

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ СЕЙСМОЛОГИЯ

ВЕРОЯТНОСТНО-ДЕТЕРМИНИРОВАННАЯ ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОСНОВЕ КАРТ ОСР-97 И СЦЕНАРНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

*Уломов В.И., д-р физ.-мат. наук, проф. геофизики, член-корр. АН Республики Узбекистан
(Институт физики Земли им.О.Ю.Шмидта РАН)*

ВВЕДЕНИЕ

Вероятностные методы оценки сейсмической опасности получили широкое распространение в сейсмологической и инженерной практике большинства стран мира, расположенных в сейсмоопасных регионах. К ним относятся и Российская Федерация, где в 1991-1997 гг. нами выполнены специальные исследования по общему сейсмическому районированию территории страны и сопредельных регионов и создан комплект вероятностных карт - ОСР-97 [1-3].

Комплект ОСР-97 состоит из трех карт - ОСР-97А, ОСР-97В и ОСР-97С, характеризующих разный уровень вероятности превышения сейсмической интенсивности, указанной в баллах шкалы MSK-64 на каждой из карт. Так, карта А соответствует 10%-ной, карта В - 5%-ной и карта С - 1%-ной вероятности возможного превышения (или, соответственно, 90%, 95% и 99% непревышения) в течение 50-лет расчетной сейсмической интенсивности, что соответствует повторяемости сейсмического эффекта на земной поверхности в среднем один раз в 500, 1000 и 5000 лет.

Важно также отметить, что решение составлять карты ОСР-97 в баллах, а не в ускорениях колебаний грунта, как это стало практиковаться во многих странах мира, было принято нами по целому ряду соображений как технического, так и методологического характера. Одним из доводов необходимости принятия такого решения явились противоречия мнений сейсмологов и большой разброс корреляционных соотношений между величинами балльности и ускорений. В то время как величины ускорений, скоростей и других численных показателей сейсмических воздействий продолжают изменяться (чаще всего, расти) от года к году и от автора к автору, оценка сейсмической интенсивности, измеряемая в баллах, будучи интегральной (т.е. включающей в себя и эффекты ускорений, скоростей, смещений, длительности колебаний и других показателей), продолжает оставаться наиболее стабильной. Об этом можно судить и по современной Европейской макросейсмической шкале EMS-98, в которой вообще отсутствуют указания на какие-либо соотношения между бал-

льностью и ускорениями, а последние даже причислены к категории иллюзорных.

Вместе с тем, многие отечественные проектировщики и строители и сегодня продолжают требовать от сейсмологов представления сейсмических воздействий в строгих количественных параметрах, в том числе в виде акселерограмм, спектров и других характеристик сейсмического эффекта. На практике такие оценки обычно делаются на основе расчета акселерограмм от сценарных очагов землетрясений и, как правило, являются детерминистскими, поскольку не учитывают особенностей сейсмического режима (повторяемости землетрясений) в рассматриваемом регионе.

Ниже, на примере г.Сочи, иллюстрируется один из возможных подходов к преобразованию детерминированных оценок сейсмических воздействий в вероятностные, соответствующие требованиям Строительных норм и правил (СНиП II-7-81*) "Строительство в сейсмических районах" и картам ОСР-97.

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

В преобладающем большинстве стран мира при оценке сейсмической опасности пользуются лишь одной картой, характеризующейся 500-летним периодом повторяемости максимального сейсмического эффекта (т.е. соответствующей нашей карте А). С таким же "приемлемым риском" составлена и мировая карта глобальной сейсмической опасности, опубликованная в 1999 г. под эгидой ООН в США [4].

Применение комплекта карт, по мнению автора, является более прогрессивным, по сравнению с использованием только одной карты, поскольку с увеличением расчетного периода повторяемости сейсмического эффекта не только возрастает сейсмическая интенсивность, но и определенным образом изменяется конфигурация границ между зонами балльности, что обусловлено "включением" сейсмогенерирующих структур с большим периодом повторяемости землетрясений и что совершенно не учитыва-

лось прежде, в том числе, и картой ОСР-78 территории бывшего СССР. Благодаря комплекту карт ОСР-97, стало возможным более реалистично оценивать сейсмическую опасность при проектировании и строительстве объектов разных категорий ответственности и сроков службы.

Карты общего сейсмического районирования - ОСР-97, хотя и составлялись на основе расчета степени сейсмической опасности, выраженной в непрерывно изменяющихся по площади численных значениях баллов, традиционно иллюстрируют лишь целочисленную величину сейсмической интенсивности. Нетрудно показать, что процедура такого "округления" влечет за собой погрешности, нередко превышающие ± 0.5 балла. Однако ни сейсмологи, ни проектировщики и строители, пока не решаются привлекать для работы доли (или хотя бы "половинки") баллов. Исключение составляют, пожалуй, исполнители работ по сейсмическому микро-районированию (СМР), когда целесообразнее оперировать долями балла, учитывая такие же дробные "приращения" балльности.

Вместе с тем, почему-то никого не смущает использование величин ускорений, скоростей и других физических показателей интенсивности колебаний грунта с точностью, соответствующей десятым и даже сотым долям балла. Это относится и к карте глобальной сейсмической опасности, для которой в большинстве стран в основном осуществлялся пересчет баллов в ускорения [4]. При ее создании для сегмента Северной Евразии, охватывающего территорию

Российской Федерации, всех стран СНГ и сопредельных сейсмоактивных регионов, была использована карта ОСР-97А, пересчитанная нами в ускорения колебаний грунта по наиболее приемлемой, на наш взгляд, корреляционной формуле SHA-97, которая будет приведена ниже.

Напомним о технологии построения вероятностных карт ОСР-97. В их основу было положено создание двух взаимосвязанных моделей - модели сейсмических источников и модели сейсмического эффекта, создаваемого ими. Каждой из моделей свойственны вероятностные параметры, обусловленные как степенью заложенных в них неопределенностей, так и стохастическим характером самих сейсмических процессов. На рис.1 изображена разработанная автором линеamentно-доменно-фокальная (ЛДФ) модель источников землетрясений, в которой рассматриваются четыре масштабных уровня зон возникновения очагов землетрясений (зон ВОЗ) - крупный генетически единый регион, характеризующийся конкретным долговременным средним сейсмическим режимом, и три его основных структурных элемента: *линеamentы*, в генерализованном виде представляющие оси трехмерных сейсмоактивных разломных или сдвиговых структур и отражающие структурированную сейсмичность; *домены*, охватывающие квазиоднородные в тектоническом и геодинамическом отношении объемы геологической среды и характеризующиеся рассеянной (вернее, не поддающейся на данном масштабном уровне

