

# НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ВЕРОЯТНОСТНОЙ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭМПИРИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

## SOME ASPECTS OF PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD ASSESSMENT USING EMPIRICAL DEPENDENCES

**ПЕРЕТОКИН С.А.**

*Заведующий лабораторией геодинамических и экологических  
рисков Красноярского филиала Института вычислительных  
технологий СО РАН — Специального конструкторско-  
технологического бюро «Наука» (СКТБ «Наука» ИВТ СО РАН),  
к. т. н., г. Красноярск, saperetokin@yandex.ru*

**PERETOKIN S.A.**

*Head of the Laboratory of Geodynamic and Environmental Risks,  
Krasnoyarsk Branch of the Institute of Computational Technologies  
of the SB RAS — “Nauka” Special Design and Technological Bureau,  
PhD (candidate of science in Technics), Krasnoyarsk,  
saperetokin@yandex.ru*

**Ключевые слова:** землетрясение; сейсмогеодинамика; сейсмическая опасность; общее сейсмическое районирование; Крым; Северный Кавказ; максимальные (пиковые) ускорения; спектры реакции; картирование физических параметров сейсмоопасности.

**Key words:** earthquake; seismogeodynamics; seismic hazard; general seismic zoning; Crimea; North Caucasus; peak accelerations; response spectra; mapping physical parameters of seismic hazards.

**Аннотация:** статья является продолжением работ по совершенствованию методологии общего сейсмического районирования (ОСР) территории Российской Федерации. На примере территорий Северо-Кавказского и Крымского федеральных округов обсуждается дальнейшее развитие представления сейсмической опасности в физических параметрах. Рассматриваются подходы к построению вероятностных карт сейсмической опасности в терминах амплитудных параметров колебаний грунта на основе эмпирических зависимостей.

**Abstract:** the paper is a continuation of works on improving the methodology of general seismic zonation of the Russian Federation territory. Further development of representation of seismic hazards using physical parameters is discussed by the example of the North Caucasian and Crimean Federal Districts. Approaches to construction of probabilistic seismic hazard maps in terms of amplitude parameters of ground vibrations on the basis of empirical dependences are considered.

### Введение

Статья является продолжением сейсмологических исследований по дальнейшему совершенствованию методологии общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-2016 [7]. На примере Крымско-Северо-Кавказского региона обсуждается развитие представления сейсмической опасности не только в баллах макросейсмической шкалы сейсмической интенсивности, но и в физических параметрах, которые непосредственно используются в расчетах на сеймостойкость строительных сооружений.

В 1991–1997 гг. была разработана целостная методология построения вероятностных карт общего сейсмического районирования ОСР-97 [7]. На картах ОСР-97 отражены уровни сейсмических воздействий, выраженные в баллах макросейсмической шкалы MSK-64, с заданными вероятностями их превышения за 50 лет.

Методология общего сейсмического районирования ОСР-2016 соответ-

ствует методологии ОСР-97. В основу вероятностного анализа сейсмической опасности (ВАСО) положены две взаимосвязанные сейсмогеодинамические модели (рис. 1) — модель зон возникновения очагов землетрясений (зон ВОЗ) и модель сейсмического эффекта (МСЭ) [8].

В настоящее время большинство стран перешло на использование вероятностных карт сейсмического районирования. В мировой практике существуют различные подходы к построению моделей зон ВОЗ, но задача у них одна — адекватно описать распределение землетрясений в пространстве и времени. Модель сейсмического эффекта обычно представлена функциональной зависимостью, определяющей величину воздействия на той или иной площадке от землетрясений различных магнитуд при разных гипотенетических расстояниях. За эффект принимают интенсивность в баллах, максимальное ускорение, скорость колебаний грунта или уровень спектра

реакции на фиксированном периоде (частоте). Обе модели должны содержать оценки погрешностей заложенных в них исходных данных и эмпирических зависимостей.

### Процедура вероятностного анализа сейсмической опасности

Процедуру ВАСО по ОСР-97 (ОСР-2016) можно разделить на два этапа.

1. На основе модели зон ВОЗ генерируется каталог землетрясений для заданного периода времени  $T$  (лет). Каждое землетрясение характеризуется набором параметров: моментной магнитудой  $M_w$ ; длиной и шириной площадки очага; азимутом ее верхней кромки, задающим направление простирания очага; углом ее падения (углом между горизонтальной плоскостью и площадкой очага); географическими координатами и глубиной гипоцентра.

2. Вычисляется сейсмический эффект от каждого землетрясения в расчетной точке на основе принятой макросейми-

ческой модели затухания и набирается статистика по количеству сотрясений разной интенсивности. Полученная статистика переводится в кумулятивный вид. Таким образом, для расчетной точки получается количество сотрясений  $N$  с интенсивностью, большей или равной заданной, с принятым шагом по шкале. Разделив интервал времени  $T$ , для которого синтезирован каталог, на  $N$ , получаем значение интенсивности в баллах для определенного периода повторяемости. Таким образом вычисляются величины балльности для нормативных периодов повторяемости 500, 1 000, 5 000 и 10 000 лет.

В качестве примера результатов расчета в процедуре ВАСО на рис. 2 приведен график повторяемости сотрясений для территории города Махачкала. Расчет выполнен на основе модели зон ВОЗ ОСР-2016 и модели затухания А.А. Гусева для материковой части Северной Евразии.

### Пересчет макросейсмической балльности в амплитудные параметры

В период 1960–2000 гг. большинство стран перешло к сейсмическому районированию в терминах амплитудных параметров колебаний — максимальных ускорений, максимальных скоростей или уровней спектра реакции (амплитуд спектральных ускорений) [2, 3]. Карты ОСР являются элементом комплекса нормативных документов, поэтому картируемая величина напрямую увязана с принятой методикой учета сейсмических нагрузок при проектировании.

Преимущества и недостатки амплитудных параметров и макросейсмической интенсивности в качестве исходных данных для описания сейсмических нагрузок широко обсуждаются. Общее мнение сводится к тому, что адекватно описать сейсмическое воздействие при помощи только одного физического параметра нельзя. Для этого необходимо учитывать как амплитудные характеристики колебаний, так и их частотный состав, а также продолжительность воздействия.

Макросейсмическая интенсивность в баллах отражает в первую очередь масштаб повреждений типовых зданий с фиксированной уязвимостью и является достаточно удобной альтернативой для слабоизученных территорий. Собрать статистику таких данных, необходимых для построения модели сейсмического эффекта, в определенной мере проще, чем наполнить базу данных сильных движений записями реальных землетрясений.



