

УДК 624.131.1:551.252

## ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЗАТУХАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ НА НАДЕЖНОСТЬ ОПЕРАТИВНЫХ ОЦЕНОК ПОТЕРЬ ОТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2019 г. Н. И. Фролова<sup>1,\*</sup>, И. П. Габсатарова<sup>2</sup>, Н. В. Петрова<sup>2,\*\*</sup>, А. Н. Угаров<sup>3,\*\*\*</sup>, Н. С. Малаева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт геоэкологии им Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН),  
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия  
\*E-mail: frolovanina7@gmail.com

<sup>2</sup>Единая геофизическая служба РАН (ФИЦ ЕГС РАН),  
Ленина пр., 189, Обнинск, Калужская обл., 249034 Россия  
\*\*E-mail: npetrova@gsras.ru

<sup>3</sup>Центр исследований экстремальных ситуаций (ООО ЦИЭКС),  
Вятская ул., д. 35, Москва, 127015 Россия  
\*\*\*E-mail: garo@esrc.ru

Поступила в редакцию 27.05.2019 г.

Исследованы методы и результаты зонирования сейсмоопасных территорий в Российской Федерации и за рубежом. Выполнен анализ исходных данных, необходимых для реализации процедуры зонирования с целью получить границы участков, отличающихся стабильностью значений параметров затухания сейсмической интенсивности. Разработана процедура зонирования, позволяющая определить границы территорий, в пределах которых такие параметры макросейсмического поля, как коэффициенты уравнения Н.В. Шебалина, угол ориентации осей эллиптических изосейст, а также отношение их полуосей, имеют близкие значения. Приведены примеры выделения зон с квазиустойчивыми параметрами для отдельных регионов, а также калибровки компьютерной модели макросейсмического поля. Рассматриваются примеры зонирования и калибровки при наличии полного набора исходных данных и в условиях их недостаточности. Показана эффективность применения откалиброванных моделей макросейсмического поля в системе “Экстремум” для повышения надежности оперативных оценок потерь от сильных землетрясений.

**Ключевые слова:** землетрясение, потери населения, последствия, база знаний, макросейсмическое поле, калибровка математических моделей, региональные особенности, интенсивность сотрясений, затухание, оперативная оценка потерь.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019523-37>

### ВВЕДЕНИЕ

Оперативная оценка ожидаемых потерь от произошедшего землетрясения, выполняемая с применением автоматизированных информационных систем (ИС), позволяет принимать быстрое и эффективное решение о проведении поисково-спасательных работ, эффективность которых зависит от точности и надежности прогноза параметров обстановки в зоне чрезвычайной ситуации (ЧС).

Анализ большого числа обработанных с использованием ИС данных в оперативном и ретроспективном режимах позволил установить факт зависимости точности и надежности оценок параметров обстановки в зоне ЧС, обусловленной

сильным землетрясением, от значительного числа факторов [14–16, 20].

Факторы удобно разделить на три большие группы [21]:

1. “очаг” — группа, включающая возможные ошибки координат эпицентра, глубины, магнитуды, описания механизма очага, в том числе ориентацию разрыва в очаге;

2. “поле” — группа, включающая неточности в описании анизотропии макросейсмического поля, проявляющиеся в некорректном учете изменчивости затухания интенсивности вдоль и вкрест горных структур, а также протяженных очагов;

3. “уязвимость” – группа, характеризующая погрешности ее математического описания для элементов риска (зданий и сооружений, населения).

Цель работ, результаты которых представлены в данной статье, – уменьшение степени влияния групп факторов на прогноз потерь, повышение его точности и надежности – может быть достигнута в процессе калибровки математических моделей ИС применительно к зонам, отличающимся своими свойствами.

Зонирование территории – один из важнейших этапов процесса калибровки моделей. Собственно калибровка математических моделей, реализованных в ИС, – итерационный процесс определения границ зон, которым ставится в соответствие набор усредненных параметров, обеспечивающих заданную точность и надежность оценки обстановки в районе, пострадавшем от землетрясения [13-15, 20].

Не принижая значения групп факторов “очаг” и “уязвимость”, в настоящей статье основное внимание уделяется исследованию параметров группы факторов “поле”.

Учет региональных особенностей затухания сейсмической интенсивности при оперативной оценке потерь рассматривался ранее в публикациях [13, 15, 16]. На ряде примеров для отдельных землетрясений мира, стран СНГ и России показано, что калибровка моделей дает значительный эффект повышения точности и надежности результата при оперативной оценке потерь от землетрясений. Принимая данный факт во внимание, различные исследователи стремятся организовать международное сотрудничество для сбора и обобщения калибровочной информации, в качестве которой особую ценность представляют результаты полевых обследований районов сильных землетрясений, в том числе макросейсмическая информация.

В последнее время активизируется процесс организации баз данных (БД), содержащих такую информацию. Опубликован ряд атласов изосейст с описанием сильных и ощутимых землетрясений, содержащих макросейсмическую информацию за период с древнейших времен до начала 2000-х годов [6, 19]. Созданы БД, содержащие результаты макросейсмических наблюдений, например, электронная база макросейсмической информации “GeoInt” для республики Грузии [24]. Был подготовлен Итальянский параметрический каталог землетрясений [22], включающий макросейсмические данные, актуализируемые в настоящее время в рамках соглашения INGV-DPC 2012-2021.

В ФИЦ ЕГС РАН в рамках подготовки ежегодников “Землетрясения России” и “Землетрясения Северной Евразии” на регулярной основе осуществляются сбор и обработка материалов обследования последствий землетрясений России и стран СНГ, которые в настоящее время составляют основную долю макросейсмической информации в БД “Сильные и ощутимые землетрясения России и сопредельных стран” (БД СиОЗР). В ней содержится несколько каталогов, формируемых из разных источников, что позволяет для выбранного землетрясения иметь различные, иногда альтернативные, требующие уточнения наборы основных параметров. В БД СиОЗР включены таблицы макросейсмических проявлений ощутимых землетрясений в населенных пунктах, растровые и цифровые карты изосейст, библиографические ссылки и публикации. В настоящее время в ней содержится полный комплект макросейсмических данных из ежегодников “Землетрясения Северной Евразии” за 1992-2012 гг., а также данные о проявлениях отдельных землетрясений за разные годы из других источников.

Накопленный материал позволил перейти к обобщению информации с целью выделения зон с “квазиустойчивыми” параметрами макросейсмического поля, к которым следует отнести:

- коэффициенты уравнения макросейсмического поля;
- отношение большой  $b$  и малой  $a$  осей эллиптических изосейст высших баллов (коэффициент сжатия  $k$ );
- угол, задающий ориентацию макросейсмического поля, в частности азимут большой оси эллипса вытянутости изосейст.

Несмотря на выполненный объем работ, актуальность исследований в области повышения точности и надежности моделей ИС сохраняется. Значительный прогресс в накоплении и анализе данных макросейсмических наблюдений не позволяет “поставить точку” в исследованиях, так как для многих регионов ощущается недостаток информации для адекватного моделирования затухания интенсивности  $I$ . Пользователи ИС часто допускают грубые ошибки при оперативных оценках потерь, что обусловлено использованием общих, усредненных для больших территорий коэффициентов уравнения макросейсмического поля.

Для исключения грубых ошибок в оперативной оценке потерь целесообразно представить калибровку моделей ИС как итерационный процесс, позволяющий на каждом шаге, обусловленном заметным сейсмическим событием и прогнозом его последствий, вносить изменения в калибровочные коэффициенты моделей и изменять границы квазиустойчивых зон.

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ЗОН С КВАЗИСТАБИЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ПОЛЯ

Базовая информационная основа для настоящего исследования – материалы, полученные при подготовке и составлении карт сейсмического районирования территории СССР и Российской Федерации [10-12, 17, 18]; параметры макросейсмического поля, азимуты простираания очагов сильнейших землетрясений из Унифицированного (УКЗ) и Специализированного (СКЗ) каталогов землетрясений Северной Евразии [11] и карты зон ВОЗ в виде линейментов и доменов [12], а также опубликованные результаты исследования уравнений макросейсмического поля в отдельных регионах.

Для большинства регионов бывшего СССР в [17, 18] были предложены коэффициенты уравнения макросейсмического поля Н.В. Шебалина (табл. 1, рис. 1), установленные на основе анализа макросейсмических данных наиболее надежных опорных землетрясений:

$$I = bM - v \lg r + c, \quad (1)$$

**Таблица 1.** Коэффициенты уравнения макросейсмического поля для регионов бывшего СССР [17, 18]

Регион		$b$	$v$	$c$
I	Карпаты	1.5	3.5	3.0
IIa	Крым и Нижняя Кубань	1.5	3.5	3.0
IIб	Кавказ			
	Северный Кавказ	1.6	3.1	2.2
	Дагестан	1.5	3.6	3.1
	Закавказье	1.4	3.5	4.2
	Азербайджан	1.4	3.5	3.5
IIв	Туркмения	1.5	3.8	3.5
III	Средняя Азия и Казахстан	1.5	3.5	3.0
IV	Алтай и Саяны	1.5	3.5	3.0
V	Прибайкалье	1.5	4.0	4.0
VI	Якутия и Северо-Восток	1.5	3.5	3.0
VII	Приморье и Приамурье	1.5	3.5	3.0
VIII	Сахалин	1.6	4.3	3.3
IX	Курилы	1.5	4.5	4.5
X	Камчатка	1.5	$v_0=2.63$ $\rho=0.0087$	2.5
X	Чукотка	1.5	3.5	3.0
XII	Арктический бассейн	-	-	-
XIII	Балтийский щит	1.5	3.5	3.0
XIV	Европейская часть СССР, Урал и Западная Сибирь	1.5	3.5	3.0

где  $r$  – гипоцентральное расстояние, определяемое по формуле:  $r = \sqrt{\Delta^2 + h^2}$ ,  $\Delta$  – эпицентральное расстояние, км;  $h$  – глубина очага, км;  $M$  – магнитуда землетрясения;

$b$ ,  $c$ ,  $v$  – региональные коэффициенты уравнения макросейсмического поля.

