колебаний при неизменном уровне амплитуды. Если использовать для этой цели подход *Антикаева и Шебалина [1988]*, то можно выполнить «приведение» значений максимального ускорения к фиксированной длительности  $d_{\text{баз}} \approx d_{50} = 5$  с. Для этого используется формула  $a_{\text{прив}} = a(d/d_{\text{баз}})^{0.5}$ . Теперь, обобщенно, значению балла 8.5 в табл. 4 и 5 примерно соответствует приведенное значение максимального ускорения  $a_{2\text{прив}} = 420-500$  см/с<sup>2</sup>. В результате соотношение балла и ускорения в табл. 4-9 выравнивается, и во всех таблицах видна единая картина. А именно, если после приведения перейти от баллов табл. 4-9 к ускорениям по принятому в действующих СНИП соотношению  $a = 0,1 \cdot 2^{I-7}$ , то получатся величины ускорений в 1,5-2,5 раза ниже, чем полученные нами оценочные значения ускорения (или для табл. 4 и 5 – приведенного ускорения) в тех же таблицах. Причина данного расхождения - в несоответствии между связью  $a(I)$  по действующему СНИП и сейсмологической реальностью. Эта тема детально обсуждалась в [*Гусев, 2002*]. Там рассмотрены как литературные данные, так и материалы наблюдений на Камчатке, и сделан вывод о примерно двукратной (в среднем) недооценке реального максимального ускорения, если определять его из балла по формуле  $a = 0,1 \cdot 2^{I-7}$  из СНИП. Таким образом, и второе противоречие объясняется. Следует только отметить, что в [*Гусев, 2002*] не делалось аккуратного различия между фактическим и приведенным ускорением. В контексте той работы это было допустимо, так как и литературные данные, и наблюдения на Камчатке относились к землетрясениям с магнитудами не выше 7-7.5, когда влияние длительности не слишком резкое. Здесь же учет данного различия необходим.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Первую попытку создать набор сценарных землетрясений для Петропавловска-Камчатского и окрестностей следует считать удачной. Отработан первый вариант методики параллельного расчета балльности, максимальных амплитуд и скоростей, длительностей и характерных периодов одновременно для набора пунктов. Применение теоретически обоснованной схемы моделирования позволило успешно решить проблему прогноза параметров колебаний на малом расстоянии от разломов-очагов высоких (вплоть до  $M_w = 9$ ) магнитуд. Обнаружено, что параллельный прогноз балла и амплитуд колебаний на основе независимых групп наблюдений не ведет к существенным противоречиям. Получены характеристики двух разнотипных экстремальных событий – типичного субдукционного землетрясения с  $M_w = 9$  на удалении 60-80 км (от города до края площадки очага), с большой длительностью колебаний и умеренными амплитудами; и редкого корового землетрясения с  $M_w = 6.8$  с очагом непосредственно под городом. Отмечены наиболее важные пути повышения надежности оценок.

## ЛИТЕРАТУРА

*Абубакиров И.Р., Гусев А.А.* Исследование вертикального профиля мутности литосферы путем инверсии данных об уширении импульса объемных волн // *Вулканология и сейсмология*. 1996. № 4. С.81-90.

*Антикаев Ф.Ф., Шебалин Н.В.* Уточнение корреляций между уровнем макросейсмического эффекта и динамическими параметрами движения грунта // *Исследования по сейсмической опасности*. (Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 29). М.: Наука, 1988. С.98-107.

*Борисова Н.С., Еришов И.А., Константинова Т.Г., Федякова С.Н., Шумилина Л.С.* Макросейсмическое обследование землетрясения 24(25) ноября 1971 года в Петропавловске-Камчатском и сопоставление с сейсмическим микрорайонированием // *Колебания грунтов и зданий при землетрясениях*. (Вопросы инженерной сейсмологии, вып. 17). М.: Наука, 1975. С.71-86.

*Гусев А.А.* Описательная статистическая модель излучения очага землетрясения и ее применение к оценке сильного движения // *Вулканология и сейсмология*. 1984. № 1. С.3-22.

*Гусев А.А.* Предварительный вариант расчетных сейсмических нагрузок для Петропавловска-Камчатского // *Источники и воздействие разрушительных сейсмических колебаний* (Вопросы инженерной сейсмологии, вып.31) М.: Наука, 1990. С.67-84.

*Гусев А.А.* О сейсмологической основе норм сейсмостойкого строительства в России//Физика Земли. 2002. № 12.С.56-70.

*Гусев А.А., Петухин А.Г.* Расчетная схема для прогнозирования параметров колебаний грунта при землетрясениях// Вулканология и сейсмология. 1995. № 4-5. С.182-192.

*Гусев А.А., Шумилина Л.С.* Геометрия сейсмоактивного блока коры и мантии в районе Камчатки и Командорских островов // Сб. «Исследования по физике землетрясений». М.: Наука, 1976. С. 174-200.

*Гусев А.А., Мельникова В.Н.* Связи между магнитудами - среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1990. № 6. С.55-63.

*Гусев А.А., Гусева Е.М., Петухин А.Г., Гордеев Е.И. и Чебров В.Н.* Максимальные ускорения грунта по данным приборов сильных движений на Камчатке// Физика Земли. 1998. № 4. С.20-27.