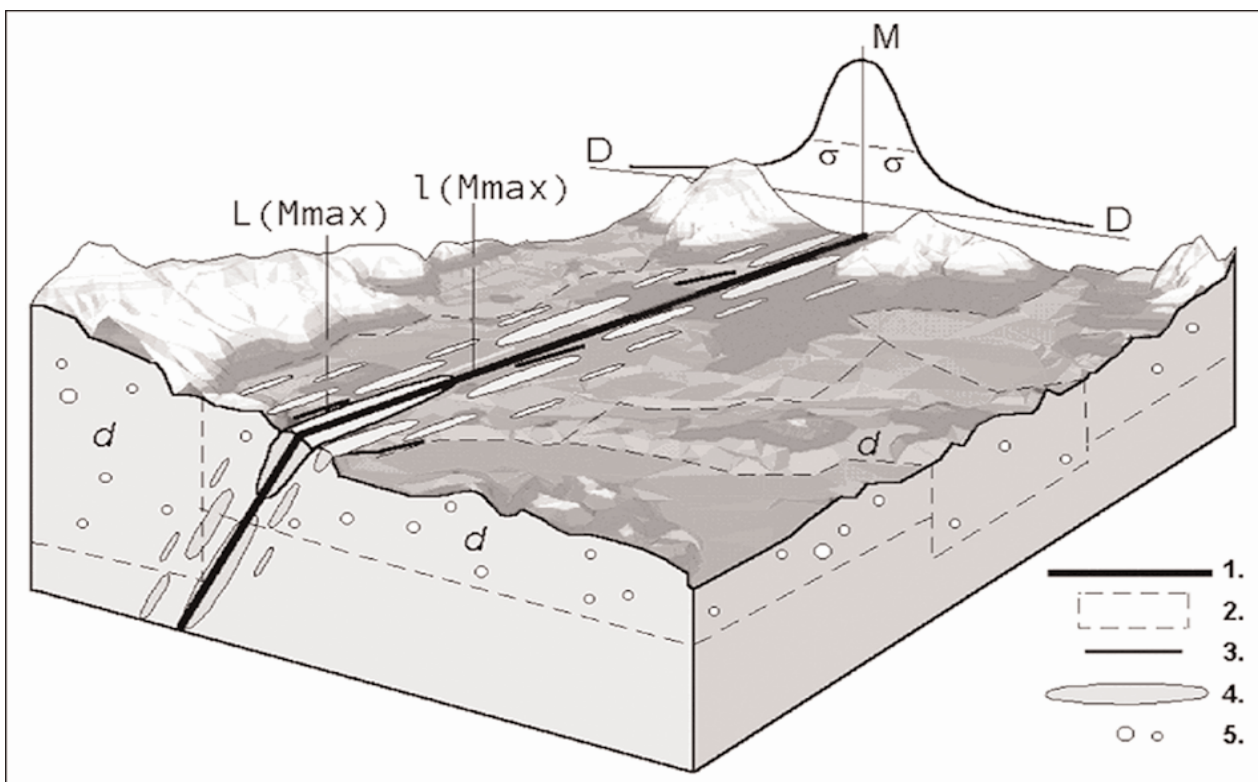


Рис.1. Иллюстрация ЛДФ-модели зон ВОЗ:

- 1 – следы осевых плоскостей линеamentных структур $L(M_{\max})$, генерирующих землетрясения с максимальной возможной магнитудой $M_{\max}=6.0$ и более;
- 2 – контуры объемных доменов d , генерирующих землетрясения с $M_{\max}=5.5$ и менее;
- 3 – активные разломы, фрагментарно отражающие простираение линеamentов;
- 4 – очаги землетрясений протяженностью $L(M_{\max})$ с $M=7.0$ и более, отклоняющиеся от осей линеamentов на величину D , обратно пропорциональную магнитуде M землетрясений (см. график на заднем плане рисунка; σ - стандартное отклонение);
- 5 – очаги землетрясений с $M=5.5$ и менее, рассеиваемые случайным образом в доменах.

структурному дешифрированию) сейсмичностью; *потенциальные очаги (фокусы)* землетрясений, указывающие на наиболее опасные участки линейментных структур.

Линеаменты, домены и потенциальные очаги, как и землетрясения, классифицируются по величине максимальной магнитуды ($M_{\max}$) сейсмических событий, возможных в их пределах. (Здесь и далее магнитуда M соответствует магнитуде M_s , определенной по поверхностным сейсмическим волнам). Верхний уровень магнитуд ($M_{\max}$) определяется реальной сейсмогеодинамической обстановкой, а нижний ($M_{\min}$) – минимальной сейсмической опасностью, учет которой необходим для строительных объектов. В наших исследованиях принято $M_{\min}=4.0$, а минимальная сейсмическая интенсивность, изображенная на картах ОСР-97, соответствует $I_{\min}=5$ баллов, которые допускаются в любом пункте рассматриваемой территории.

В соответствии с моделью зон ВОЗ, выполненной в масштабе 1:2 500 000, землетрясения с магнитудой $M=6.0$ и выше "принадлежат" линейментным структурам, а с $M \leq 5.5$ – "рассеиваются" в доменах. В случае же применения более крупного масштаба исследований и повышения детальности построений, например, при уточнении сейсмической опасности (УСО) методами детального сейсмического районирования (ДСР) и микрорайонирования (СМР), могут быть выявлены и более мелкие структуры, а нижний порог используемых для расчетов магнитуд землетрясений в линейментах может быть понижен.

Расчетная сейсмическая интенсивность I_t , выраженная в баллах шкалы MSK-64 и ожидаемая на заданной площадке с повторяемостью в среднем один раз за T лет, определялась как вероятность P возможного превышения величины I_t в течение t лет и вычислялась по формуле:

$$P = 1 - \exp(-t/T). \quad (1)$$

Так, при $T=500$ лет и $t=50$ лет величина P составляет $\approx 10\%$ (точное значение – 9.52), при $T=1000$ лет и $t=50$ лет $P \approx 5\%$ (точное значение – 4.88) и т.д.

Благодаря соответствующей сейсмологической параметризации ЛДФ-модели зон ВОЗ и "проигрыванию" ее с помощью компьютера и специального программно-математического обеспечения, стало возможным создавать синтетические карты сейсмичности на любой разумный интервал времени и изучать сейсмический эффект, создаваемый виртуальными очагами на земной поверхности. На основе такой технологии, с учетом затухания сейсмического эффекта с удалением от источников землетрясений, нами были выполнены расчеты и построены карты для различных периодов повторяемости сейсмических воздействий – 100, 500, 1000, 2500, 5000 и 10000 лет.