Для Камчатки из-за оскутмости землетрясений на больших расстояниях в [17] была принята формула типа Ковеслигети, учитывающая поглощение:

$$I = 1.5M - 2.63 \lg r - 0.0087r + 2.5. \quad (2)$$

По мере накопления макросейсмических данных об оскутмых землетрясениях значения коэффициентов  $b$ ,  $v$ ,  $c$  в ф. (1) уточнялись для отдельных сейсмоактивных регионов России и других стран. При этом в каждом регионе либо проверялась применимость их средних значений  $b=1.5$ ;  $v=3.5$ ;  $c=3.0$ , либо проводилось специальное исследование с целью определения их региональных значений. Зачастую данные разных авторов были противоречивыми. Поэтому одной из задач данного исследования являлась проверка актуальности установленных ранее значений региональных коэффициентов уравнения макросейсмического поля по материалам, содержащимся в БД СиОЗР.

### Проверка и уточнение коэффициентов уравнения макросейсмического поля

На основании имеющихся в БД СиОЗР данных обследований сильных землетрясений за период 1992-2012 гг. проведен расчет коэффициентов макросейсмического поля для различных регионов бывшего СССР. Для каждого землетрясения с использованием разработанных ранее подходов [10, 17, 18] строились кривые затухания интенсивности сотрясений в населенных пунктах и подбирались коэффициенты в ф. (1), наилучшим образом удовлетворяющие эмпирическим данным.

Обобщение полученных данных иллюстрируется на примере районов Кавказа (рис. 2, табл. 2). По Кавказу собраны сведения об оскутмости в 1850 населенных пунктах 32 сильных землетрясений ( $I_0 \geq 6-7$  баллов по шкале MSK-64) за 1966-2012 гг., построены графики затухания, рассчитаны индивидуальные для каждого землетрясения и средние для районов (см. рис. 2) параметры уравнения (1). Наиболее уверенные результаты получены для Дагестанской зоны (см. табл. 2).

Осредненные данные о затухании сейсмической интенсивности при 8 современных землетрясениях подтверждают коэффициенты уравнения макросейсмического поля для Дагестана, предложенные в [18] (см. табл. 2).

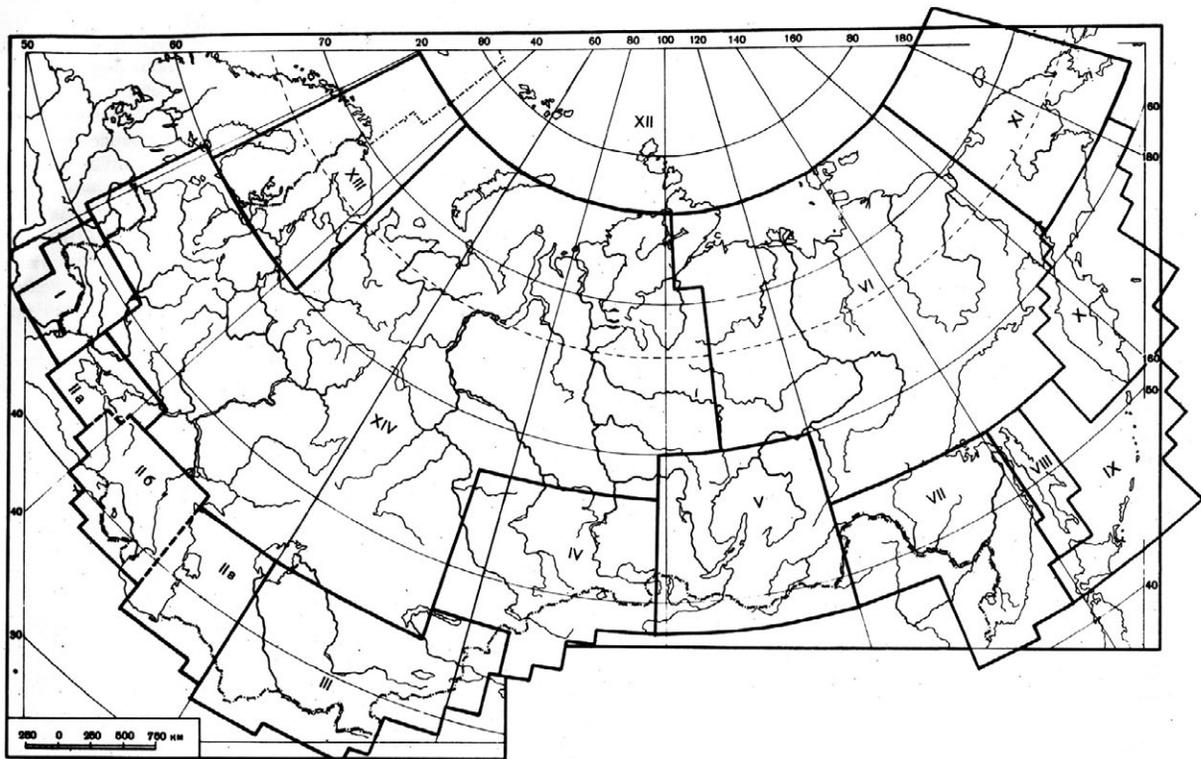


Рис. 1. Границы регионов бывшего СССР, для которых определены коэффициенты уравнения макросейсмического поля Н.В.Шебалина [18], табл. 1.

Полученные значения коэффициентов уравнения макросейсмического поля для всех исследованных зон суммированы в табл. 3.

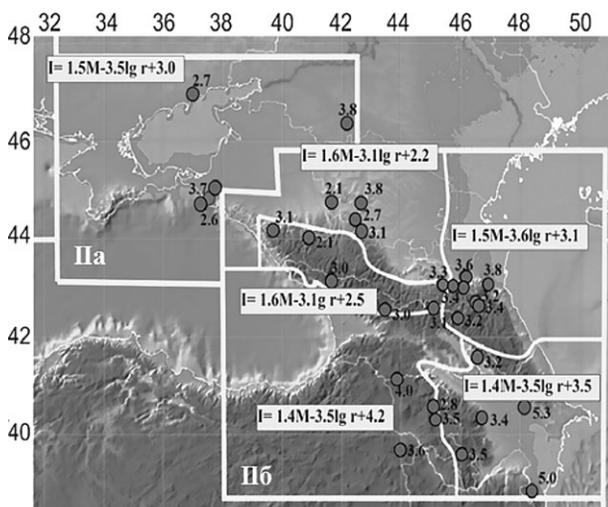


Рис. 2. Положение эпицентров землетрясений в рамках регионов IIa (Крым и Нижняя Кубань) и IIб (Кавказ, с подразделением на районы Северного Кавказа, Большого Кавказа, Дагестана, Закавказья и Азербайджана). На белом фоне в рамках показаны уравнения Шебалина из [18], кружками показаны землетрясения и полученные для них коэффициенты затухания  $\nu$ .

На основе проведенного исследования получено наилучшее соответствие эмпирических данных установленным ранее региональным законам затухания для Сахалина, где была проделана большая работа по уточнению коэффициентов макросейсмического поля. Имеются и значительные отклонения от полученных ранее региональных зависимостей, например, в Байкальском регионе. Так, для хорошо обследованного Култукского землетрясения (322 пункта), произошедшего 27.08.2008 г. с  $M_s = 6.2$  в Прибайкалье, получен необычно низкий для Байкальского региона коэффициент затухания ( $\nu = 3.0$ ), который подтверждается макросейсмическими данными двух ближайших землетрясений — Еловского (29.06.1995) с  $M_s = 5.8$  (139 пунктов) и Южнобайкальского (25.02.1999) с  $M_w = 6.0$  (154 пункта). На юго-востоке Прибайкалья в малообследованном районе Приаргунья, по данным о самом сильном здесь Аргунском землетрясении (22.07.2011) с  $M_w = 4.5$  (35 пунктов), наметилась зона с очень низким затуханием ( $\nu = 2.7$ ). Для остальных байкальских землетрясений коэффициенты затухания ниже регионального  $\nu = 4.0$ .

В соседнем Алтае-Саянском регионе, наоборот, значения  $\nu$  оказались несколько выше, чем в применяемом здесь общем уравнении Н.В. Шебалина

( $\nu=3.5$ ), особенно при Тувинском землетрясении (26.02.2012;  $\nu=4$ ; 280 пунктов).

Для Олюторского землетрясения (20.04.2006,  $M_s=7.7$ ), произошедшего в малонаселенной местности на севере Камчатки, получен очень высокий коэффициент затухания  $\nu=4.55$  (37 пунктов) по сравнению с региональными уравнениями для Чукотки и Камчатки.