Рис. 1. Концепция методологии ОСР-97 и ОСР-2016

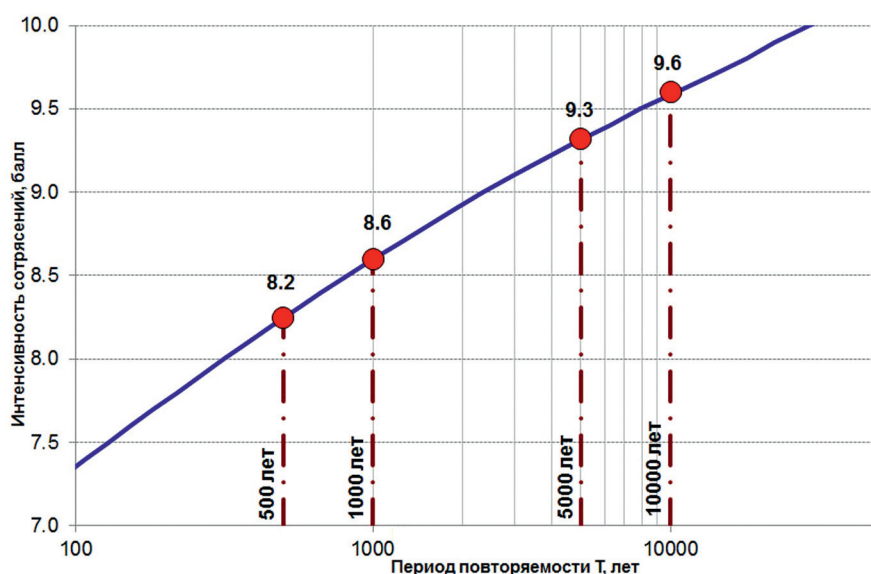


Рис. 2. Расчетный график повторяемости сотрясений для территории города Махачкала

Но далее по СП (СНиП) применяется процедура перехода от нормативной балльности к нормативным ускорениям и спектрам реакции. Ненадежность этого перехода компенсируется различными повышающими коэффициентами.

Нормативные документы для особо ответственных объектов требуют оценки сейсмических эффектов в пиковых и спектральных ускорениях [5]. Однако переход от интенсивности к ускорениям и тем более к спектрам реакции — задача нетривиальная.

Необходимо понимать, что шкала макросейсмической интенсивности — это описательная шкала повреждений зданий и сооружений при сейсмиче-

ских воздействиях. Каждому баллу по ней соответствует диапазон физических параметров или их сочетаний. Кроме того, эти интервалы для разных баллов пересекаются.

Эмпирические соотношения между ускорением грунта и сейсмической интенсивностью определяют среднюю (50%-ной обеспеченности) зависимость между ними и вероятный разброс значений. Для шкалы МСК-64 это соотношение имеет следующий вид:

$$\lg(PGA) = -0,1 + 0,3 I, \quad (1)$$

где PGA (peak ground acceleration) — максимальное (пиковое) ускорение ко-

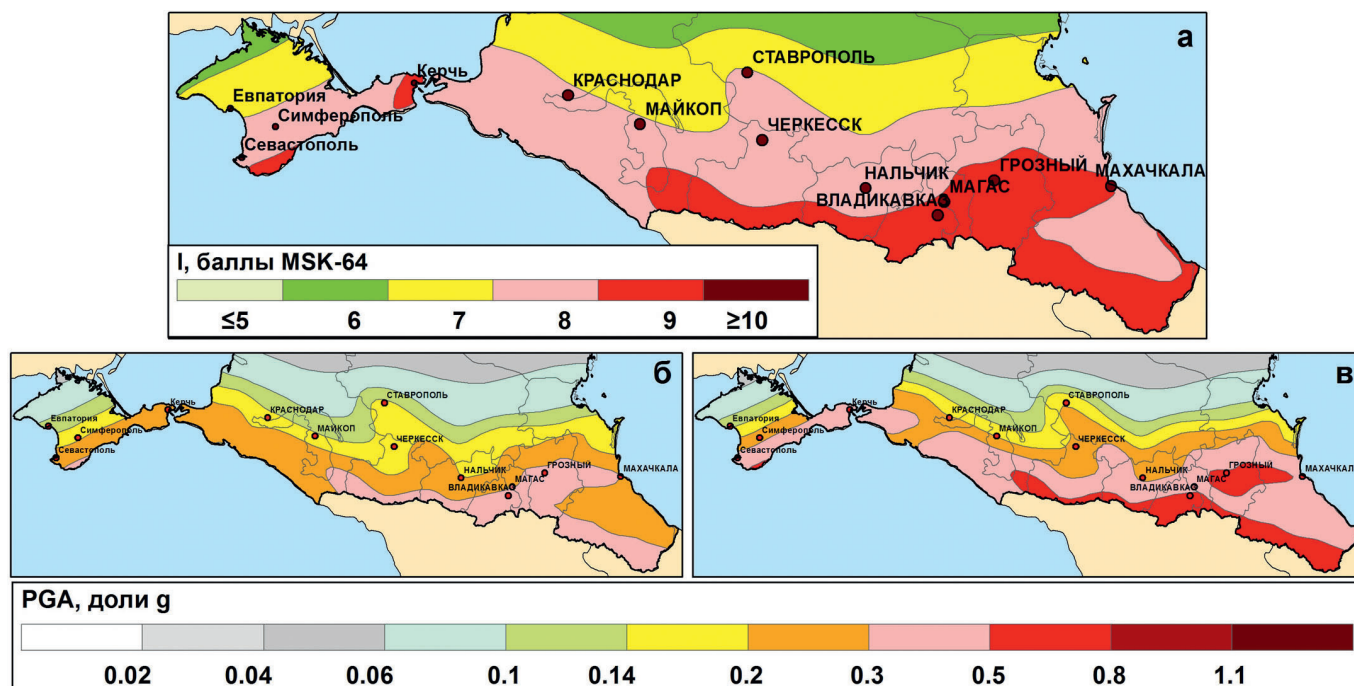


Рис. 3. Фрагмент карты ОСР-2016-В (5%-ная вероятность превышения расчетной интенсивности в течение 50 лет, период повторяемости 1 000 лет) для территории Северного Кавказа (а) и результаты его пересчета из интенсивности  $I$  в баллах в пиковые ускорения PGA по зависимостям MSK-64 (б) и Ф.Ф. Аптикаева (в) ( $g$  — ускорение свободного падения)

лебаний грунта в пункте наблюдения в горизонтальной плоскости,  $\text{см}/\text{с}^2$ ;  $I$  — сейсмическая интенсивность, балл.

Ф.Ф. Аптикаевым был предложен ряд соотношений, увязывающих физические параметры сейсмических воздействий (PGA,  $\text{см}/\text{с}^2$ ; PGV,  $\text{см}/\text{с}$ ; PGD,  $\text{см}$ , — пиковые ускорение, скорость и смещение грунта соответственно) и макросейсмическую балльность ( $I$ ) [1]. Средняя зависимость между PGA и  $I$  по Ф.Ф. Аптикаеву имеет вид:

$$\lg(\text{PGA}) = -0,755 + 0,4 I. \quad (2)$$

Пример такого пересчета — международная карта глобальной сейсмической опасности (GSHMAP), для которой значения интенсивности на карте ОСР-97-А пересчитывались в пиковые ускорения по зависимости В.И. Уломова [8]:

$$\lg(\text{PGA}) = -0,222 + 0,333 I. \quad (3)$$

Подобные формулы позволяют получить приблизительные оценки. По существу, пересчет вероятностных оценок балльности в ускорения по какой-либо зависимости равнозначен такому пересчету всей модели сейсмического эффекта по той же формуле, что само по себе не вполне корректно.