Рис.2 иллюстрирует технологию построения модели зон ВОЗ и районирования сейсмической опасности на примере Кавказа и сопредельной территории. На основе данных о региональной сейсмичности (карта 1), а также сведений об активных разломах, гравитационных изостатических аномалиях, их градиентов, максимумов этих градиентов и других геолого-геофизических данных, создана ЛДФ-модель зон возникновения очагов землетрясений (2), представленная в виде трех основных структурных элемен-

тов – линейментов, доменов и потенциальных очагов землетрясений разных магнитуд. На основе сейсмологической и сейсмогеодинамической параметризации каждого из основных структурных элементов ЛДФ-модели, на заданный интервал времени разыгрываются генерируемые ими синтетические очаги землетрясений, изображенные на карте (3) в виде прямоугольников, размеры и ориентация которых соответствует сейсмическому потенциалу (магнитуде) и пространственному положению соответствующих линейментов.

Одновременно вся исследуемая территория покрывается (программно, с помощью компьютера) прямоугольной сеткой размером 25 км на 25 км, фрагмент которой показан на карте (3). (В принципе шаг сетки может быть любым, в зависимости от желаемой точности построений.) Каждый узел сетки "опрашивает" все возникающие виртуальные очаги и накапливает информацию о нормированном на год количестве N сейсмических сотрясений в виде гистограмм (график на рис.2), выраженных в сейсмической интенсивности I (доли баллов) или в пиковых ускорениях PGA (cm/c^2) сейсмических колебаний грунта. При этом учитываются размеры и ориентация плоскостей виртуальных очагов землетрясений, обусловленные соответствующими сейсмическими источниками.

Далее, задаваясь фиксированными интервалами времени (в случае ОСР-97 это – 500, 1000 и 5000 лет), строятся карты сейсмической интенсивности с вероятностями $P=10\%$ (4, на рис. 3), $P=5\%$ (5) и $P=1\%$ (6) возможного превышения указанных на них номиналов в течение 50 лет. И, наоборот, фиксируя величину сейсмической интенсивности, создаются карты периодов T повторяемости заданного сейсмического эффекта. Такие карты размещены в настенном варианте ОСР-97, опубликованном в 2000 г. [3]. Их также можно увидеть на домашней странице автора <http://seismos-u.izf.ru/shake.htm> в Интернете. Карты ОСР-97 опубликованы в первом томе Большой Российской энциклопедии [5] и в Атласе природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации, созданном МЧС России [6-7].

Исследования по ОСР-97 указали на более высокую сейсмическую опасность территории Российской Федерации, чем это представлялось прежде, что явилось основанием для принятия Правительством Российской Федерации Федеральной целевой программы "Сейсмобезопасность территории России" (2002-2010 годы). Отсутствие в прежние годы в нашей стране подобных общегосударственных программ привело к тому, что почти половина населения сейсмоопасных территорий проживает в домах со значительным дефицитом сейсмостойкости.

На основе базы данных ОСР-97 для района исследований нами выполнен вероятностный анализ сейсмической опасности (ВАСО) в параметрах сейсмической интенсивности – в баллах шкалы MSK-64, а также в пиковых ускорениях колебаний грунта второй ВАСО, для периодов повторяемости сейсмического эффекта в среднем один раз в 100, 250, 500, 1000, 2500 и 5000 лет (рис.3 и 4, табл.1).

При этом в терминах пиковых ускорений ВАСО выполнен как по зависимости между баллами и ускорениями, со-

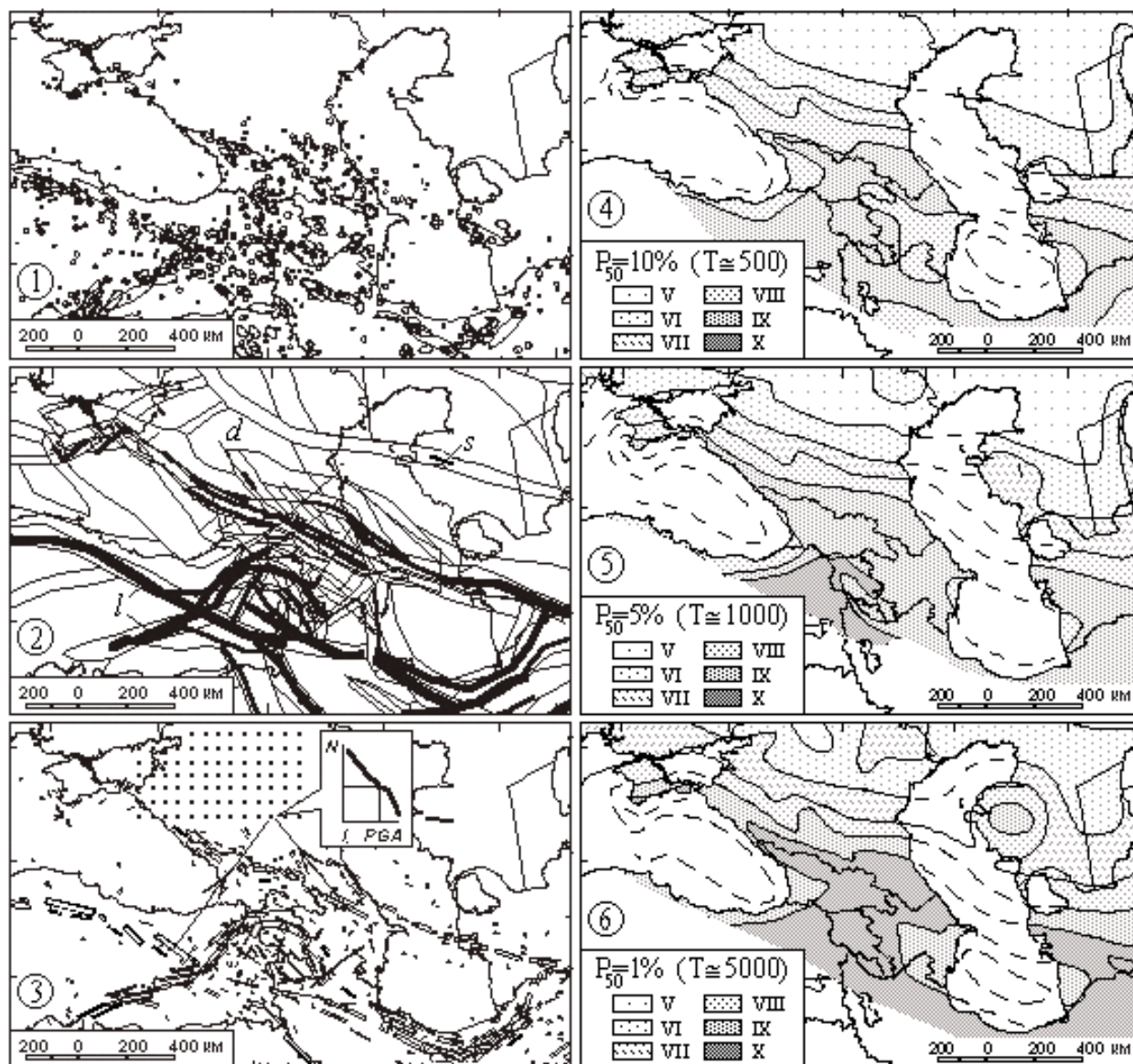


Рис.2. Иллюстрация создания ЛДФ-модели источников землетрясений и фрагмента карт сейсмического районирования Кавказа и сопредельной территории

ответствующей MSK-64, так и по формуле SHA-97. Эти две зависимости (1 и 2), уравнения которых приведены на рис.4, как бы являются пределами изменений величины пиковых ускорений при соответствующих периодах их повторяемости в средних грунтовых условиях конкретного пункта, для которого составлены графики. Нижний предел, обусловленный шкалой MSK-64, как известно, лимитирован СНиП II-7-81*, а верхний - зависимостью SHA-97, которая, судя по нашим обсуждениям в рамках GSHAP [4], является достаточно экстремальной.