На основе данных табл. 3, обобщающей значения полученных авторами в разных регионах коэффициентов уравнения макросейсмического поля, сделаны выводы:

- с учетом доверительных интервалов средних значений коэффициентов полученные данные подтверждают значения коэффициентов в региональных уравнениях макросейсмического поля, приведенных в табл. 1 [18], и возможность их использования для регионов Алтая и Саян, Средней Азии и Казахстана, Сахалина, Северного Кавказа, Закавказья, Дагестана, Крыма и Кубани;

- для Прибайкалья получено более низкое затухание, чем в региональном уравнении  $I=1.5M-4\lg r+4$ , и средние коэффициенты, близкие к таковым в общем уравнении Шебалина  $I=1.5M-3.5\lg r+3$ , т.е. это уравнение более предпочтительно при аппроксимации макросейсмических данных землетрясений Прибайкалья;

- для Туркмении, при близости полученного коэффициента затухания ( $\nu=3.7$ ) к региональному ( $\nu=3.8$ ), установлены более низкие значения коэффициента  $c=2.87$  по сравнению с региональным уравнением ( $c=3.5$ ) с разницей на границе доверительного интервала;

**Таблица 2.** Параметры уравнения макросейсмического поля для Дагестана по отдельным землетрясениям и их средние значения

Землетрясение	$b$	$\nu$	$c$
Аргунское, 02.03.1966, $M_s=4.9$ , $I_0=7$	1.5	3.38	3.58
Дагестанское, 14.05.1970, $M_s=6.6$ , $I_0=9$	1.5	3.76	2.88
Безгинское, 4.08.1974, $M_s=5.0$ , $I_0=7$	1.5	3.17	2.88
Киятлинское, 13.11.1974, $M_s=4.7$ , $I_0=7$	1.5	3.40	2.80
Курчалойское, 11.10.2008, $M_s=5.6$ , $I_0=7-8$	1.5	3.60	3.1
Кизилюртовское, 31.01.1999, $M_s=5.5$ , $I_0=7$	1.5	3.74	3.78
Черногорское, 28.07.1976, $M_s=6.2$ , $I_0=8-9$	1.5	3.31	2.10
Тлохское, 15.02.1992, $M_s=4.7$ , $I_0=7$	1.5	4.58	4.16
<b>Среднее значение</b>	<b>1.5</b>	<b>3.62</b>	<b>3.16</b>
Стандартное отклонение		$\pm 0.24$	$\pm 0.36$
Уравнение Шебалина для Дагестана (см. табл. 1)	<b>1.5</b>	<b>3.6</b>	<b>3.1</b>

- для Камчатского региона на примере трех землетрясений показана возможность использования уравнения макросейсмического поля для Курил ( $I=1.5M-4.5\lg r+4.5$ );

- для уточнения и детализации уравнений макросейсмического поля в более мелких районах в пределах регионов, представленных в табл. 1 и на рис. 1, требуется больше исходных данных, чем имеющихся на данный момент в БД СиОЗР, поэтому детализация и уточнение будут проводиться по мере их накопления.

### *Исследование азимута разрыва и ориентации изосейст*

В ходе работ по сейсмическому районированию территории бывшего СССР и России созданные для этой цели Унифицированный каталог землетрясений Северной Евразии (УКЗ) и Специализированный каталог землетрясений Северной Евразии (СКЗ) [11] были дополнены данными о протяженности и ориентации очагов крупных землетрясений с  $M_s \geq 6.8$  и адаптированы к использованию в географических информационных системах (ГИС).

При визуализации УКЗ средствами ГИС на экране отображаются зоны ВОЗ (домены) и очаги землетрясений белыми эллипсами разного размера с цифрами, соответствующими азимуту направления разрыва. Отдельные эпицентры группируются и имеют близкие значения азимута разрыва.

Начаты работы по уточнению ориентации макросейсмического поля на Кавказе. В качестве основы также взяты домены и сейсмолинеаменты, заимствованные с карты ОСР [12], а также азимуты направления разрывов сильнейших землетрясений из УКЗ и СКЗ (показаны серыми эллипсами на рис. 3). Эти данные дополнены сведениями об азимутах вытянутости изосейст 35 землетрясений Кавказа за период 1988-2009 гг. из БД СиОЗР (белые эллипсы на рис. 3). Для большей части землетрясений ориентация эллипсов согласуется с направлением сейсмолинеаментов.

Подобные работы проведены для регионов IIв (“Туркмения”), III (“Средняя Азия и Казахстан”) и IV (“Алтай и Саяны”), представленных в табл. 1 и на рис. 1.

### *Исследование отношения большой и малой осей эллиптических изосейст высших баллов (коэффициента сжатия $k$ )*

К.М. Мирзоев и Р.У. Джураев [7] для обширного региона Средней Азии на основе богатого эмпирического материала предложили простые зави-

Таблица 3. Коэффициенты уравнения макросейсмического поля, полученные авторами

Регион	Уравнения макросейсмического поля (1) и (2) с региональными коэффициентами по [18]	Новые осредненные коэффициенты в уравнении (1)			Число исследованных землетрясений
		<i>b</i>	<i>v</i>	<i>c</i>	
Байкал	$I=1.5M - 4 \lg r + 4$	1.5	3.44 (±0.16)	3.13(±0.6)	9
Алтай и Саяны	$I=1.5M - 3.5 \lg r + 3$	1.5	3.73 (±0.19)	3.69(±0.63)	5
Туркменистан	$I=1.5M - 3.8 \lg r + 3.5$	1.5	3.72 (±0.25)	2.87(±0.63)	5
Центральная Азия и Казахстан	$I=1.5 M - 3.5 \lg r + 3$	1.5	3.6 (±0.33)	2.84 (±0.99)	8
Камчатка	$I=1.5 M - 2.63 \lg r - 0.0087r + 2.5$ $I=1.5M - 4.6 \lg r + 5.3$	1.5	4.42 (±0.17)	4.26 (±0.73)	3
Сахалин	$I=1.6M - 4.3 \lg r + 3.3$	1.6	4.43 (±0.21)	2.90 (±0.43)	6
Крым и Кубань	$I=1.5M - 3.5 \lg r + 3$	1.5	3.29 (±0.53)	2.94 (±0.76)	5
Северный Кавказ	$I=1.6M - 3.1 \lg r + 2.2$	1.5	3.1 (±0.36)	2.23 (±0.47)	11
Закавказье	$I=1.4M - 3.5 \lg r + 4.2$	1.4	3.4 (±0.36)	3.91 (±0.47)	4
Дагестан	$I=1.5M - 3.6 \lg r + 3.1$	1.5	3.62 (±0.24)	3.16 (±0.36)	8

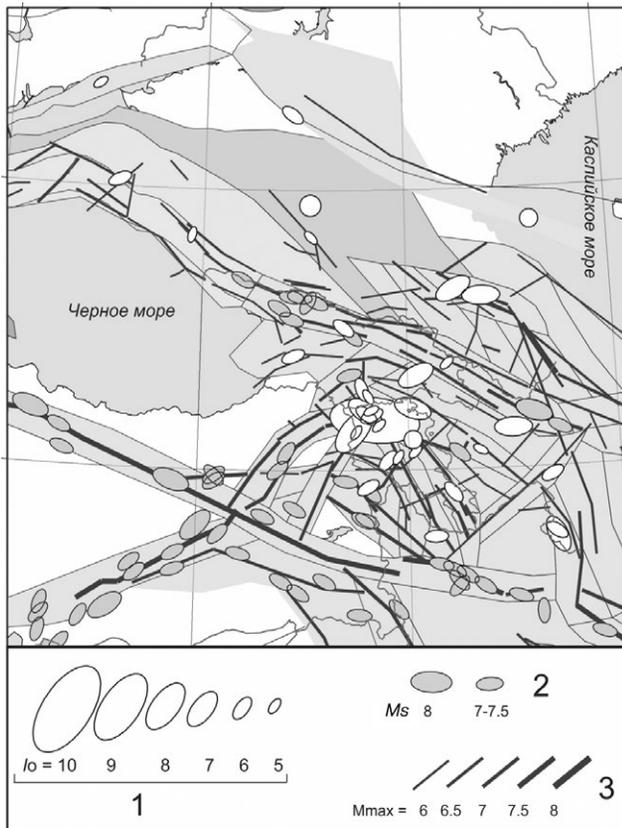


Рис. 3. Фрагмент карты зон ВОЗ для Кавказа, дополненной сведениями об ориентации первых изосейст (белые эллипсы) и разрывов в очагах землетрясений из [11] (серые эллипсы); 1 – интенсивность в эпицентре и ориентация 1-й изосейсты; 2 – магнитуда землетрясения и ориентация разрыва по комплексу данных; 3 – сейсмолинеаменты с градацией по сейсмическому потенциалу  $M_{max}$ .

симости коэффициента сжатия *k* от балльности для разных землетрясений и разработали палетки для построения карт изосейст землетрясений разной магнитуды и для разных глубин очагов. Как показала практика использования этих зависимостей, они оказались справедливы и для других сейсмоопасных регионов. Полученная авторами информация дополнила эти данные.

Для Кавказа на основании данных по 34 землетрясениям построены зависимости *k* от интенсивности в эпицентре, магнитуды и глубины. Четкого соотношения установить не удалось. Но отмечено, что в основном значения *k* лежат в интервале 1.1-2.1 и вполне описываются средним значением  $k=1.5$  вне зависимости от интенсивности в эпицентре, магнитуды и глубины. Однако некоторые землетрясения, произошедшие в Закавказье и Азербайджане, с повышенными значениями  $k=3.0-5.4$  первых изосейст (например, Ленинанканское (22.10.1926,  $M_s=5.8$ ), Спитакское (7.12.1988,  $M_s=6.9$ ), Ереванское (1.03.1997,  $M_s=3.8$ ), Ноемберянское (18.07.1997,  $M_s=4.4$ ), Игдыр-Догубаязитское (1.07.2004,  $M_s=4.8$ ), Сисианское (13.03.2005,  $M_s=4.0$ ) нуждаются в дополнительном исследовании. Для этого БД СиОЗР будет дополнена данными об ощутимых землетрясениях Армении из [19].

Зависимость средних для первых 3 изосейст значений  $k_3$  от балльности в эпицентре  $I_0$ , магнитуды по поверхностной волне  $M_s$  и глубины гипоцентра, определенные по инструментальным и макросейсмическим данным в Копетдаг-Каспийском регионе (“Туркмения”, см. табл. 1,

рис. 1), позволила выявить незначительную тенденцию роста  $k$  с магнитудой и интенсивностью в эпицентре с низкими коэффициентами корреляции 0.44 и 0.36 соответственно. Для землетрясений с  $I_0 \geq 6$  и  $M_s > 4.5$  эта тенденция практически незаметна. Зависимости  $k$  от глубины гипоцентра по макросейсмическим  $h_m$  и инструментальным  $h_i$  данным имеют очень низкие коэффициенты корреляции, на основании чего нельзя сделать вывод об их существовании. Поэтому в выделенных на территории Копетдаг-Каспийского региона зонах анализировались только значения  $k$  для землетрясений с  $I_0 \geq 6$  баллов, вне их зависимости от параметров  $I_0$ ,  $M$ ,  $h$ .