На рисунке 3 сопоставлены результаты пересчета фрагмента карты ОСР-2016-В для территории Северного Кавказа из  $I$  в PGA по зависимостям (1) и (2). Оче-

видно, что результат прямого пересчета напрямую зависит от применяемой зависимости. Для высоких балльностей оценки пиковых ускорений по соотношениям (1) и (2) различаются между собой почти в 2 раза.

Для того чтобы каким-то образом компенсировать вероятный разброс значений PGA относительно средних величин, нормативными документами предлагается использовать оценки пиковых ускорений при 50- и 84%-ной обеспеченности расчетной балльности [5]. Например, по зависимости (2) интенсивности 6 баллов соответствует среднее значение PGA, равное  $44 \text{ см}/\text{с}^2$  для 50%-ной обеспеченности и  $78 \text{ см}/\text{с}^2$  для 84%-ной.

Такой подход — вынужденная мера, которая позволяет в определенной степени застраховаться от занижения оценок, но не решает проблему как таковую. Кроме того, когда речь идет об оценках сейсмической опасности с вероятностью превышения полученных значений за 50 лет, равной 1, 5 и 10% (а для атомных объектов — 0,5%), использование зависимостей 50- или 84%-ной обеспеченности некорректно само по себе.

#### Вероятностные оценки сейсмической опасности с использованием эмпирических зависимостей

Более надежными представляются независимые расчеты наборов вероятностных карт как в значениях мак-

росейсмической балльности, так и в физических величинах. При этом модель зон ВОЗ принимается общая, а модели сейсмического эффекта задаются отдельно для каждой физической величины.

Рассмотрим пример подобного расчета для Северного Кавказа с использованием программы PRB-60, разработанной А.А. Гусевым, В.М. Павловым и Л.С. Шумиловой в рамках работ по ОСР-97 [4]. Процедура ВАСО в этой программе модернизирована таким образом, чтобы обеспечить параллельные вычисления по нескольким моделям сейсмического эффекта:

- по модели зон ВОЗ ОСР-2016 [6];
- по модели затухания А.А. Гусева для материковой части Северной Евразии [7];
- по эмпирической зависимости связи между пиковым ускорением, магнитудой и расстоянием до очага [1];
- по набору эмпирических зависимостей для расчета спектра реакции по магнитуде и расстоянию до очага [1].

В соответствии с эмпирическими зависимостями Ф.Ф. Аптикаева [1] для расчета спектров реакции использована следующая система параметризации: спектры нормированы по спектральному уровню и по преобладающей частоте  $f_0$  (рис. 4).

Логарифмическая ширина спектра реакции  $S = S_2 + S_1$  (см. рис. 4) измеряется между частотами, на которых в



первый и в последний раз уровень спектра достиг половины своего максимального значения. В среднем ширина спектра  $S$  равна двум октавам со стандартным отклонением 0,20 единицы  $\lg(f/f_0)$  (где  $f$  — частота;  $f_0$  — преобладающая частота):

$$S = 0,60 + C_1 + C_2 \pm 0,20, \quad (4)$$

где константа  $C_1 = -0,05$  для взбросов, 0,00 для сдвигов и 0,05 для сбросов; константа  $C_2 = -0,10$  для грунтов первой категории, 0,00 для грунтов второй категории и 0,10 для грунтов третьей категории.

Максимальное значение спектрального коэффициента динамичности  $\beta$  (безразм.) определяется с использованием зависимости:

$$\lg \beta = 0,72 - 0,28 \cdot S + 0,07 \cdot \lg \tau \pm 0,07, \quad (5)$$

где  $\tau$  — длительность основной фазы колебаний, с, по Ф.Ф. Аптикаеву (интервал времени, в течение которого амплитуда огибающей колебаний превышает 1/2 максимального уровня).

Преобладающий период колебаний в секундах  $t_0 = 1/f_0$  находят по зависимости (см. рис. 4):

$$\lg t_0 = 0,15 \cdot M_{LH} + 0,25 \cdot \lg R + C_3 - 1,9 \pm 0,2, \quad (6)$$

где  $M_{LH}$  — магнитуда землетрясения, определяемая по поверхностным сейсмическим волнам;  $R$  — минимальное расстояние от площадки модельного землетрясения до расчетной точки, км; константа  $C_3 = -0,10$  для взбросов, 0,00 для сдвигов и 0,10 для сбросов.

Максимальная амплитуда спектра реакции во всем диапазоне частот определяется следующим образом (см. рис. 4):

$$SA_{\max} = \beta \cdot PGA, \quad (7)$$

где пиковые ускорения PGA (см/с<sup>2</sup>) горизонтальных компонент рассчитывают исходя из параметров очага по зависимостям:

$$\lg(PGA) = \begin{cases} C_4 \cdot 0,9 + 2,23 \pm 0,16 & \text{при } R \leq 0,33 \cdot M_{LH} - 1,51 \\ C_4 \cdot (0,33 \cdot M_{LH} - 0,61 - \lg R) + 2,23 \pm 0,16 & \text{при } 0,33 \cdot M_{LH} - 1,51 < R \leq 0,33 \cdot M_{LH} - 0,61 \\ 0,634 \cdot M_{LH} - 1,92 \cdot \lg R + 1,076 \pm 0,18 & \text{при } R > 0,33 \cdot M_{LH} - 0,61 \end{cases}, \quad (8)$$

где коэффициент  $C_4 = 0,467$  для сбросов, 0,550 для сбросо-сдвигов, 0,633 для сдвигов, 0,717 для взбросо-сдвигов и 0,800 для взбросов.

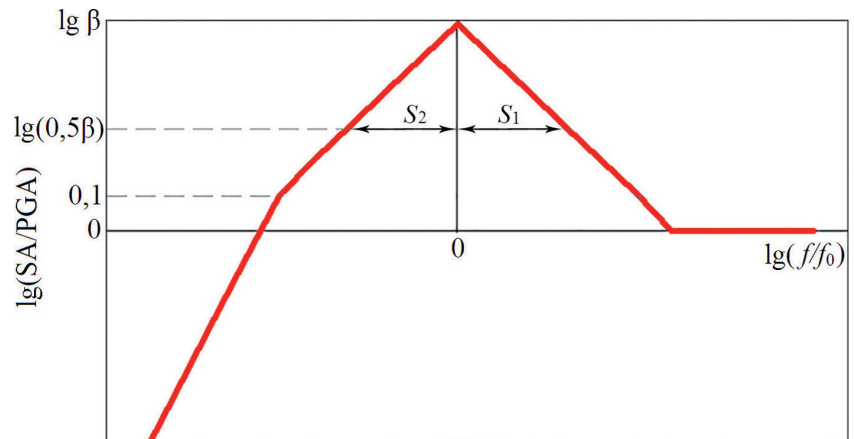


Рис. 4. Средняя форма логарифмического спектра реакции в нормированных ускорениях (логарифмического спектра коэффициентов динамичности  $SA/PGA$ ). Буквенные обозначения:  $SA$  — амплитуда спектрального ускорения;  $PGA$  — максимальное (пиковое) ускорение грунта;  $\beta$  — максимальное значение спектрального коэффициента динамичности,  $\beta = SA_{\max}/PGA$ ;  $f$  — частота колебаний;  $f_0$  — преобладающая частота колебаний;  $S_1, S_2$  — логарифмическая ширина высокочастотной и низкочастотной полосы спектра соответственно;  $S$  — полная логарифмическая ширина спектра,  $S = S_2 + S_1$

Как уже отмечалось выше, принципиальным для ВАСО является обязательный учет вероятного разброса значений параметров моделей. Для приведенных эмпирических зависимостей это реализуется как прибавление к расчетным значениям  $\lg(PGA)$ ,  $\lg(1/f_0)$ ,  $S$ ,  $\lg \beta$  случайных величин с нормальным распределением. Для каждой зависимости стандартное отклонение  $\sigma$  указано со знаком « $\pm$ ».