*Гусев А.А., Шумилина Л.С.* Моделирование связи балл - магнитуда- расстояние на основе представления о некогерентном протяженном очаге // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4-5. С.29-40.

*Гусев А.А., Шумилина Л.С.* Повторяемость сильных землетрясений Камчатки в шкале моментных магнитуд // Физика Земли. 2004. № 2. С.1-9.

*Зобин В.М.* Динамика очага вулканических землетрясений. М.: Наука, 1979. 92 с.

Ежегодники «Землетрясения в СССР» за 1964-1991годы. М.: Наука, 1967- 1997.

*Кондорская Н.В., Уломов В.И.* (отв. ред.). Специализированный каталог землетрясений Северной Евразии с древнейших времен по 1990 г. ОИФЗ РАН, 1995.

URL: <http://socrates/wdcb.ru/>.

*Левина В.И., Иванова Е.И., Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Шевченко Ю.В.* Камчатка и Командорские острова// В сб. Землетрясения Северной Евразии в 1996 году. М.: ГС РАН, 2002, а. С.119-128.

*Левина В.И., Иванова Е.И., Гордеев Е.И., Гусев А.А., Левин В.Е., Магуськин М.И., Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В.* Карымское землетрясение 1 января 1996 года (MS=7.0)// В сб. Землетрясения Северной Евразии в 1996 году. М.: ГС РАН, 2002, б. С.129-137.

Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М.: Наука, 1977. 535с.

Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. 476 с.

Сейсмическое районирование территории СССР. Методические основы и региональное описание карты 1978 г. М.: Наука, 1980. 307 с.

Сейсмическое районирование территории Российской Федерации – ОСР-97. Карта на 4-х листах, М: 1 8000000/ Гл. ред. В.Н. Страхов, В.И. Уломов. М.: ОИФЗ РАН; Роскартография; НПП «Текарт», 2000.

СНиП II-7-81\*. Строительство в сейсмических районах/ Госстрой России. М.: ГУП ЦПП, 2000. 44 с. + прил. 2: 10 карт.

*Страхов В.Н., Уломов В.И., Шумилина Л.С.* Общее сейсмическое районирование территории России и сопредельных стран// Физика Земли, 1998, № 10. С.92-96.

*Уломов В.И., Шумилина Л.С.* Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1:8000000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ, 1999. 57 с.

*Федотов С.А.* Об извержении в кальдере Академии Наук и Карымского вулкана на Камчатке в 1996 г., их изучении и механизме//Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С.3-37.

*Федотов С.А., Чернышева Г.В., Шумилина Л.С.* Сейсмичность Камчатки и Командорских островов // Вулканология и сейсмология. 1987. № 6. С.29-60.

*Abubakirov I.R. and Gusev A.A.* Estimation of scattering properties of lithosphere of Kamchatka based on Monte-Carlo simulation of record envelope of a near earthquake.//Phys.Earth Planet. Interiors. 1990. V.64. P.52-67.

*Gusev A.A., Gordeev I., Guseva E.M., Petukhin A.G. and Chebrov V.N.* The First Version of the  $A_{max}(M_w, R)$  Relationship for Kamchatka// PAGEOPH. 1997. V.149. № 1. P. 299-312.

*Gutenberg B., Richter C.* Seismicity of Earth and associated phenomena. Princeton Univ.Press, 1954.

*Bazzurro and Cornell, 1999.* Disaggregation of Seismic Hazard, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 89, pp 501-520.

*Fedotov S.A., Chernysheva G.V., Shumilina L.S. Seismicity of Kamchatka and Commander islands based on detailed observations during 1962-1990.// J.of Earthquake Prediction Research. 1993. № 1, V.2, p.49-69.*

Summary of earthquake focal mechanisms for the western Pacific-Indonesian region, 1929-1973. Published by Word Data Center A for Solid Earth Geophysics. March, 1977.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Гусев Александр Александрович** - доктор физико-математических наук Окончил физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова в 1967 г. Главный научный сотрудник Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (Петропавловск-Камчатский). Основные научные интересы: физика очага землетрясения, разрушительные колебания грунта и сейсмическая опасность, рассеянные сейсмические волны. Опубликовано 71 научная статья.

Электронный адрес: [gusev@emsd.iks.ru](mailto:gusev@emsd.iks.ru)  
тел. 415-22-59510; факс 415-22-59130

**Шумилина Лидия Сократовна** - кандидат физико-математических наук. Окончила геолого-разведочный факультет МИНХиГП им. акад И.М.Губкина в 1959 г. Ведущий научный сотрудник Института физики Земли РАН. Основные научные интересы: сейсмичность, сейсмическая опасность. Опубликовано 65 научных статей.

Электронный адрес: [shu@ifz.ru](mailto:shu@ifz.ru)  
тел. (095) 254-23-40

**Акатова Ксения Николаевна** - окончила геологоразведочный факультет МИНХиГП им. акад И.М.Губкина в 1959 г. Старший научный сотрудник Института физики Земли РАН. Много лет проработала в нефтяной сейсморазведке. Автор большого количества отчетов по тематике нефтяной сейсморазведки.

Круг научных интересов в настоящее время - сейсмичность, сейсмическая опасность и картографическое представление и анализ результатов сейсмологических исследований с помощью геоинформационных систем..

Электронный адрес: [akatova@ifz.ru](mailto:akatova@ifz.ru)  
тел. (095) 254-23-40