### ВЫДЕЛЕНИЕ ЗОН С КВАЗИСТАБИЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ МАКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ПОЛЯ В КОПЕТДАГ-КАСПИЙСКОМ РЕГИОНЕ

В настоящее время работы по выделению географических зон с квазиустойчивыми параметрами макросейсмического поля с использованием вышеописанных данных и подходов получили наибольшее развитие для Кавказа и Копетдаг-Каспийского региона. Проиллюстрируем последовательность и результаты проведения таких работ в Копетдаг-Каспийском регионе (зона Пв на рис. 1).

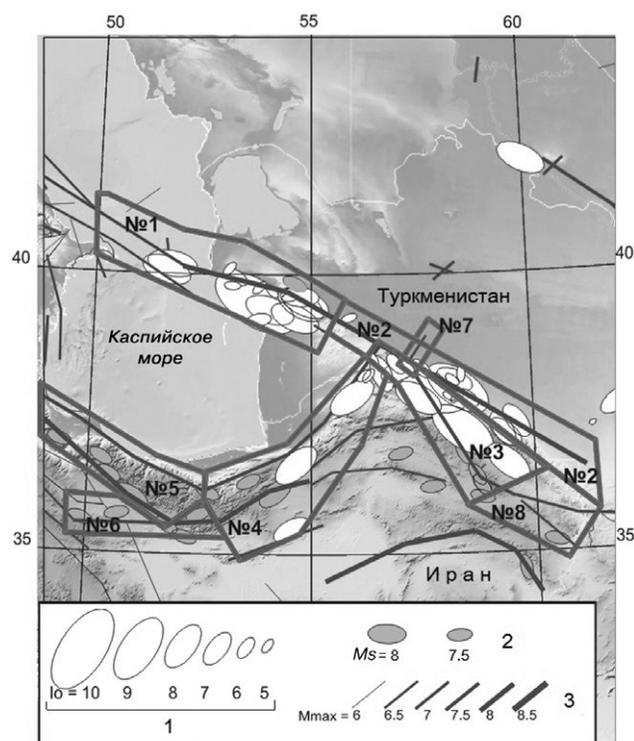
Результаты уточнения коэффициентов макросейсмического поля по Копетдаг-Каспийскому региону в границах  $\varphi=35-43^\circ\text{N}$ ,  $\lambda=51-60^\circ\text{E}$  приведены в табл. 3 (“Туркменистан”). Более дробное деление региона по параметрам уравнения (1) пока представляется нецелесообразным из-за недостатка выверенных данных о проявлениях землетрясений в населенных пунктах.

Для выделения зон с квазиустойчивыми параметрами  $k$  и азимутов (Az) использованы сведения об азимутах очагов сильных землетрясений с  $M_s \geq 6.8$ , содержащиеся в каталоге УКЗ [11]. Согласно представлениям Н.В. Шебалина [17, 18], размер и ориентация разрыва в очаге напрямую связаны с параметрами 1-й изосейсты, поэтому данные [11] были использованы для уточнения преимущественной ориентации макросейсмического поля наряду с макросейсмическими данными.

По Копетдаг-Каспийскому региону в БД СиОЗР собран наиболее полный комплект оцифрованных карт изосейст (59) с исторических времен по 2010 г. Источниками данных послужили опубликованные карты изосейст землетрясений региона, построенные в большинстве случаев Г.Л. Голинским [3, 8] с применением подходов Н.В. Шебалина. Собранные по данному региону изосейсты имеют близкую к эллипсу форму, поэтому для них без проблем были определены длины большой ( $b$ )

и малой ( $a$ ) осей в километрах, а также азимуты (Az) большой оси эллипса, отсчитанные по часовой стрелке от направления на север. Учитывая ненадежность проведения 1-й изосейсты из-за недостатка макросейсмических данных в случаях, когда землетрясение произошло в малонаселенном районе, выбранные для выделения зон квазиустойчивых параметров значения  $k$  и Az анализировались как для 1-й изосейсты ( $k_1$ ), так и для средних значений  $k$  для первых 3 изосейст ( $k_3$ ).

На первом этапе проводился анализ ориентации макросейсмического поля по параметрам Az. На карте (рис. 4) серыми эллипсами показана ориентация разрывов в очагах сильных землетрясений по данным [11] и белыми – первых изосейст. Размеры эллипсов, пропорциональные магнитудам  $M_s$  или интенсивностям в эпицентре  $I_0$ , выбраны условно. Выделены границы зон с близкими параметрами Az. Для каждой зоны определены средние значения Az, характеризующие предполагаемую ориентацию оси минимального затухания интенсивности сотрясений (табл. 4).



**Рис. 4.** Зоны с близкими параметрами Az, выделенные по данным об ориентации первых изосейст землетрясений Копетдага и разрывов в очагах сильных землетрясений из [11]. 1 – интенсивность в эпицентре и ориентация 1-й изосейсты; 2 – магнитуда землетрясения и ориентация разрыва по комплексу данных; 3 – сейсмолинеаменты с градацией по сейсмическому потенциалу  $M_{\max}$ .

### КАЛИБРОВКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ “ЭКСТРЕМУМ”

Полученные авторами результаты, фиксирующие региональные особенности затухания сейсмической интенсивности, представленные в предыдущих разделах, были использованы для калибровки математических моделей ИС “Экстремум”. Цель калибровки – повышение надежности оперативных оценок ущерба и потерь. Поскольку калибровка – итерационный и довольно сложный циклический процесс определения границ зон и вычисления для них приемлемых квазистабильных параметров, то по мере накопления данных о новых событиях могут измениться и сами параметры, и границы зон, в пределах которых они были ранее выделены. Приемлемые параметры модели затухания должны обеспечить заданную точность оценки интенсивностей, а границы калибровочных зон – высокую надежность при выборе соответствующей записи из списка параметров, в том числе с учетом возможных ошибок в координатах эпицентра события, анализируемого в оперативном режиме.

В разделе приводятся примеры калибровки при наличии полного и сокращенного наборов данных. Для оценки эффективности использования откалиброванных моделей выполнены расчеты потерь для отдельных регионов России, стран СНГ и сопредельных государств. Показана процедура подбора приемлемых значений параметров математической модели затухания сейсмической интенсивности:

- коэффициентов уравнения макросейсмического поля (1);
- коэффициентов сжатия эллипса  $k = b/a$ ;

**Таблица 4.** Средние параметры  $A_z$  и  $k$  землетрясений с интенсивностью  $I_0 \geq 6$  баллов

Номер зоны	$A_z$	$N$	$k_1 = b/a$	$N_1$	$k_3 = b/a$	$N_3$
1	116	13	1.96	9	1.85	9
2	132	11	1.99	7	2.06	5
3	143	13	1.74	7	1.64	7
4	57	6	1.7	3	1.70	3
5	117	6				
6	92	4				
7	69	1	1.6	1	1.50	1
8	105	2				

$N$ ,  $N_1$ ,  $N_3$  – соответственно число событий, участвовавших в определении  $A_z$ ,  $k_1$ ,  $k_3$ .

- углов, определяющих ориентацию большой оси эллиптических изосейст макросейсмического поля.

Представлены границы зон, в пределах которых значения параметров математических моделей затухания сейсмической интенсивности будут квазистабильными.

Для контроля качества калибровки выбраны:

- Дагестанское землетрясение (14.05.1970,  $M_s=6.5$ );
- Боджнурдское землетрясение (4.02.1997,  $M_w=6.5$ );
- Тувинское землетрясение (27.12.2011,  $M_s=6.6$ );
- Суусамырское землетрясение (19.08.1992,  $M_s=7.5$ ).

Контроль осуществлялся путем совмещения наблюдаемых и расчетных значений сейсмической интенсивности. Приемлемым значением разности интенсивностей считались величины, не превышающие 0.5 баллов для изосейст, считающихся ущербобразующими.

При включении контрольного события в группу исходных данных для калибровки параметры и границы зон могут быть изменены. Изменяя варианты входных данных, достигается минимум суммы разностей зарегистрированных интенсивностей и полученных путем моделирования. Параметры, при которых добиваются минимального расхождения значений интенсивностей, могут быть использованы в качестве калибровочных значений, характеризующих выбранную зону.

Контрольные события взяты из зон, сформированных на основе наборов данных, характеризующих разную степень макросейсмической изученности территорий. Дагестанское землетрясение принадлежит зоне (см. рис. 2), для которой калибровочные коэффициенты уравнения поля Н.В. Шебалина были уточнены. Боджнурдское землетрясение принадлежит к зоне №3 (см. рис. 4), для которой был определен полный набор квазистабильных параметров. Тувинское землетрясение произошло в Алтае-Саянском районе, для которого в результате исследований авторов были уточнены коэффициенты затухания (см. табл. 3). Суусамырское землетрясение произошло в зоне, для которой на основе данных каталога В.И. Уломова однозначно выделяется ориентация эллипсов макросейсмического поля.

Все контрольные события – значительные землетрясения, приведшие к ощутимым социальным и экономическим последствиям в рассматриваемых регионах.

Расчеты последствий Дагестанского землетрясения проводились для параметров очага: 43.0°N; 47.09°E;  $M_s=6.5$ ;  $h=13$  км [4]. Использовались коэффициенты уравнения макросейсмического поля для Дагестана (см. табл. 3), и для сравнения рассматривались другие региональные коэффициенты:

- $b=1.6$ ;  $v=3.1$ ;  $c=2.2$  для Северного Кавказа [18];
- $b=1.4$ ;  $v=3.5$ ;  $c=4.2$  для Закавказья [18];
- $b=1.52$ ;  $v=3.6$ ;  $c=1.6$  для Дагестана [2];
- $b=1.5$ ;  $v=4$ ;  $c=3.8$  для Юго-Восточной Европы и Ближнего Востока.