Уместно заметить, что приведенные и многие другие подобные соотношения в определенной степени некорректны, в частности, из-за не учета ими нелинейных явлений в слабых грунтах при интенсивных (7 баллов и выше) сейсмических воздействиях, когда величины ускорений "насыщаются" и прекращают изменяться по линейному закону, как это имеет место при меньшей сейсмической интенсивности [8]. И, казалось бы, что целесообразнее составлять карты сейсмической опасности не для среднего, а для скального грунта, который прак-

тически сохраняет прямую связь между баллами и ускорениями, как при слабых, так и при сильных воздействиях. Однако не следует забывать, что преобладающая часть поселений строится не на скалах, а на грунте, и вся собранная сейсмологами макросейсмическая информация, отражающая сейсмический эффект и его затухание с расстоянием, собиралась не на скале, а на обычных и самых распространенных грунтах средней плотности.

Таблица 1.

Сейсмический эффект в баллах I и ускорениях A колебаний грунта второй категории в г. Сочи для разных периодов повторяемости T , по данным ОСП-97.

Карты ОСП-97	T , лет	I , Баллы	A , см/с ² (MSK-64)	A , см/с ² (SHA-97)
-	100	6.8	87.1	110.3
-	250	7.7	162.4	219.8
ОСП-97А	500	8.2	229.7	322.6
ОСП-97В	1000	8.6	303.1	438.3
-	2500	8.9	373.2	551.7
ОСП-97С	5000	9.0	399.9	595.7

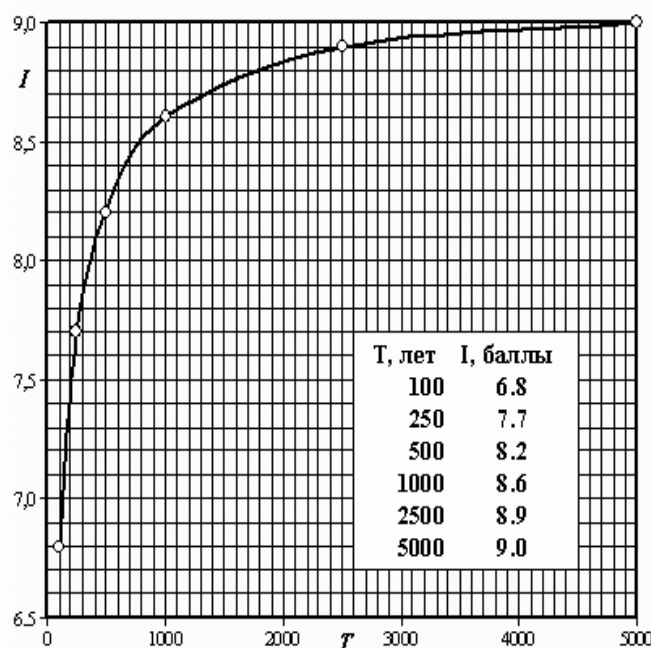


Рис.3. Повторяемость сейсмического эффекта I в долях баллов на средних грунтах (грунт 2-й категории, по СНиП II-7-81*) в городе Сочи в разные периоды времени T лет

Открытым пока остается и вопрос альтернативного использования более устойчивых величин скоростей вместо ускорений, и т.д. и т.п. Так что эта проблема требует дальнейшего обсуждения [8].

На каждом из графиков рис.3 и 4 приведены соответствующие таблицы для грунтов второй категории, по СНиП II-7-81*. Эти же данные сведены в табл.1, где жирным шрифтом выделены "нормативные" значения всех величин, соответствующие картам ОСР-97 (А, В, С).

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ОЧАГИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ВБЛИЗИ г.СОЧИ.

Территория Северного Кавказа, особенно ее северо-западная часть и Черноморское побережье, до сих пор остается наименее изученной в сейсмологическом, сейсмотектоническом и сейсмогеодинамическом отношении, по сравнению со всем Иран-Кавказ-Анатолийским сейсмоактивным регионом. Отсутствие полноценной местной системы сейсмометрических наблюдений не позволяет должным образом исследовать особенности сейсмичности и сейсмического режима этой территории, испытывающей в последние годы, как и весь Кавказ, усиление сейсмической активности.

На рис.5, отражающем сейсмичность западной части территории Большого Кавказа, приведен фрагмент ЛДФ-модели зон ВОЗ, использованной при создании карт ОСР-97. Здесь же, наряду с известными очагами землетрясений, показано местоположение потенциальных очагов, от которых сейсмический эффект на рассматриваемой территории г.Сочи может оказаться максимальным.

Наиболее крупные из известных землетрясений произошли на южных склонах Большого Кавказа, за пределами российской территории. Многочисленные

сильные и ощутимые землетрясения известны в окрестностях г.Сочи и на других участках Черноморского побережья, а также в акватории Черного моря. Одно из недавних землетрясений с магнитудой $M=4.6$ и интенсивностью $I_0=6-7$ баллов в эпицентре, расположенном севернее г.Сочи, случилось 15 ноября 2004 года.

Самыми близкими к городу оказались сейсмолинементы L0030 и L0026, способные генерировать землетрясения с магнитудами $M_{\max}=7.0$ и $M_{\max}=6.5$, соответственно, а также домен D0086 с $M_{\max}=5.5$, в пределах которого расположен и город Сочи. В качестве сценарных нами рассмотрены три потенциальных очага землетрясений (ПОЗ), представляющих наибольшую сейсмическую опасность для г.Сочи, - очаг с $M=7.0$ юго-восточнее города, очаг с $M=6.5$ к северо-востоку от Сочи и очаг с $M=5.5$, расположенный в непосредственной близости от города, и даже под ним.