При учете того что моделируемый на первом этапе ВАСО синтетический каталог насчитывает сотни тысяч землетрясений, указанные случайные добавки позволяют приблизить диапазон получаемых значений  $PGA$ ,  $f_0$ ,  $S$ ,  $\beta$  к статистике по реальным (наблюденным) данным, заложенной в основу эмпирических зависимостей.

При этом чем более длительный период повторяемости воздействий мы рассматриваем, тем выше вероятность больших отклонений от средних зависимостей. Во многом из-за этого оценки сейсмической опасности для длительных периодов повторяемости на вероятностных картах выше, чем оценки, полученные детерминистскими методами по средним зависимостям.

Второй этап процедуры ВАСО PRB-60 был доработан таким образом, что для расчетной точки получается набор спектров реакции от всех модельных землетрясений. И далее статистика набирается не только для расчетной интенсивности, но и для  $PGA$ , и для амплитуд спектров реакции  $SA$  при фиксированных периодах колебаний 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,7; 1,0; 2,0; 3,0; 5,0 с.

В таблице 1 приведен пример расчетных обобщенных спектров реакции для территории Махачкалы по семи периодам повторяемости воздействий. На рисунке 5, а показаны расчетные кривые повторяемости пиковых ускорений  $PGA$  и амплитуд спектра реакции  $SA$  при фиксированных периодах колебаний, а на рис. 5, б — соответствующие им обобщенные спектры реакции при фиксированных периодах повторяемости для той же территории.

По аналогичной схеме были выполнены расчеты для узлов наложенной на карту треугольной сетки с шагом 15 км для Крыма и Северного Кавказа. Их результаты приведены на рис. 6.

#### Соотношение расчетной интенсивности и пиковых ускорений для исследуемого региона

Сопоставим результаты прямого пересчета значений балльности  $I$  в величины пикового ускорения  $PGA$  по зависимостям (1), (2) и расчетов путем ВАСО с использованием эмпирических зависимостей (8) (рис. 7). Видно, что для наиболее сейсмически активных районов оценки  $PGA$  на рис. 7, а и 7, б достаточно близки между собой. Для того чтобы понять причину такого результата, проанализируем, чем обусловлены полученные оценки на примере города Махачкала, для которого оценки  $PGA$  при периоде повторяемости  $T = 1\,000$  лет составили:

- 341 см/с<sup>2</sup> при расчете путем ВАСО с использованием эмпирических зависимостей (8);



**Расчетные пиковые ускорения и амплитуды обобщенных спектров реакции при разных периодах повторяемости для территории города Махачкала**

| Период повторяемости $T$ , лет | Пиковое ускорение PGA, см/с <sup>2</sup> | Амплитуды обобщенных спектров реакции SA, доли $g^*$ , на периодах колебаний $t$ , с |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                |                                          | 0,1                                                                                  | 0,2   | 0,3   | 0,4   | 0,5   | 0,7   | 1,0   | 2,0   | 3,0   | 5,0   |
| 100                            | 0,137                                    | 0,225                                                                                | 0,277 | 0,279 | 0,257 | 0,227 | 0,172 | 0,119 | 0,050 | 0,027 | 0,007 |
| 500                            | 0,277                                    | 0,501                                                                                | 0,628 | 0,653 | 0,614 | 0,549 | 0,417 | 0,291 | 0,125 | 0,070 | 0,024 |
| 1 000                          | 0,341                                    | 0,651                                                                                | 0,814 | 0,848 | 0,806 | 0,727 | 0,555 | 0,389 | 0,173 | 0,100 | 0,037 |
| 2 000                          | 0,406                                    | 0,819                                                                                | 1,016 | 1,058 | 1,015 | 0,923 | 0,708 | 0,503 | 0,231 | 0,136 | 0,054 |
| 3 000                          | 0,444                                    | 0,932                                                                                | 1,137 | 1,184 | 1,150 | 1,049 | 0,811 | 0,574 | 0,268 | 0,161 | 0,067 |
| 5000                           | 0,492                                    | 1,072                                                                                | 1,292 | 1,350 | 1,327 | 1,225 | 0,941 | 0,666 | 0,316 | 0,197 | 0,087 |
| 10 000                         | 0,552                                    | 1,260                                                                                | 1,514 | 1,586 | 1,583 | 1,435 | 1,111 | 0,795 | 0,397 | 0,253 | 0,116 |

\*  $g$  — ускорение свободного падения.

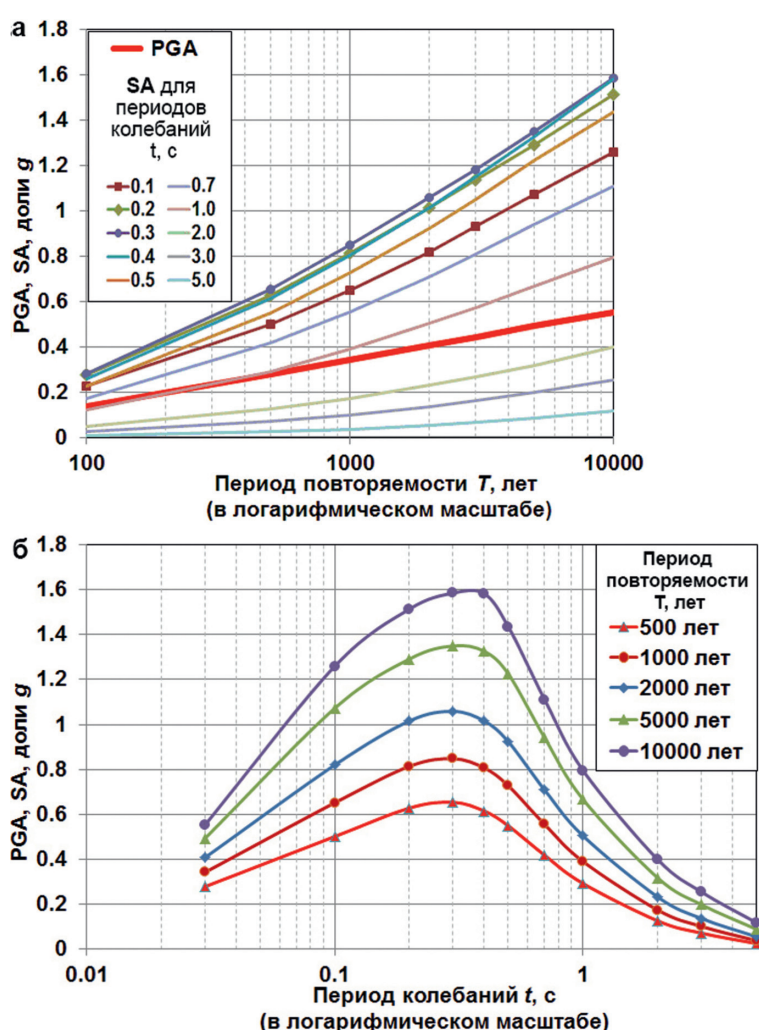
- 298 см/с<sup>2</sup> при прямом пересчете из  $I$  в PGA по зависимости (1);
- 476 см/с<sup>2</sup> при прямом пересчете из  $I$  в PGA по зависимости (2).