Рассматривались 4 значения коэффициента  $k$ : 1.2; 1.6; 2.0; 2.7.

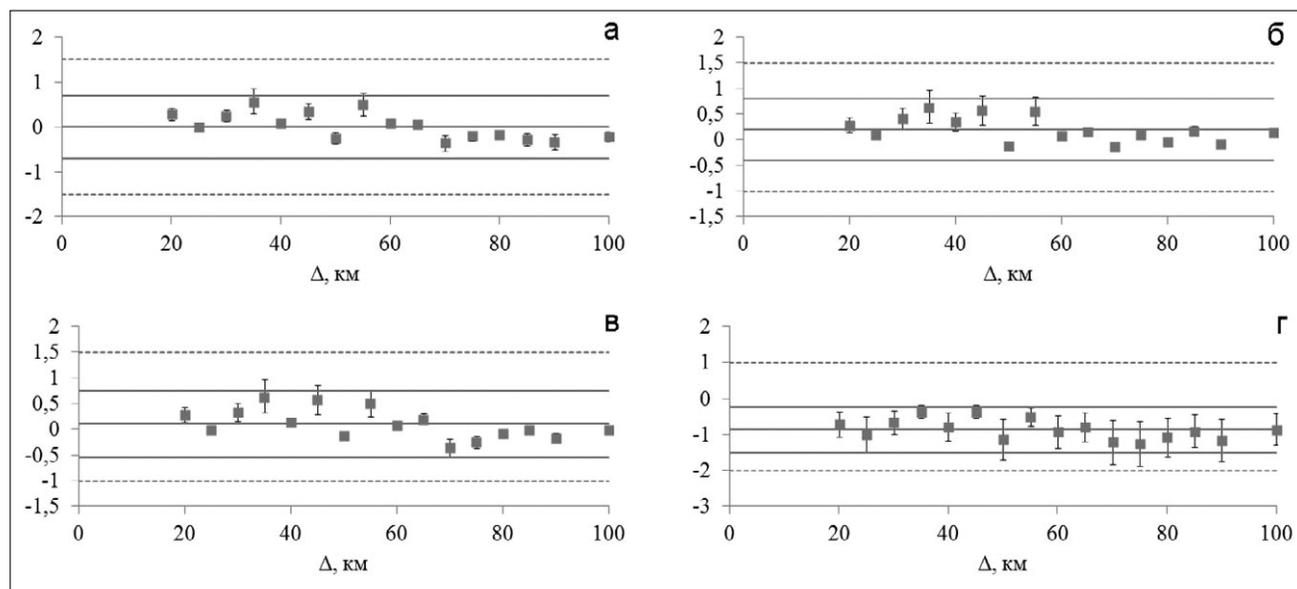
На рис. 5 показаны отклонения расчетных значений  $I$  для разных вариантов исходных данных. Осредненные разницы на участках в 5 км показаны серыми точками. Анализ результатов сравнения наблюдаемых и расчетных значений интенсивности показывает, что наименьшие расхождения наблюдаются при использовании уравнения Н.В. Шебалина для Дагестана [18]  $b=1.5$ ;  $v=3.6$ ;  $c=3.1$  с разными значениями коэффициента сжатия  $k$  и ориентацией вдоль разломов (рис. 5а, б, в). Сильное занижение расчетных значений интенсивности по сравнению с наблюдаемыми (рис. 5 г) получено на расстояниях более 50 км при использовании коэффициентов для Дагестана [2].

Коэффициенты  $b=1.5$ ;  $v=3.6$ ;  $c=3.1$  также были получены для Курчалойского землетрясения

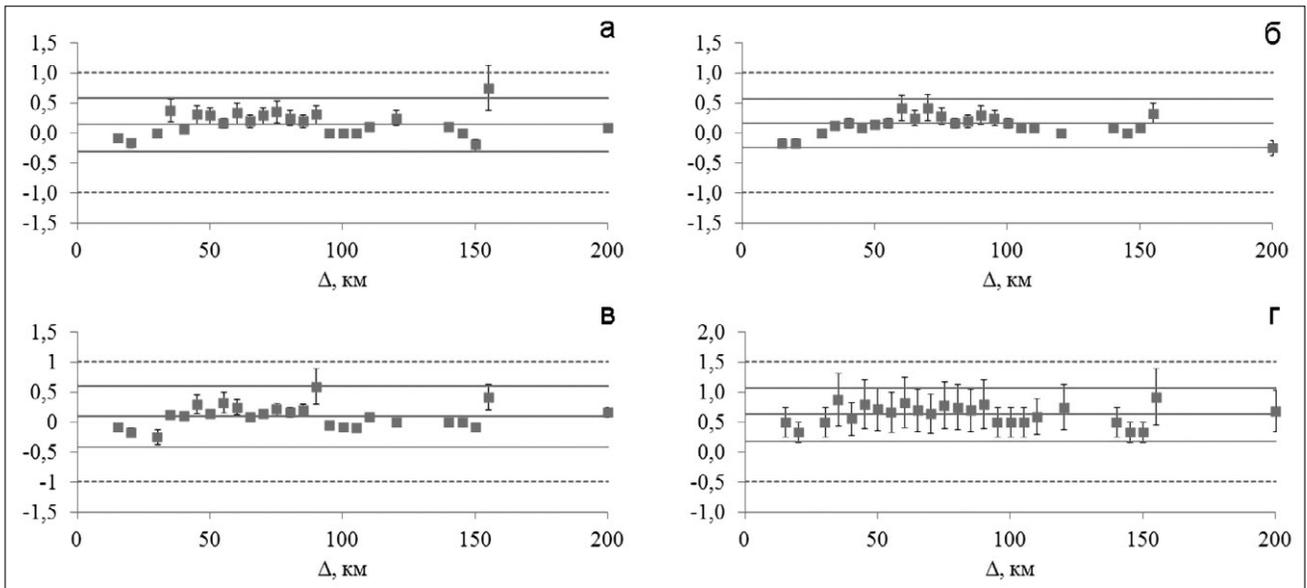
по характеру изменения наблюдаемого макросейсмического эффекта на местности [1]. Вместе с доводами Е.А. Рогожина, характеризующего тектоническую позицию очага Курчалойского землетрясения [9], эти факты могут служить основанием расширения зоны Дагестанского клина на восток и выделения общей зоны с квазистабильными параметрами затухания сейсмической интенсивности в этом районе Кавказа.

В случае Боджнурдского землетрясения расчеты последствий проводились для параметров очага: 37.79°N; 57.42°E,  $M_w=6.5$ ;  $h=25$  км [3]. В вариантах, представленных на рис. 6а, б, в, использовались коэффициенты уравнения макросейсмического поля для Туркменистана из табл. 3, и для сравнения на рис. 6г – из табл. 1. Рассматривались 4 значения коэффициента сжатия эллипса:  $k=1.5$  и 2.25;  $k_1=1.74$  и  $k_3=1.64$  (см. табл. 4). Расчетный эллипс ориентировался под углами: 143° – в соответствии с таковым для района №3 (см. табл. 4); 146° – согласно решению механизма очага; 125° – согласно ориентации первых изосейств в [3].

На рис. 6 показаны отклонения  $I$  расчетных значений для разных вариантов исходных данных. Осредненные разницы на участках в 5 км показаны серыми точками. Наименьшие расхождения наблюдаются при использовании квазустойчивых параметров макросейсмического поля в зоне №3 (рис. 6а, б, в), где произошло это событие. Расхождения между расчетными и наблюдаемыми значениями  $I$  на всем рассматриваемом диапазоне эпицентральных расстояний до



**Рис. 5.** Сравнение наблюдаемых при Дагестанском землетрясении и расчетных интенсивностей  $\Delta I_{cp}$  для значений коэффициентов: а –  $b=1.5$ ,  $v=3.6$ ,  $c=3.1$ ,  $k=2.7$ ; б –  $b=1.5$ ,  $v=3.6$ ,  $c=3.1$ ,  $k=1.6$ ; в –  $b=1.5$ ,  $v=3.6$ ,  $c=3.1$ ,  $k=2.0$ ; г –  $b=1.52$ ,  $v=3.6$ ,  $c=1.6$ ,  $k=2.0$ .



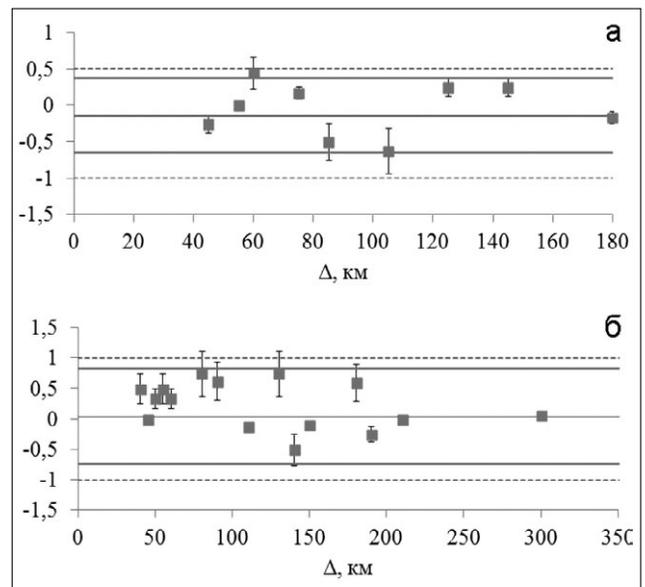
**Рис. 6.** Сравнение наблюдаемых при Боджурдском землетрясении и расчетных интенсивностей  $\Delta I$  для значений коэффициентов: а –  $b=1.5$ ,  $v=3.72$ ,  $c=2.87$ ,  $k=1.74$ ,  $Az=143^\circ$ ; б –  $b=1.5$ ,  $v=3.72$ ,  $c=2.87$ ,  $k=1.74$ ,  $Az=125^\circ$ ; в –  $b=1.5$ ,  $v=3.72$ ,  $c=2.87$ ,  $k=2.25$ ,  $Az=146^\circ$ ; г –  $b=1.5$ ,  $v=3.8$ ,  $c=3.5$  [18],  $k=1.74$ ,  $M_s=6.5$ ,  $Az=143^\circ$ .