В табл.2, предназначенной для расчета сейсмических воздействий в пункте размещения строительного объекта (в данном случае, район ул.Виноградная г.Сочи), приведены основные параметры очагов землетрясений, проявление которых возможно на ближайших к объекту участках указанных сейсмогенерирующих структур. Тип тектонических подвижек в каждом из трех очагов - надвиг. Другие параметры, необходимые для расчетов, указаны в таблице.

ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЕ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ.

На основе параметров, указанных в табл.2 для потенциальных сейсмических очагов Z-1, Z-2 и Z-3, О.В.Павленко (ИФЗ) выполнила расчеты акселерограмм и других количественных характеристик ожидаемых сейсмических воздействий в реальных грунтовых условиях в г.Сочи (район ул.Виноградная).

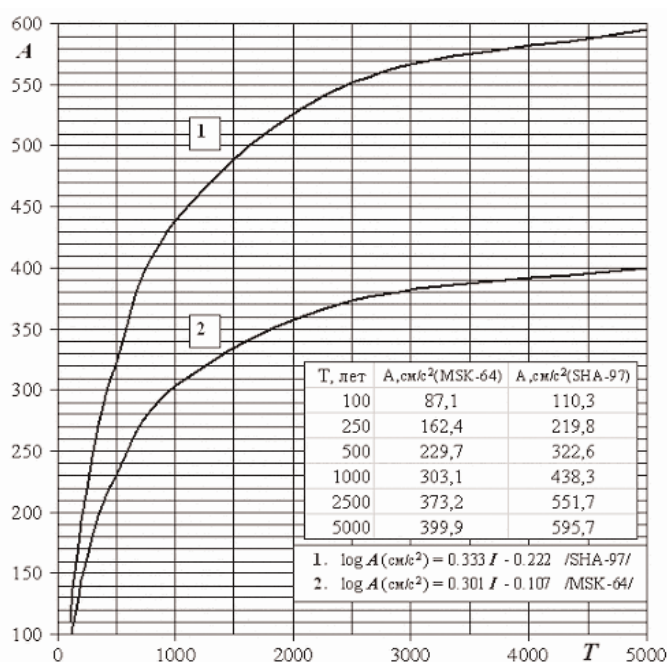


Рис.4. Вероятностный анализ сейсмической опасности в ускорениях A (см/с²), выполненный для средних грунтов города Сочи по формулам 1 и 2, приведенным на этом рисунке

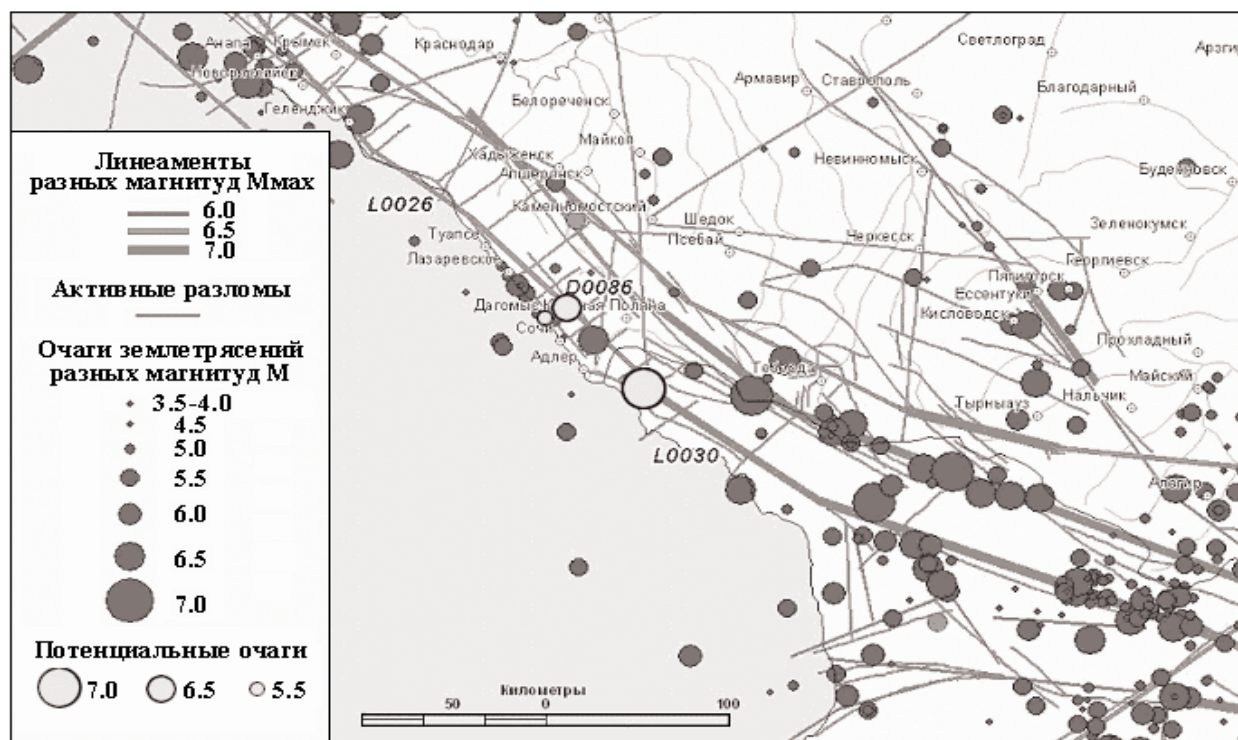


Рис.5. Эпицентры землетрясений разных магнитуд, показанные условными кружками, и сейсмогенерирующие структуры на территории западной части Большого Кавказа. Возле линеаментов и домена, представляющих наибольшую опасность для г.Сочи, указан их код (номер) в соответствии с базой данных ОСР-97. Серым цветом указаны потенциальные очаги землетрясений (ПОЗ) с магнитудами $M=7.0$, 6.5 и 5.5 .

В расчетах использовалась программа Д.Бура [9], модифицированная О.В.Павленко с целью адекватного учета протяженности сейсмических очагов и нелинейных явлений в грунтах при сильных сейсмических воздействиях. На рис.6 и 7 приведены некоторые примеры на основе полученных результатов.

Для каждого сценарного землетрясения были сгенерированы 50 синтетических акселерограмм, по которым оценивались средние значения и пределы изменений максимальных ускорений и скоростей на грунте и на скале, а также средние спектры колебаний (ускорений и скоростей) и средняя продолжительность сильных воздействий.

Не вдаваясь в детали анализа полученных О.В.Павленко результатов, отметим, что наибольший сейсмический эффект на рассматриваемом объекте будет наблюдаться при сценарном землетрясении Z-3 с магнитудой $M=5.5$ и с очагом, расположенным на глубине 5 км непосредственно под городом (рис.5 и 6). Это землетрясение по своим параметрам можно сравнить с известным Ташкентским землетрясением 1966 г., случившимся под

центром столицы Узбекистана. При несколько меньшей магнитуде ($M=5.2$), по сравнению с землетрясением Z-3, тогда интенсивность сейсмических сотрясений в эпицентральной области превысила 8 баллов и повлекла за собой значительные локальные разрушения в центральной части города.