На рисунке 8 в качестве примера показаны гистограммы деагрегации сейсмической опасности территории Махачкалы для периода повторяемости воздействий 1 000 лет. Из результатов деагрегации следует, что наибольший вклад в итоговые оценки как макросейсмической интенсивности, так и пикового ускорения внесли землетрясения с магнитудой по поверхностным волнам  $M_s = 6,5 \pm 0,2$  и расстоянием до площадки очага  $25,0 \pm 2,5$  км. Несколько меньший вклад обеспечили сейсмические события с  $M_s = 6,0 \pm 0,2$  и расстоянием до площадки очага  $20,0 \pm 2,5$  км.

Рассмотрим средние графики затухания пикового ускорения колебаний грунта по мере удаления от площадки очага (рис. 9):

- 1) по А.А. Гусеву, пересчитанный из  $I$  в PGA по зависимости (1);
- 2) по А.А. Гусеву, пересчитанный из  $I$  в PGA по зависимости (2);
- 3) по Ф.Ф. Аптикаеву в соответствии с зависимостями (8).

Из рисунка 9, б видно, что для  $M_s = 6,5$  на расстоянии 25 км кривые № 1 и 3 практически совпадают, а график № 2 расположен существенно выше. При этом для  $M_s = 6,0$  (см. рис. 9, а) на расстоянии 20 км совпадают кривые № 2 и 3, а график № 1 проходит ниже. С учетом того что землетрясения с  $M_s = 6,5$  на расстоянии 25 км вносят наибольший вклад в расчетную опасность, можно сделать вывод, что формула (1) при прямом пересчете  $I$  в PGA дает оценку, близкую к результатам расчетов по эмпирической зависимости (8).



**Рис. 5. Расчетные кривые повторяемости пиковых ускорений PGA и амплитуд спектра реакции SA на фиксированных периодах колебаний  $t$  (а) и обобщенные спектры реакции с различной повторяемостью  $T$  (б) для территории города Махачкала**

То есть можно сказать, что соотношение вероятностных оценок макросейсмической балльности и пиковых ускорений для какой-либо конкретной площадки во многом зависит не только от выбранной модели затухания этих

величин, но и от модели зон ВОЗ, определяющей распределение сейсмичности в пространстве и времени для соответствующего региона.

Из рисунка 10, а видно, что для интервала интенсивности VI–VII баллов

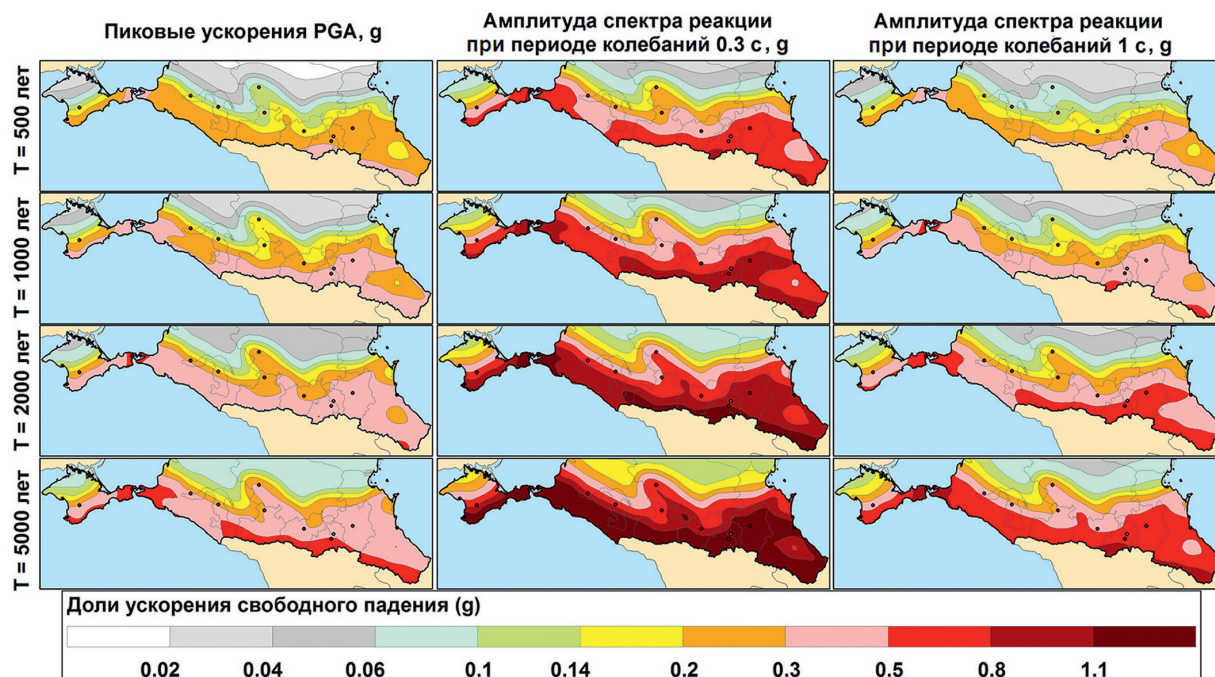


Рис. 6. Результаты моделирования сейсмической опасности территорий Крыма и Северного Кавказа для разных периодов повторяемости  $T$  в амплитудных параметрах с использованием эмпирических моделей затухания

точки «расчетное пиковое ускорение — балльность» для территории Северного Кавказа лежат ниже графиков по зависимостям (1) и (2). Это связано с двумя факторами:

- 1) расчетная интенсивность VI–VII баллов для территории Северного Кавказа связана преимущественно с дальней зоной землетрясений высоких магнитуд (для регионов, в которых максимальный вклад в расчетную сейсмичность оказывают землетрясения с магнитудами менее 6,0, подобного эффекта не наблюдается);
- 2) затухание интенсивности с расстоянием происходит медленнее, чем затухание пикового ускорения (парадокс Ньюмана — Шебалина).

Из рисунка 10, а также видно, что зависимость Ф.Ф. Аптикаева (2) ограничивает набор расчетных точек «пиковое ускорение — балльность» сверху, а зависимость MSK-64 (1) дает оценки, близкие к средним значениям этого набора только в интервале 7,5–8,5.