200 км не превышают 0.5 баллов. Отмечено преобладающее влияние на надежность оценок потерь правильности выбора коэффициентов уравнения (1) по сравнению со значениями  $k$  и  $Az$ .

Еще один пример показывает образование области с квазиустойчивыми параметрами в районе, где такая информация не могла быть установлена и детализирована ранее. Так, в работе [15] показано, что для описания затухания интенсивности Тувинских землетрясений (2011-2012 гг.) более подходит использование уравнения с коэффициентами  $b=1.5$ ,  $v=4$ ,  $c=4.0$ , рекомендованными Н.В. Шебалиным для Прибайкалья, вопреки предлагаемому ранее в целом для Алтае-Саянского региона значениям коэффициентов  $b=1.5$ ,  $v=3.5$ ,  $c=3.0$ . Имеющиеся в распоряжении исследователей данные недостаточны для устойчивого выделения зоны и описания всех факторов, необходимых для моделирования. Однако полученные данные по уравнению затухания интенсивности, а также знание механизма очага и расположения основных активных разломов в этой области позволили наметить зону, границы которой впоследствии будут уточняться.

Выполненные расчеты последствий с помощью ИС “Экстремум” показали предпочтительность уравнения с коэффициентами  $b=1.5$ ,  $v=4$ ,  $c=4.0$  для описания затухания Тувинских землетрясений 2011-2012 гг. В качестве исходных данных при моделировании последствий Тувинского землетрясения 2011 г. использовались коэффициенты в формуле Шебалина для Прибайкалья; ориентация эллипса под углом  $345^\circ$  в соответствии с ре-

шением механизма очага по NEIC и коэффициент сжатия  $k=1.5$ . Этот результат хорошо согласуется с наблюдаемым полем изосейст этого землетрясения; на рис. 7а показаны отклонения расчетных и наблюдаемых значений  $I$  для него. Расхождения между расчетными и наблюдаемыми значениями  $\Delta I_{cp}$  в диапазоне эпицентральных расстояний до 83 км, на которых наблюдаются ущербобразующие значения интенсивности, не превышают 0.4 балла.



**Рис. 7.** Сравнение наблюдаемых и расчетных интенсивностей  $\Delta I_{cp}$ ; а – для Тувинского землетрясения 2011 г.; б – для Суусамырского землетрясения 19.09.1992 г.

Использование значений ориентации эллипса изосейст из каталога СКЗ [11] с учетом значений азимута разрыва в очаге землетрясений для моделирования возможных последствий показано на примере Суусамырского землетрясения. Ранее в работе [16] расчеты его последствий проводились для параметров очага:  $\varphi=42.07^{\circ}\text{N}$ ,  $\lambda=73.63^{\circ}\text{E}$ ,  $M_s=7.5$ ,  $h=25$  км, и коэффициентов уравнения макросейсмического поля  $b=1.5$ ,  $\nu=4.5$ ,  $c=4.4$  (вкrest структур) для Киргизии [5],  $k=1.5$ . На рис. 7б показаны отклонения расчетных значений  $I$  от наблюдаемых при моделировании последствий Суусамырского землетрясения с использованием вышеописанных исходных данных для расчета.

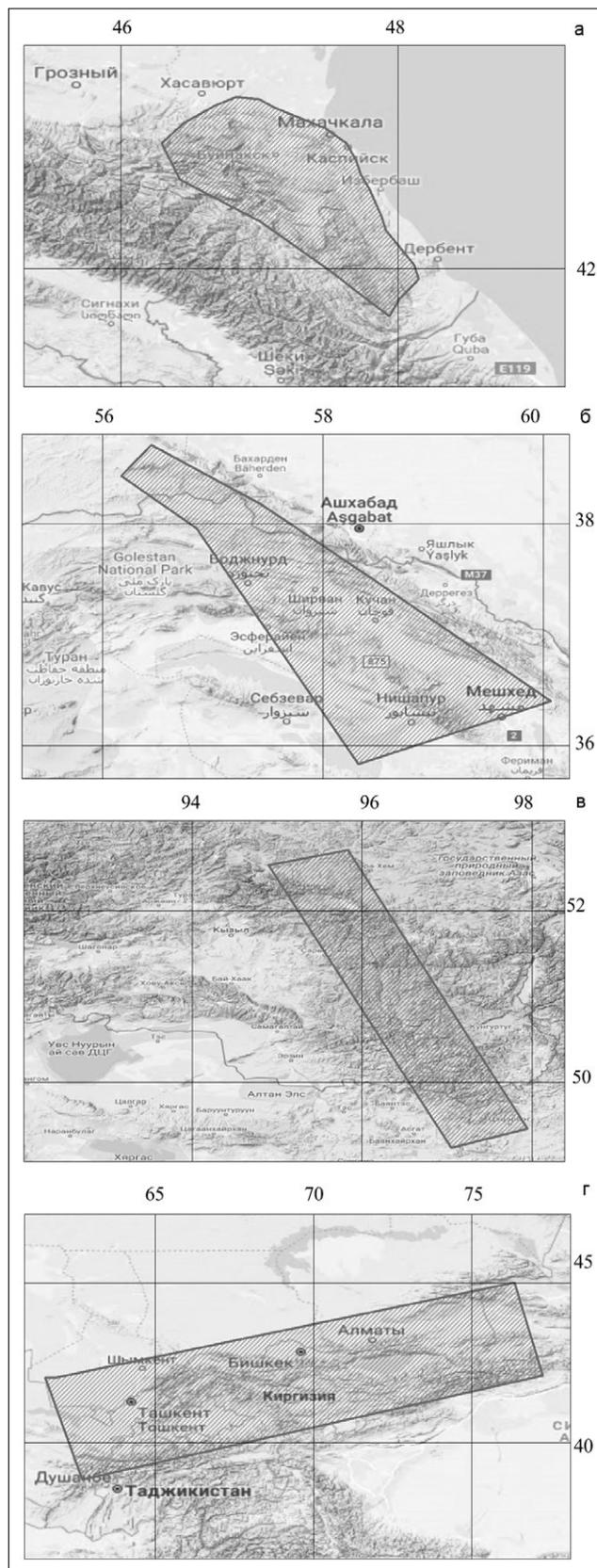
Сопоставление результатов с границами зон ВОЗ для ОСР позволяет также наметить границы возможной зоны с квазиустойчивыми параметрами.

Контрольные расчеты последствий 4 землетрясений с использованием полученных авторами результатов исследования особенностей затухания сейсмической интенсивности показали эффективность калибровки моделей ИС “Экстремум”. В целом, погрешность в определении интенсивности не превышает 0.5 балла. Значения погрешностей  $\Delta I_{\text{cp}}$  в прогнозировании интенсивности от контрольных землетрясений на разных расстояниях приведены в табл. 5.

Полученные результаты позволили выделить зоны с квазиустойчивыми параметрами макросейсмического поля (рис. 8), которые могут быть

**Таблица 5.** Расхождения  $\Delta I_{\text{cp}}$  при прогнозировании последствий контрольных землетрясений с помощью откалиброванной ИС “Экстремум”

Контрольное землетрясение	Эпицентральное расстояние $\Delta$ , км	$\Delta I_{\text{cp}}$	$I$ , балл
Тувинское (27.12.2011, $M_s=6.6$ )	< 45	0.2	7.5
	< 55	0.4	7
	< 75	0.2	6.5-7
Суусамырское (19.08.1992, $M_s=7.5$ )	< 40	0.5	8-7.5
	< 50	0.3	7-7.5
	< 60	0.3	7
Дагестанское (14.05.1970, $M_s=6.5$ )	< 25	0.1	7.5-8
	< 40	0.15	7.5-7
	< 50	0.25	6.5-7
	< 100	0.3	6-5.5
Боджнурдское (4.02.1997, $M_w=6.5$ )	< 20	0.1	7-7.5
	< 40	0.1	6.5-7
	< 50	0.3	6.5-6
	< 80	0.2	5.5-6



**Рис. 8.** Зоны с квазистабильными параметрами макросейсмического поля: а – на Кавказе; б – в Копетдаг-Каспийском регионе; в – в Алтае-Саянском регионе; г – в Средней Азии.

использованы в дальнейшем при оперативных расчетах ущерба и потерь.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рост требований к точности и надежности оперативных прогнозов потерь от землетрясений обусловил возрастание интереса исследователей к калибровке соответствующих математических моделей, опирающейся на сбор и анализ данных о параметрах ощутимых землетрясений и их макросейсмических проявлениях в различных регионах.

К настоящему времени для такой задачи получен большой объем информации при формировании информационной основы для составления карт Общего сейсмического районирования [12]. Собранные данные, представленные в виде баз данных (например, БД СиОЗР ФИЦ ЕС РАН), позволяют решить ряд теоретических и практических задач, в частности выполнять привязанную к месту калибровку математических моделей, обеспечивающих достаточную для практического применения точность оценки параметров макросейсмических полей.

Основные результаты данной работы:

1. Уточнены значения параметров уравнения Н.В. Шебалина для сейсмоопасных регионов, границы которых формировались на основе разнообразных гипотез, обусловленных генезисом, структурой и сплошностью горных пород, а также простиранием геологических провинций.

2. Показана возможность выделения зон с квазистабильными параметрами, характеризующихся близкими значениями коэффициентов закона затухания, отношений большой и малой осей эллиптических изосейст высших баллов, ориентации макросейсмического поля или азимутов вытянутости изосейст.

3. Установлено, что калибровка является итерационным процессом, где каждая итерация возникает по поводу любого нового сейсмического события, как только его описание попадает в специальную базу данных. При этом возможно как дробление, так и укрупнение зон, как это было показано на примере изменения границ зон после проведения контрольных расчетов.