Некоторые из результатов расчета акселерограмм для землетрясения Z-3 на разных грунтах приведены на рис.7, где верхняя акселерограмма соответствует сейсмическому эффекту на земной поверхности, средняя - на более плотных породах при снятой верхней 6.2-метровой толще грунта, а нижняя - рассчитана для условного скального грунта.

Как видно, сейсмический эффект при снятой верхней толще существенно уменьшился по сравнению с эффектом на поверхности грунта, хотя и остался значительно выше, чем это могло бы быть на скале.

Согласно полученным оценкам, на скале максимальные ускорения составят 300-340 см/с². Если же принять резкую границу грунтовой толщи с фундаментом, при всех сценарных землетрясениях, то в грунтовых слоях возбуждаются

Таблица 2.

Очаговые параметры сценарных очагов землетрясений, угрожающих г.Сочи.

Сейсмические структуры	Потенциальные очаги	Магнитуда, M_s	Координаты эпицентра		Глубина гипоцентра, км	Эпицентральное расстояние, км	Ориентировка очага		Размеры очага, км	
			°с. ш.	°в. д.			Простирание	Падение	Длина	Ширина
L0030	Z-1	7.0	43.3	40.5	15	73	112°	45°N	50	20
L0026	Z-2	6.5	43.7	39.8	10	18	119°	90°	25	10
D0086	Z-3	5.5	43.58	39.68	5	5	-	-	5	3

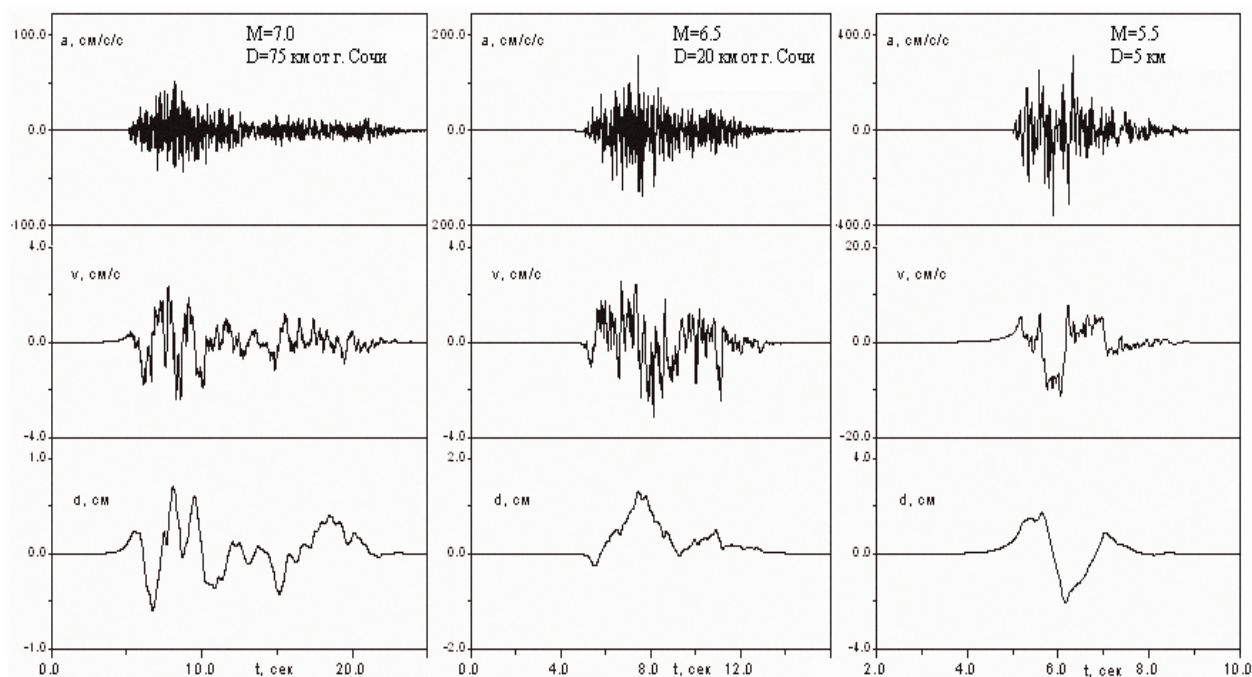


Рис.6. Примеры расчетных ускорений, скоростей и смещений на поверхности скалы для г.Сочи при трех сценарных землетрясениях Z-1, Z-2 и Z-3 (табл.2)

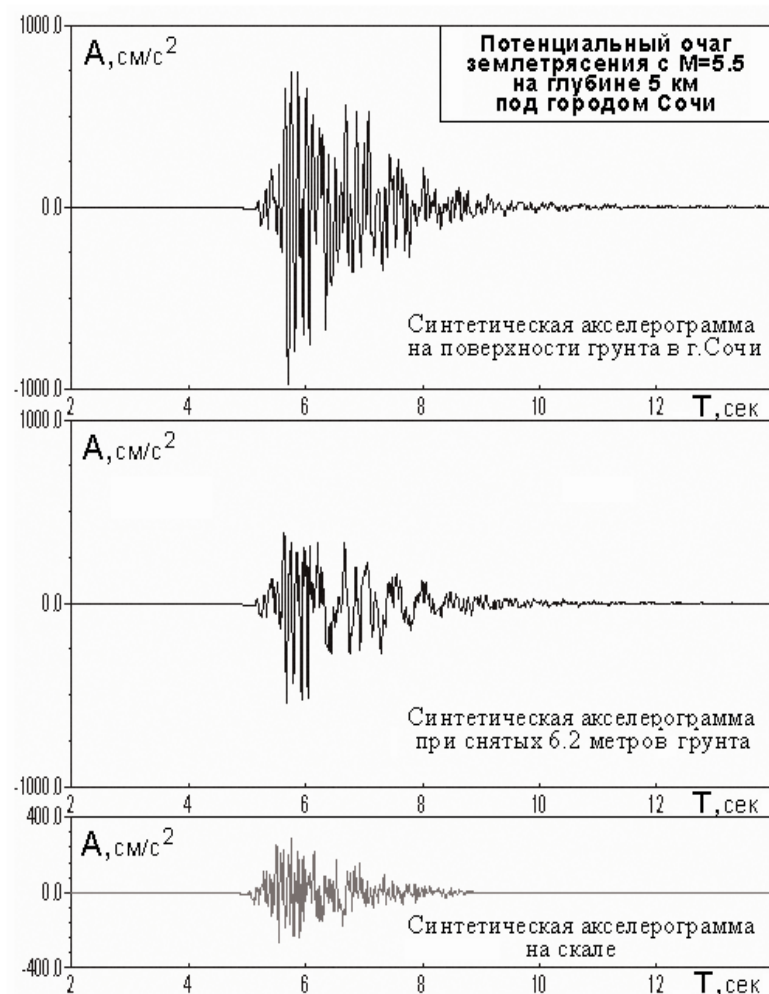


Рис.7. Примеры расчетных акселерограмм, ожидаемых в центре г.Сочи при возникновении очага землетрясения с магнитудой $M=5.5$ на глубине 5 км непосредственно под городом (очаг Z-3 в табл.2).