Разумеется, полученное распределение «PGA —  $I$ »<sup>1</sup> достоверно для территории Северного Кавказа в пределах точности заложенных в расчет моделей и будет меняться при их корректировке. Тем не менее, если используемые модели зон ВОЗ и сейсмического эффекта принимать как приемлемо достоверные, появляется возможность более коррект-

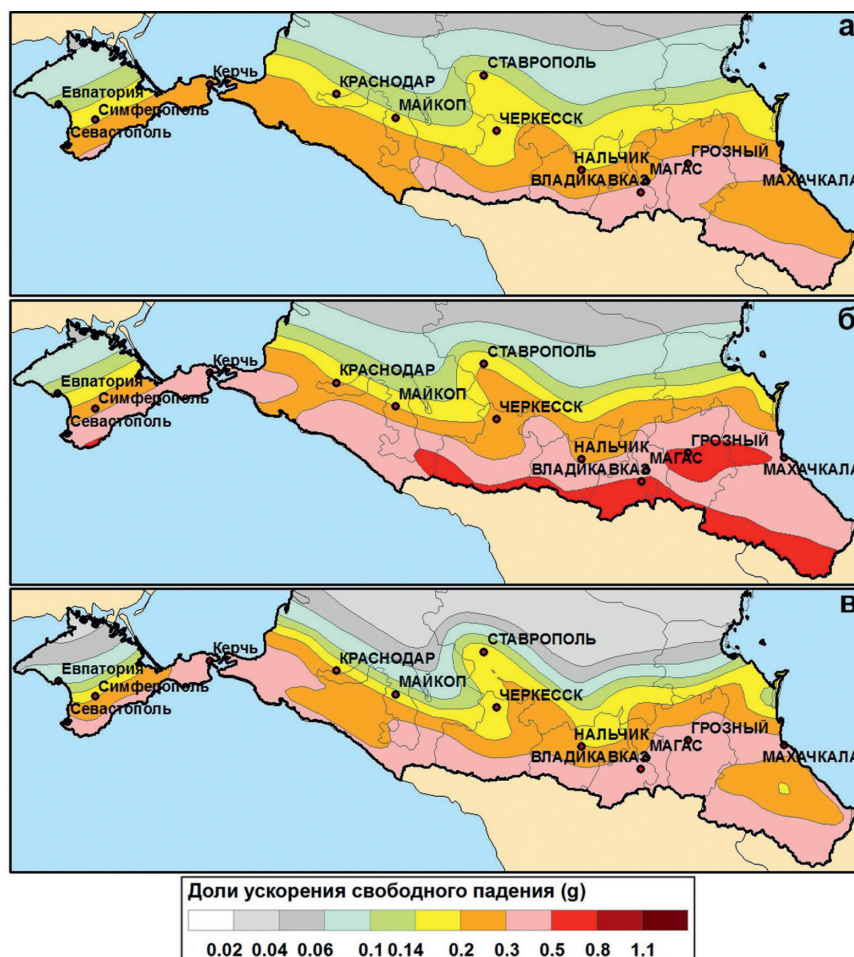


Рис. 7. Сопоставление схем сейсмического районирования территорий Крыма и Северного Кавказа для периода повторяемости 1 000 лет, полученных в результате: а, б — пересчета значений балльности по карте ОСР-2016-В в пиковые ускорения по зависимостям (1) и (2) соответственно; в — расчета путем вероятностного анализа сейсмической опасности с использованием зависимостей (8)

<sup>1</sup> Как и далее предложенные зависимости (9).



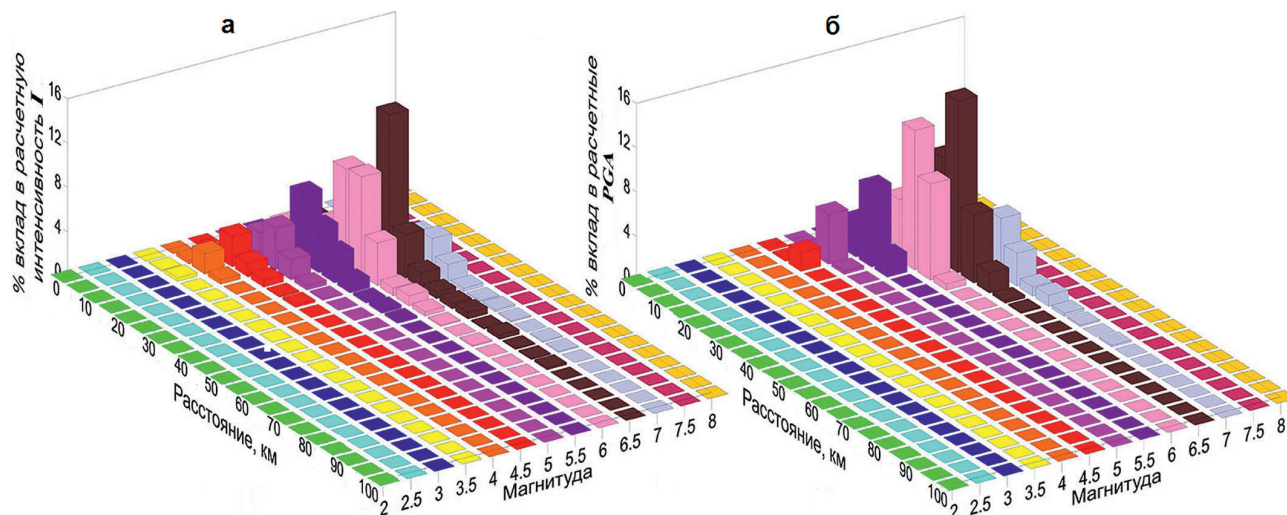


Рис. 8. Гистограммы деагрегации сейсмической опасности территории города Махачкала для периода повторяемости воздействий 1 000 лет, демонстрирующие вклады землетрясений разных магнитуд с разными расстояниями от точки наблюдения до площадки очага в итоговые оценки: а — макросейсмической балльности  $I$ ; б — пиковых ускорений PGA

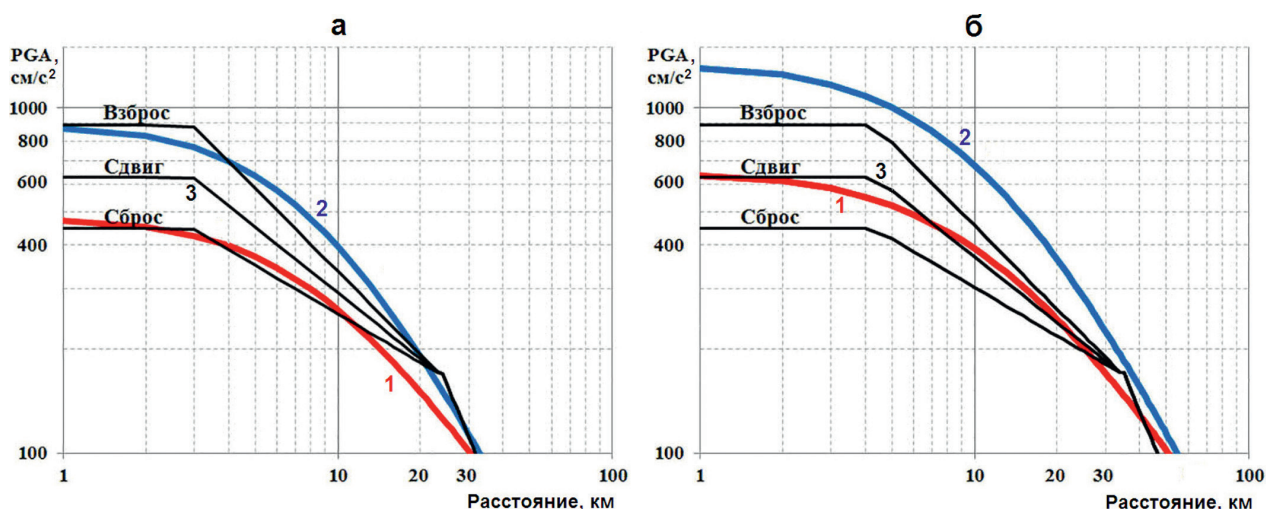


Рис. 9. Средние графики затухания пикового ускорения колебаний грунта PGA с расстоянием от площадки очага для магнитуды  $M_s$ , равной 6,0 (а) и 6,5 (б), полученные по модели затухания А.А. Гусева, пересчитанной по зависимостям (1) и (2) (кривые № 1 и 2 красного и синего цвета соответственно) и по модели затухания Ф.Ф. Аптикаева по зависимостям (8) (кривые № 3 черного цвета)