4. На примере контрольных землетрясений выполнена оценка точности формирования макросейсмических полей для 4 зон при наличии набора значений параметров математических моделей, уточненных в процессе калибровки. Показано, что в результате калибровки для зон достаточной протяженности возможно уменьшить величины ошибки вычисления интенсивности  $I$  до величины, не превышающей 0.5 балла.

Очевидно, что такие работы должны быть продолжены и будут способствовать формализации и ускорению процесса использования макросейсмической информации в службах МЧС для эффективного расчета возможных потерь от сильных землетрясений и скорейшего принятия решения о проведении поисково-спасательных и других неотложных мероприятий.

**Источник финансирования.** *Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГЭ РАН по теме НИР №г.р. АААА-А19-119021190077-6 и государственного задания ФИЦ ЕГС РАН по теме НИР №г.р. АААА-А16-116070550060-7.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Асанов О.А., Левкович Р.А., Гайсумов М.Я., Керимов И.А., Габсатарова И.П., Головкова Л.В., Иванова Л.Е., Пономарёва Н.Л., Чепкунас Л.С., Рыжикова М.И.* Макросейсмические проявления Курчалойского землетрясения 11 октября 2008 г. с  $K_p=14.5$ ,  $m_w=5.8$ ,  $I_0=7$  (Чеченская республика) // *Землетрясения Северной Евразии*, 2008 год. Обнинск: ГС РАН, 2014. С. 421-432.
2. *Быстрицкая Ю.В.* Соотношение и сопоставление макросейсмических инструментальных данных (Дагестанские землетрясения) // *Сейсмичность и гидрогазогеохимия территории Дагестана* // ИГ Даг ФАН СССР. 1978. №2(17). С. 78-84.
3. *Гаипов Б.Н., Голинский Г.Л., Петрова Н.В., Ильясов Б.И., Мурадов Ч.М., Рахимов А.Р., Безменова Л.В., Гарагозов Д., Ходжаев А., Баймурадов К., Рахманова М.С.* Боджнурдское землетрясение 4 февраля 1997 г. с  $M_s=6.6$ ,  $I_0=8$  (Копетдаг) // *Землетрясения Северной Евразии в 1997 году*. Обнинск: ГС РАН, 2003. С. 199-218.
4. *Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г.* Сейсмология, геология, геофизика. М.: Наука, 1980. 220 с.
5. *Джанузаков К.Д., Ильясов Б.И., Муралиев А.М., Юдахин Ф.Н.* Суусамырское землетрясение 19 августа 1992 года // *Землетрясения Северной Евразии в 1992 году*. М.: ОИФЗ РАН, 1997. С. 48-53.
6. *Кальметьева З.А., Миколайчук А.В., Молдобеков Б.Д.* и др. Атлас землетрясений Кыргызстана. Бишкек: ЦАИИЗ, 2009.
7. *Мирзоев К.М., Джурсаев Р.У.* Основные закономерности затухания балльности землетрясений на территории Таджикистана // *Землетрясения Средней Азии и Казахстана*. 1983. Душанбе: Дошиш, 1985. С. 99-128.
8. *Петрова Н.В., Левина В.И., Михайлова Р.С.* Анализ и дополнение макросейсмических данных о землетрясениях Северной Евразии 2004-2008 гг. // *Современные методы обработки и интерпретации*

- сейсмологических данных: матер. XI Междунар. сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2016. С. 250-254.
9. *Рогожин Е.А.* Тектоническая позиция, сеймотектонические, макросейсмические и сейсмологические проявления Курчалойского землетрясения 11 октября 2008 г. в Чеченской Республике // Геология и геофизика Юга России. 2017. №3. С. 111-116.
  10. Сейсмическое районирование территории СССР. Методические основы и региональное описание карты 1978 г. / Отв. ред. В.И. Бунэ, Г.П. Горшков. М.: Наука, 1980. 307 с.
  11. Специализированный каталог землетрясений для задач общего сейсмического районирования территории Российской Федерации / Редакторы В.И. Уломов, Н.С. Медведева. <http://seismos-u.ifz.ru/documents/Eartquake-Catalog.pdf>.
  12. *Уломов В.И., Шумилина Л.С.* Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации [Карты]: Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. ОСР-97. Масштаб 1:8 000 000. М.: ОИФЗ РАН, 1999. 57 с.
  13. *Фролова Н.И., Габсатарова И.П.* Использование макросейсмических данных для повышения надежности оперативных оценок потерь на примере Курчалойского землетрясения // Анализ, прогноз и управление природными рисками в современном мире: матер. 9-й Междунар. научно-практ. конф. "Геориск-2015": в 2 т. // Отв. ред. В.И. Осипов. М.: РУДН, 2015. Т. 2. С. 391-399.
  14. *Фролова Н.И., Угаров А.Н.* База знаний о сильных землетрясениях как инструмент повышения надежности оперативных оценок потерь. // Геоэкология. 2018. № 6. С. 3-20.
  15. *Фролова Н.И., Габсатарова И.П.* Изучение параметров закона затухания макросейсмической интенсивности Тувинских землетрясений 2011 и 2012 гг. (Республика Тува) // Землетрясения Северной Евразии, 2012 год. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. С. 318-323.
  16. *Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Угаров А.Н.* Использование макросейсмических данных для повышения надежности оперативных оценок потерь на примере землетрясений РФ и сопредельных территорий // Анализ, прогноз и управление природными рисками с учетом глобального изменения климата – ГЕОРИСК-2018: матер. X Междунар. научно-практ. конф. по проблемам снижения природных опасностей и рисков. М.: РУДН, 2018. Т. I. С. 218-226.
  17. *Шебалин Н.В.* Методы использования инженерно-сейсмологических данных при сейсмическом районировании // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 95-121.
  18. *Шебалин Н.В.* Опорные землетрясения и уравнения макросейсмического поля // Новый Каталог сильных землетрясений на территории СССР (с древнейших времен до 1975 г.) М.: Наука, 1977. С. 20-30.
  19. *Babayan T.* Atlas of strong earthquakes of the Republic of Armenia, Artsakh and adjacent territories from ancient times through 2003, Tigran Mets, Yerevan, 2006, p. 140.
  20. *Frolova N.I., Larionov V. I., Bonnin J., Sushchev S. P., Ugarov A. N., Kozlov M. A.* Loss Caused by Earthquakes: Rapid Estimates // Nat. Hazards. 2017. V. 88. Is. 1. P. 63-80.
  21. *Jaiswal K.S., Wald D.J.* Improving PAGER's real-time earthquake casualty and loss estimation toolkit: challenges // The 15th World Conference on Earthquake Engineering: September 24-28, 2012, Lisbon, Portugal. [http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012\\_2539.pdf](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_2539.pdf)
  22. *Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P.* (eds), 2016. CPTI15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. DOI: <http://doi.org/10.6092/INGV.IT-CPTI15>
  23. *So E.* Introduction to the GEM Earthquake Consequences Database (GEMECD) // GEM Technical Report. 2014-14. V1.0.0. 158 p., GEM Foundation, Pavia, Italy. DOI: 10.13117/ GEM.VULN-MOD. TR2014.14.
  24. *Varazanashvili O., Tsereteli N., Bonali F.L. et al.* GeoInt: the first macroseismic intensity database for the Republic of Georgia // Journal of Seismology. 2018. V. 22. Is. 4. P. 625-667. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10950-017-9726-5>.

## REFERENCES

1. Asmanov, O.A., Levkovich, R.A., Gaisumov, M.Ya., Kerimov, I.A., Gabsatarova, I.P., Golovkova, L.V., Ivanova, L.E., Ponomareva, N.L., Chepkunas, L.S., Ryzhikova, M.I. *Makroseismicheskie proyavleniya Kurchailoiskogo zemletryasenia 11 oktyabrya 2008 g s  $K_p = 14.5$ ,  $M_w = 5.8$   $I_0 = 7-8$  (Chechenskaya respublika)* [Macroseismic manifestations of the Kurchaloi earthquake on October 11, 2008 with  $K_p = 14.5$ ,  $M_w = 5.8$   $I_0 = 7-8$  (Chechen Republic)]. *Zemletryaseniya Severnoi Evrazii, 2008 god* [Earthquakes in the Northern Eurasia, 2008]. Obninsk, GS RAN, 2014, pp. 421-432. (in Russian)
2. Bystritskaya, Yu.V. *Sootnoshenie i sopostavlenie makroseismicheskikh instrumental'nykh dannykh (Dagestanskije zemletryaseniya)* [Relationship and comparison of macroseismic and instrumental data (Dagestan