резонансные колебания, и на поверхности грунта максимальные ускорения достигают 560-875 см/с² (рис.7, сверху). Если же представить границу между грунтом и фундаментом как "размытую", то максимальные ускорения и максимальные скорости на поверхности грунта снизятся до 250-430 см/с².

Завершая этот раздел, важно отметить неопределенности, возникающие в результатах даже при незначительных изменениях тех или иных исходных физических параметров среды, используемых в расчетах. Как уже показано, оценки величины сейсмических воздействий могут значительно (почти в два раза) варьировать в зависимости от принятия того или иного геологического разреза и его граничных условий. Кроме того, наряду с прочими факторами, в случае наиболее резкого перепада физических свойств при переходе от менее плотного грунта к более твердому основанию возникают явления резонанса, усиливающие сейсмические воздействия. И наоборот, при более плавном граничном переходе сейсмический эффект значительно снижается и т.д. и т.п.

В этой связи интересно заметить, что эффект значительного влияния граничных условий на интенсивность сейсмических волн был обнаружен автором более 50 лет тому назад и на больших глубинах в земной коре [10, 11].

ОБ АДАПТАЦИИ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ ОЦЕНОК К КАРТАМ ОСР-97.

Как уже отмечалось, расчетные параметры сейсмических воздействий, получаемые на основе фиксированных в пространстве и во времени сценарных землетрясений, являются детерминистскими и экстремальными, поскольку в расчетах не учитываются особенности сейсмического режима сейсмогенерирующих структур. При этом, как правило, рассматриваются лишь очаги землетрясений максимальных возможных магнитуд, расположенные на минимальном расстоянии от исследуемого объекта и с ожидаемым максимальным сейсмическим эффектом. Однако то, что такие очаги могут "срабатывать" очень и очень редко, во внимание обычно не принимается.

К примеру, потенциальные очаги, подобные сценарному очагу Z-1, помещенному нами на северо-западное окончание линеамента L0030 с $M_{max}=7.0$ (рис.5), по статистике будут размещаться вдоль всего этого линеамента, и "очередь" до очага Z-1 может прийти не очень-то и скоро. То же самое относится и к очагу Z-2 на линеаменте L0026, а также к самому опасному очагу Z-3, который принадлежит достаточно большому домену D0086, где "рассеиваются" и другие многочисленные подобные очаги.

Наиболее правильным способом учета сейсмического режима и получения действительно вероятностных оценок было бы повторение технологии, использованной нами при создании карт ОСР-97, но вместо сейсмической интенсивности, выраженной в баллах, оперировать пиковыми ускорениями. Однако, по целому ряду причин, о части из которых было упомянуто выше, выполнить эту работу тогда представлялось не совсем целесообразным. К этой проблеме предстоит еще вернуться.

Другой путь - это пересчет по корреляционным формулам значений балльности в ускорения, как и было нами сделано в предыдущем разделе этой статьи, а еще раньше - в проекте GSHAP, по возможности, учтя при этом нелинейные явления в мягком грунте.

Можно предложить и следующий экспресс-способ перехода от экстремальных детерминированных расчетов к вероятностным оценкам, "привязанным" к нормативным картам ОСР-97. Графически этот способ изображен на рис.8.

Допустим, что полученные на основе сценарных землетрясений экстремальные оценки ожидаемых сейсмических воздействий относятся к самой консервативной среди комплекта карт ОСР - к карте ОСР-97С, отражающей повторяемость такого сейсмического эффекта в среднем один раз за 5000 лет. Тогда пересчет к двум другим картам - ОСР-97А или ОСР-97В - можно осуществить по простейшей формуле (2):

$$A_p^T = (A_{max}^T - A_{min}^T) \cdot (A_d - A_{min}^{5000}) / (A_{max}^{5000} - A_{min}^{5000}) + A_{min}^T \quad (2)$$

Здесь A_p^T - ускорение колебаний грунта с периодом повторяемости T лет и вероятностью p , соответствующей картам ОСР-97А и ОСР-97В (знак T - не показатель степени, а указание на период повторяемости эффекта); A_{max}^T и A_{min}^T - максимальные и минимальные ускорения, опреде-

ленные для заданного пункта путем пересчета величины сейсмической интенсивности по картам ОСР-97А и ОСР-97В (т.е. для $T=500$ и $T=1000$ лет) в ускорения по двум маргинальным формулам (3), приведенным ниже, а также на рис.4 и 8; A_{max}^{5000} и A_{min}^{5000} - то же самое для карты ОСР-97С; A_d - величина ускорения, полученная на основе сценарного землетрясения и отнесенная к карте ОСР-97С.

$$\begin{aligned} A_{MSK-64} (см/с/с) &= 10^{0.3011-0.107}, \\ A_{SHA-97} (см/с/с) &= 10^{0.3331-0.222}. \end{aligned} \quad (3)$$

На рис.8, в качестве примера, показан пересчет детерминированного значения $A_d = 430,0$ см/с² в вероятностные оценки, которые оказались равными $A_{p5\%}^{5000}$ см/с² для карты ОСР-97В и $A_{p10\%}^{5000}$ см/с² для ОСР-97А.

Здесь же приведены равнорасположенные промежуточные кривые, условно интерполирующие предельные значения величин ускорений колебаний грунта в том же пункте.

Возможно, "приписывание" детерминированной оценки лучше осуществлять к еще более консервативной карте ОСР-97D, составленной нами для объектов ядерно-радиационного комплекса на период $T=10000$ лет. Остальное остается по-прежнему.

ВЫВОДЫ.

Детерминированные оценки сейсмической опасности, не учитывающие особенностей сейсмического режима региона, значительно завышают величину ожидаемых сейсмических воздействий и, в принципе, не отражают рекомендации нормативных документов о применении комплекта карт ОСР-97.

Устранить в какой-то степени этот недостаток можно путем преобразования детерминированных значений в вероятностные.

Процедура такого преобразования может иметь следующую последовательность:

1. На основе базы сейсмологических данных карт Общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-97) для исследуемого пункта и средних грунтовых условий строятся кривые вероятностного анализа сейсмической опасности (ВАСО), представленные в десятичных долях баллов по шкале MSK-64.