ного в вероятностном смысле пересчета «дробных» значений балльности в PGA (см/с<sup>2</sup>) по следующим зависимостям, полученным путем интервальной линейной аппроксимации вышеуказанного набора расчетных точек «пиковое ускорение — балльность»:

$$\lg(\text{PGA}) = \begin{cases} 0,72 + 0,12 \cdot I_0 \pm 0,03 & \text{при } 5,5 \leq I_0 < 6,5 \\ -2,19 + 0,57 \cdot I_0 \pm 0,06 & \text{при } 6,5 \leq I_0 < 7,5 \\ -0,90 + 0,40 \cdot I_0 \pm 0,05 & \text{при } 7,5 \leq I_0 < 8,5 \\ 0,27 + 0,26 \cdot I_0 \pm 0,02 & \text{при } 8,5 \leq I_0 < 9,5 \end{cases} \quad (9)$$

где после знаков « $\pm$ » указаны стандартные отклонения.

На рисунке 10, б показан средний график по формулам (9), где отрезки разного цвета соответствуют интенсивности VI, VII, VIII и IX баллов.

Расчетная интенсивность  $I$  для Махачкалы, полученная на основе модели

зон ВОЗ ОСР-2016-В и модели затухания А.А. Гусева, равна 8,6 балла для периода повторяемости 1 000 лет. По соотношениям (9) PGA для этой территории составляет 343 см/с<sup>2</sup>, что весьма близко к оценке PGA, полученной при расчете путем ВАСО с использованием формул (8) (341 см/с<sup>2</sup>).

#### Соотношение расчетной интенсивности и длительности колебаний

При использовании динамических методов расчета на сейсмостойкость широко используются синтезированные акселерограммы, набор требований к которым наиболее четко прописан в нормативно-методических документах [5, 6]. Принципиальными характеристиками при синтезе акселерограммы являются ее длительность и

форма огибающей. По их заданию рекомендации разных нормативных документов существенно расходятся.

В книге Ф.Ф. Аптикаева [1] предложена следующая эмпирическая зависимость для оценки длительности колебаний на фиксированном расстоянии от плоскости разрыва землетрясения с заданной магнитудой:

$$\lg \tau = 0,15 \cdot M_s + 0,5 \cdot \lg R + C_5 + C_6 - 1,3 \pm \sigma, \quad (10)$$

где  $\tau$  — длительность основной фазы колебаний по Ф.Ф. Аптикаеву, с; константа  $C_5 = -0,25$  для взбросов, 0,00 для сдвигов и 0,25 для сбросов; константа  $C_6 = -0,15; 0,00; 0,4$  для грунтов 1-й, 2-й, 3-й категории соответственно;  $\sigma$  — стандартное отклонение,  $\sigma = 0,3$ .

Однако в нашем случае расчетное



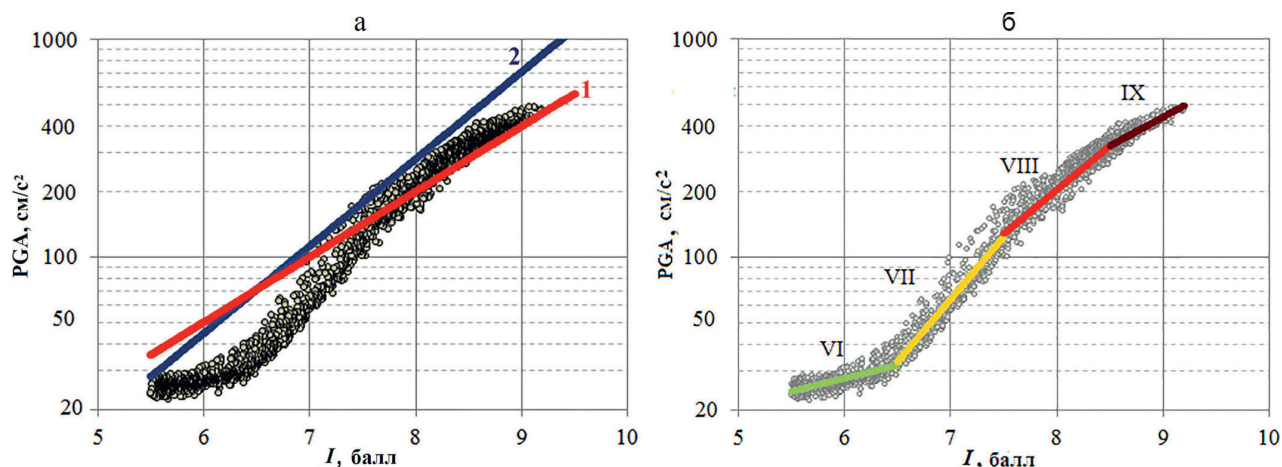


Рис. 10. Сопоставление графиков по формулам (1) и (2) (красная и синяя линия соответственно) с зависимостью между расчетными пиковым ускорением  $PGA$  и балльностью  $I$  для территории Северного Кавказа (точки) (а); результаты VI, VII, VIII и IX баллов (зеленый, желтый, красный и лиловый цвет соответственно) (б)

сейсмическое воздействие не привязано к конкретному сочетанию магнитуды  $M_S$  и расстояния до плоскости разрыва  $R$ , а является интегральной оценкой от всех возможных комбинаций ( $M_S, R$ ) в рамках заложенных моделей зон ВОЗ и сейсмического эффекта.

Учитывая, что в результате ВАСО мы получаем параметры сейсмических воздействий с заданной обеспеченностью, разумно для оценки длительности колебаний использовать тот же подход. Для этого предлагается следующий вариант деагрегационного анализа сейсмической опасности для условной площадки.

1. Если землетрясение синтезированного каталога обеспечивает сотрясение на площадке, равное или большее, чем расчетное (например,  $I = 8,6$  при  $T = 1\,000$  лет для территории Махачкалы), то по формуле (10) рассчитываем длительность колебаний  $\tau(M_S, R)$  с учетом  $\sigma$ .

2. Из полученного набора длительностей набираем статистику количества землетрясений с шагом по интервалам  $\tau$  (то есть для каждого интервала длительности получаем количество землетрясений, вызвавших на площадке сотрясение, равное или большее, чем  $I = 8,6$  при  $T = 1\,000$  лет).