- earthquakes)]. *Seismichnost' i gidrogazogeokhimiya territorii Dagestana*, IG Dag FAN SSSR, 1978, no. 2(17), pp. 78-84. (in Russian)
3. Gaipov, B.N., Golinskii, G.L., Petrova, N.V., Il'yasov, B.I., Muradov, Ch.M., Rakhimov, A.R., Bezmenova, L.V., Garagozov, D., Khodzhaev, A., Baimuradov, K., Rakhmanova, M.S. *Bodzhnurdskoe zemletryasenie 4 fevralya 1997 g. s  $M_s=6.6$ ,  $I_0=8$  (Kopetdag)* [Bodzhnurd earthquake on February 4, 1997 with  $M_s=6.6$ ,  $I_0=8$  (Kopetdag)]. *Zemletryaseniya Severnoi Evrazii v 1997 godu* [Earthquakes in the Northern Eurasia in 1997]. Obninsk, GS RAN, 2003, pp. 199-218. (in Russian)
  4. *Dagestanskoe zemletryasenie 14 marta 1970 g. Seismologiya, geologiya, geofizika*. [Dagestan earthquake on May 14, 1970. Seismology, geology, geophysics]. Moscow, Nauka, 1980, 220 p. (in Russian)
  5. Dzhanzuzakov, K.D., Il'yasov, B.I., Muraliev, A.M., Yudakhin, F.N. *Susamyrskoe zemletryasenie 19 avgusta 1992 goda* [Sussamur earthquake on August 19, 1992]. *Zemletryaseniya Severnoi Evrazii v 1992 godu* [Earthquakes in the Northern Eurasia in 1992]. Moscow, OIFZ RAN, 1997, pp. 48-53. (in Russian)
  6. Kal'met'eva, Z.A., Mikolaichuk, A.V., Moldobekov, B.D., et al. *Atlas zemletryaseniya Kirgystana* [Atlas of earthquakes in Kyrgyzstan]. Bishkek, TsAIIZ, 2009. (in Russian)
  7. Mirzoev, K.M., Dzhuraev, R.U. *Osnovnye zakonomernosti zatukhaniya ball'nosti zemletryaseniya na territorii Tadzhikistana* [Principle regularities in shaking intensity attenuation for the territory of Tajikistan]. *Zemletryaseniya Srednei Azii i Kazakhstana* [Earthquakes of Central Asia and Kazakhstan]. Dushanbe, Donish, 1985, pp. 99-128. (in Russian)
  8. Petrova, N.V., Levina, V.I., Mikhailova, R.S. *Analiz i dopolnenie makroseismicheskikh dannykh o zemletryaseniya Severnoi Evrazii 2004-2008 gg.* [Analysis and updating of macroseismic data on earthquakes of Northern Eurasia in 2004-2008]. *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh. Materialy XI Mezhdunar. Seismologicheskoi shkoly* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Proc. XI Intern. Seismological Workshop]. A.A. Malovichko, Ed. Obninsk, FITs EGS RAN, 2016, pp. 250-254. (in Russian)
  9. Rogozhin, E.A. *Tektonicheskaya pozitsiya, seismotektonicheskie, makroseismicheskie i seismologicheskie proyavleniya Kurchaloi zemletryaseniya 11 oktaybrya 2008 g. v Chechenskoj Respublike* [Tectonic position, seismotectonic, macroseismic and seismologic manifestations of the Kurchaloi earthquake on October 11, 2008 in the Chechen Republic] *Geologiya i geofizika Yuga Rossii*, 2017, no. 3, pp. 111-116. (in Russian)
  10. *Seismicheskoe raionirovanie territorii SSSR. Metodicheskie osnovy i regional'noe opisaniye karty 1978 g.* [Seismic zoning of the USSR territory. Methodological basis and regional description of the 1978 map]. V.I. Bune, G.P. Gorshkov, Eds. Moscow, Nauka, 1980, 307 p. (in Russian)
  11. *Spetsializirovanniy katalog zemletryaseniya dlya zadach obshchego seismicheskogo raionirovaniya territorii Rossijskoi Federatsii* [Specialized catalog of earthquakes for review seismic zoning of the Russian Federation territory]. V.I. Ulomov, N.S. Medvedeva, Eds. Available at: <http://seismos-u.ifz.ru/documents/Eartquake-Catalog.pdf>. (in Russian)
  12. Ulomov, V.I., Shumilina, L.S. *Komplekt kart obshchego seismicheskogo raionirovaniya territorii Rossijskoi Federatsii. Ob'yasnitel'naya zapiska i spisok gorodov i naselennykh punktov, raspolozhennykh v seismoopasnykh raionakh. OSR-97. Masshtab 1:8 000 000* [Set of maps of review seismic zoning of the Russian Federation territory. OSR-97. Scale 1:8 000 000. Explanatory note and list of cities and settlements located in earthquake-prone areas]. Moscow, OIFZ, 1999, 57 p. (in Russian)
  13. Frolova, N.I., Gabsatarova, I.P. *Ispol'zovanie makroseismicheskikh dannykh dlya povysheniya nadezhnosti operativnykh otsenok poter' na primere Kurchaloi zemletryaseniya* [Macro seismic data application for increasing reliability of near real time loss estimations: example of Kurchaloi earthquake]. Proc. 9-th International scientific and practical conference GEORISK-2015. Moscow, RUDN, 2015, vol. 2, pp. 391-399. (in Russian)
  14. Frolova, N.I., Ugarov, A.N. *Baza znaniy o sil'nykh zemletryaseniya kak instrument povysheniya nadezhnosti operativnykh otsenok poter' na primere Kurchaloi zemletryaseniya* [Knowledge base about past earthquakes consequences as a tool to increase the reliability of near real time loss estimation]. *Geoekologiya*, 2018, no. 6, pp. 1-18. (in Russian)
  15. Frolova, N.I., Gabsatarova, I.P. *Izuchenie parametrov zakona zatukhaniya makroseismicheskoi intensivnosti Tuvinskikh zemletryaseniya 2011 i 2012 gg (Respublika Tuva)* [The study of parameters of the law of macroseismic intensity attenuation in the Tuva earthquakes, 2011 and 2012 (Republic of Tuva)]. *Zemletryaseniya Severnoi Evrazii, 2012 god* [Earthquakes in the Northern Eurasia, 2012]. Obninsk, FiTs EGS RAN, 2018, pp. 318-323. (in Russian)
  16. Frolova, N.I., Gabsatarova, I.P., Ugarov, A.N. *Ispol'zovanie makroseismicheskikh dannykh dlya povysheniya nadezhnosti operativnykh otsenok poter' na primere zemletryaseniya RF i sopredel'nykh territorii* [Macro seismic data application for increasing reliability of near real time loss estimations by the example of earthquakes in Russia and adjacent areas]. Proc. 10th International scientific and practical conference GEORISK-2018. Moscow, RUDN, 2018, vol. 1, pp. 218-226. (in Russian)
  17. Shebalin, N.V. *Metody ispol'zovaniya inzhenerno-seismologicheskikh dannykh pri seismicheskom raionirovanii* [Methods of engineering seismological data application for seismic zoning]. *Seismicheskoe raion-*

- irovanie SSSR* [Seismic zoning of the USSR], Moscow, Nauka, 1968, pp. 95-121. (in Russian)
18. Shebalin, N.V. *Opornye zemletryaseniya i uravneniya makroseismicheskogo polya* [Reference earthquakes and macroseismic field equations]. *Novyi katalog sil'nykh zemletryaseni na territorii SSSR (s drevneishikh vremen do 1975 g)* [New catalogue of strong earthquakes for the USSR territory (from ancient times till 1975)]. Moscow, Nauka, 1977, pp. 20-30. (in Russian)
  19. Babayan, T. Atlas of strong earthquakes of the Republic of Armenia, Artsakh and adjacent territories from ancient times through 2003, Tigran Mets, Yerevan, 2006, 140 p.
  20. Frolova, N.I., Larionov, V.I., Bonnin, J., Sushchev, S.P., Ugarov, A.N., Kozlov, M.A. Loss caused by earthquakes: rapid estimates. *Natural Hazards*, 2017, vol. 88, issue 1, pp. 63-80.
  21. Jaiswal, K.S., Wald, D.J. Improving PAGER's real-time earthquake casualty and loss estimation toolkit: challenges. Proc. the 15th World Conference on Earthquake Engineering: September 24-28, 2012, Lisbon, Portugal. Available at: [http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012\\_2539.pdf](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_2539.pdf)
  22. Rovida, A., Locati, M., Camassi, R., Lolli, B., Gasperini, P. (Eds.) CPTI15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian earthquakes. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. 2016. DOI: <http://doi.org/10.6092/INGV.IT-CPTI15>.
  23. So, E. Introduction to the GEM Earthquake Consequences Database (GEMECD). GEM Technical Report. 2014-14. V1.0.0. 158 p., GEM Foundation, Pavia, Italy. DOI: 10.13117/GEM.VULN-MOD.TR2014.14.
  24. Varazanashvili, O., Tsereteli, N., Bonali, F.L. et al. GeoInt: the first macroseismic intensity database for the Republic of Georgia. *Journal of Seismology*, 2018, vol. 22, issue 4, pp. 625-667. DOI: 10.1007/s10950-017-9726-5.

## INFLUENCE OF SHAKING INTENSITY ATTENUATION PECULIARITIES ON RELIABILITY OF EARTHQUAKE LOSS ESTIMATION IN EMERGENCY MODE

© 2019 N. I. Frolova<sup>1,\*</sup>, I. P. Gabsatarova<sup>2</sup>, N. V. Petrova<sup>2,\*\*</sup>, A. N. Ugarov<sup>3,\*\*\*</sup>, N. S. Malaeva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,  
Ulanskii per., 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia*

*\*E-mail: frolovanina7@gmail.com*

<sup>2</sup>*Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences,  
pr. Lenina, 189, Obninsk, Kaluga region, 249035 Russia*

*\*\*E-mail: npetrova@gsras.ru*

<sup>3</sup>*Extreme Situations Research Centre, Vyatskaya ul. 35, Moscow, 127015 Russia*

*\*\*\*E-mail: garo@esrc.ru*

The methods and results of seismic hazard zoning are investigated for the Russian Federation territory and abroad. The input data used in the zoning procedure, aimed at revealing the boundaries of areas with stable seismic intensity attenuation parameters have been analyzed. The zoning procedure has been developed for determining the boundaries of territories, within which the macroseismic field parameters (i.e., the coefficients in N.V. Shebalin's equation; the orientation of the elliptic isoseist axes, as well as the ratio of their semi-axes) show close values in each point. Examples are given in distinguishing zones characterized by quasi-stable parameters for separate regions, as well as in calibrating the computer model of the macroseismic field. The case studies are considered in the presence of a complete set of input data and under conditions of their insufficiency. The efficiency of the macroseismic field calibrated models application in the Extremum system in order to increase the reliability of near real time earthquake loss estimations is shown.

**Keywords:** *earthquakes, social losses, earthquake impact knowledge base, calibration of macroseismic field mathematical models, shaking intensity attenuation peculiarities, reliability of near real time loss estimations.*

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019523-37>