В рассматриваемом конкретном случае эти величины оказались равными 8.2 баллов - для периода $T=500$ лет (карта ОСР-97А), 8.6 баллов - для периода $T=1000$ лет (карта ОСР-97В) и 9.0 баллов - для периода $T=5000$ лет (карта ОСР-97С).

2. На основе вычислений, выполненных по приведенным формулам для AMSK-64 и ASHA-97, определяются пиковые ускорения для разных периодов повторяемости сейсмического эффекта (например, 100, 250, 500, 1000, 2500, 5000 лет).

В рассматриваемом конкретном случае эти величины оказались в интервалах $229.7 \div 322.6$ см/с² - для периода $T=500$ лет (карта ОСР-97А), $303.1 \div 438.3$ см/с² - для $T=1000$ лет (карта ОСР-97В) и $399.9 \div 595.7$ см/с² - для периода $T=5000$ лет (карта ОСР-97С). Значения величин

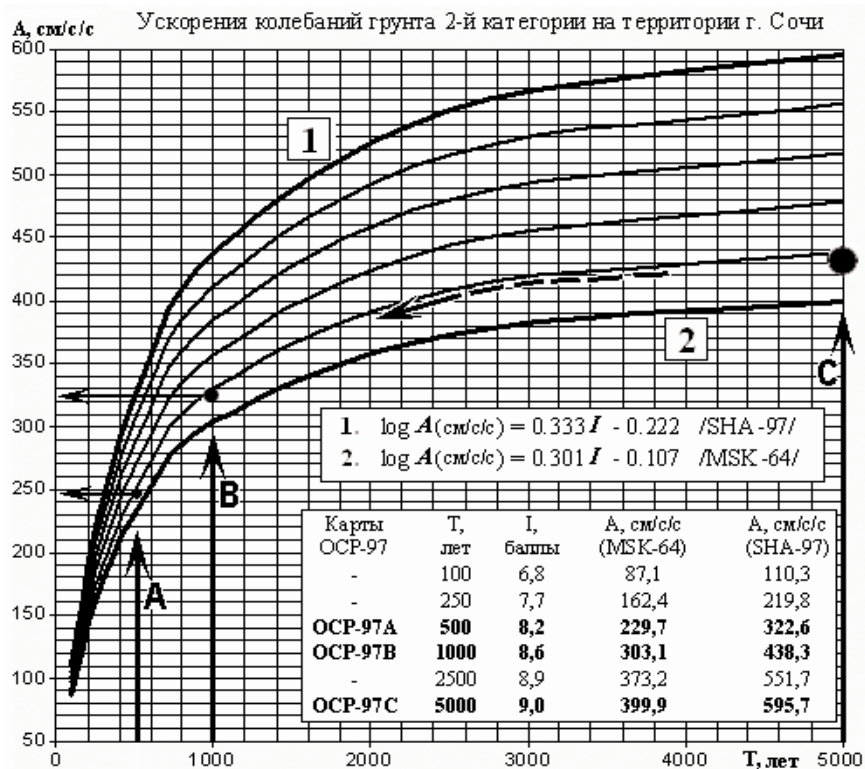


Рис.8. Иллюстрация пересчета экстремальных детерминистских оценок в вероятностные, соответствующие картам ОСР-97

ускорений, определенных в реальных грунтовых условиях, обычно оказываются внутри этих интервалов.

3. Определяются местоположение и сейсмологические параметры сценарных очагов землетрясений, представляющих наибольшую угрозу рассматриваемому пункту, и на их основе рассчитываются характеристики колебаний на скале и на поверхности реальных грунтов.

В рассматриваемом конкретном случае по трем сценарным землетрясениям с $M=5.5, 6.5$ и 7.0 выполнены расчеты для пяти геологических разрезов общей мощностью около 60 метров, представляющих различные грунтовые условия под проектируемым сооружением. Рассчитаны два варианта - с резкой и размытой границей между мягким грунтом и нижним жестким полупространством. Получены соответствующие оценки ускорений: $300-340 \text{ см/с}^2$ - для скалы, а также $560-875 \text{ см/с}^2$ - в случае резкой границы у основания грунта (с явлением резонанса) и $250-430 \text{ см/с}^2$ - при "размытой" границе.

4. Детерминистские оценки пересчитываются в вероятностные по предлагаемому способу.

Литература

1. Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт Общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97. Масштаб 1:8 000 000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сеймоопасных районах. - М.: 1999, 57с. Карта на 4-х листах. / Гл. ред. В.Н.Страхов, В.И.Уломов. - М.: Роскартография, 2000.

2. Уломов В.И. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации ОСР-97. Список населенных пунктов Российской Федерации, расположенных в сейсмических районах. Карты общего сейсмического районирования ОСР-97 (вкладка). // СНиП II-7-81*. Строительство в сейсмических районах. Издание официальное. - М.: Госстрой России, 2000, с.25-44.

3. Сейсмическое районирование территории Российской Федерации - ОСР-97. Карта на 4-х листах. / Гл. редакторы В.Н.Страхов и В.И.Уломов; ОИФЗ РАН. - М.: НПП "Теккарт", 2000.

4. The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) 1992 1999. // Ann. di Geofis. Roma, Italy, 1999, Vol. 42, N 6, p.955 1230.

5. Уломов В.И. Сейсмичность. // Большая Российская Энциклопедия (БРЭ). Том 1. - М.: Научное Издательство "Большая Российская энциклопедия".

2004, с.34-38.

6. Уломов В.И., Лаппо С.С., Левин Б.В., Соловьева О.Н. и др. Опасность землетрясений и цунами. Карта, масштаб 1:15.000.000 // Научное издание. Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации. МЧС России, РАН. (Под общей ред. С.К.Шойгу). - М.: Издательско-производственный центр "Дизайн. Информация. Картография". Отпечатано в тип. "Иван Федоров". 2005, с.64-65.

7. Уломов В.И., Левин Б.В. Опасность землетрясений и цунами. Сейсмичность и сейсмическое районирование. Цунами и их районирование. // Научное издание. Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации. МЧС России, РАН. (Под общей ред. С.К.Шойгу). - М.: Издательско-производственный центр "Дизайн. Информация. Картография". Отпечатано в тип. "Иван Федоров". 2005, с.66-69.

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

9. Boore D.M. Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method, PAGEOPH. 160 (2003), pp. 635-676.

10. Уломов В.И. О моделировании очагов тектонических землетрясений при помощи ультразвуковых излучателей. // Изв. АН СССР, сер. Геофиз., 1961, № 2.

11. Уломов В.И. О результатах исследования глубинного строения земной коры в Средней Азии по данным сейсмологии. // Изв. АН СССР, сер. Геофиз., 1962, № 10.