3. Переводим полученные статистические данные в процентные доли от общего количества сотрясений и преобразуем их в кумулятивный вид по принципу меньшей и равной длительности.

В результате рассмотренной процедуры для землетрясения интенсивностью  $I$  при определенном периоде повторяемости  $T$  получаем соответствие длительности колебаний  $\tau$  и ее процентной обеспеченности, то есть вероятности того, что длительность та-

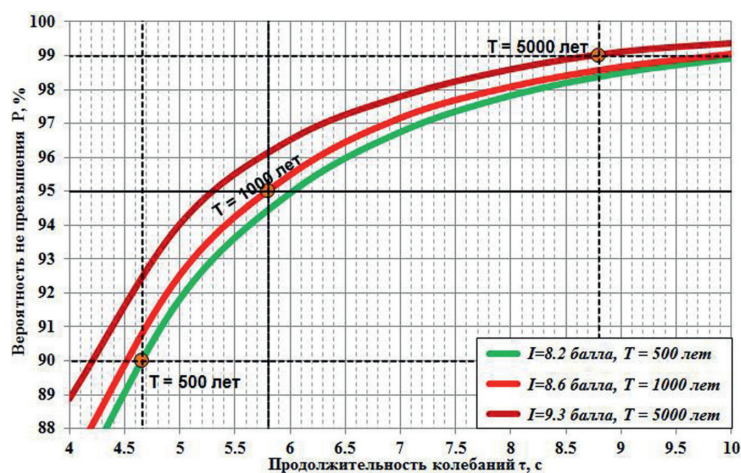


Рис. 11. Расчетные графики длительности сотрясений  $\tau$  для территории города Махачкала

Таблица 2

| Вероятностные оценки сейсмической опасности для территории города Махачкала |                                          |                                    |                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| Период повторяемости $T$ , лет                                              | Расчетная интенсивность $I$ , доли балла | Пиковое ускорение $PGA$ , $cm/c^2$ | Продолжит. колебаний $\tau$ , с |
| 500                                                                         | 8,5                                      | 278                                | 4,7                             |
| 1 000                                                                       | 8,6                                      | 341                                | 5,8                             |
| 5 000                                                                       | 9,3                                      | 491                                | 8,8                             |

кого или более сильного по интенсивности землетрясения не превысит  $\tau$ .

Такие процедуры позволяют получать для исследуемой площадки оценки длительности колебаний  $\tau$  с той же вероятностью непревышения, что и оценки интенсивности или амплитудных параметров.

На рисунке 11 приведены графики для оценивания вероятной длительности колебаний на территории Махачкалы при расчетных интенсивностях сотрясений с периодами повторяемости 500, 1 000, 5 000 лет (вероятностью непревышения в течение 50 лет около 90, 95, 99% соответственно). Принимая для оценок длительности те же значения

обеспеченности, что и для расчетной интенсивности, получаем вероятностные оценки, представленные в табл. 2.

## Выводы

Прямые пересчеты нормативных значений макросейсмической балльности в амплитудные параметры колебаний позволяют получать только приблизительные оценки и не годятся для надежного картирования сейсмической опасности с заданной вероятностью превышения полученных величин.

Более надежными представляются независимые расчеты набора вероятностных карт как в макросейсмической балльности, так и в физических величинах на основе

единой модели зон ВОЗ и индивидуальных моделей сейсмического эффекта.

Общие эмпирические зависимости (4–6; 8) очень удобны для использования в качестве моделей сейсмических эффектов при построении вероятностных карт в амплитудных параметрах. Однако они были получены по общемировой статистике [1]. Средние же региональные зависимости, построенные по тем же принципам, вполне могут отклоняться от общемировых как в большую, так и в меньшую сторону, оставаясь при этом в пределах доверительных интервалов  $\pm\sigma$ . Соответственно, и оценки сейсмической опасности также будут меняться в ту или иную сторону.

Необходимо отметить, что все приведенные в данной работе модели, зависимости и соотношения, полученные другими авторами, используются исключительно для демонстрации возможностей процедуры вероятностного анализа сейсмической опасности, без обсуждения их применимости для территории Северного Кавказа. Схемы, приведенные на рис. 6, полученные оценки для территории города Махачкала и соотношение (9) не претендуют на статус достоверных, а предназначены лишь для демонстрации возможности использования эмпирических зависимостей Ф.Ф. Аптикаева или им подобных при вероятностном анализе

сейсмической опасности. Для получения достоверных региональных зависимостей необходимы представительные базы записей сильных землетрясений региона. В настоящее время единой сети станций сильных движений, достаточной для получения подобной информации, в РФ не существует. Это является одним из основных препятствий для скорого перехода к картированию сейсмической опасности в амплитудных параметрах. 

*Автор глубоко признателен В.И. Уломову, А.А. Гусеву, Ф.Ф. Аптикаеву и М.И. Богданову за полезные обсуждения его исследований и ценные советы.*

### Список литературы

1. Аптикаев Ф.Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности. М.: Наука и образование, 2012. 176 с.
2. Гусев А.А. О принципах картирования сейсмоопасных регионов Российской Федерации и нормирования сейсмических нагрузок в терминах сейсмических ускорений. Часть 1 // Инженерные изыскания. 2011. № 10. С. 20–29.
3. Гусев А.А. О принципах картирования сейсмоопасных регионов Российской Федерации и нормирования сейсмических нагрузок в терминах сейсмических ускорений. Часть 2 // Инженерные изыскания. 2011. № 11. С. 66–77.
4. Гусев А.А., Павлов В.М., Шумилина Л.С. Новый подход к расчетам повторяемости сейсмического воздействия с целью построения карт сейсмического районирования // Современная сейсмология: достижения и проблемы: материалы Научной конференции РФФИ, НГК РФ, НС РАН по проблемам международного десятилетия по уменьшению опасности стихийных бедствий, г. Москва, 7–9 октября 1998 г. М., 1998.
5. МР 1.5.2.05.999.0027-2011. Нормы проектирования атомных станций на сейсмостойкость. М.: ОАО «Концерн Росэнергоатом», 2011.
6. РБ-06-98. Определение исходных сейсмических колебаний грунта для проектных основ. М.: Госатомнадзор России, 1998.
7. Уломов В.И., Богданов М.И., Пустовитенко Б.Г., Перетокин С.А., Стром А.Л., Акатова К.Н., Данилова Т.И., Медведева Н.С. Анализ сейсмической опасности Крыма и Северного Кавказа и адаптация полученных оценок к комплекту карт ОСР-2014 // Инженерные изыскания. 2015. № 13. С. 12–27.
8. 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 сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ, 1999. 57 с.
9. Ulomov V.I., the Working Group of the GSHAP Region 7. Seismic hazard of Northern Eurasia // Annali di Geofisica. 1999. V. 42. P. 1023–1038.

# ГЕОТЕХНИКА

Журнал для изыскателей, проектировщиков и строителей

Цель журнала — ознакомление российских специалистов с передовым отечественным и зарубежным опытом в области геотехники

Периодичность в 2016 году:  
**6 номеров**

Стоимость годовой подписки:  
**3900 рублей**  
[info@geomark.ru](mailto:info@geomark.ru)

