

УДК 624.131.1:551.252

## БАЗА ЗНАНИЙ О СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ОПЕРАТИВНЫХ ОЦЕНОК ПОТЕРЬ

© 2018 г. Н. И. Фролова<sup>1,\*</sup>, А. Н. Угаров<sup>2,\*\*</sup>

<sup>1</sup> Институт геоэкологии им Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН), Уланский пер., д. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

<sup>2</sup> Центр исследований экстремальных ситуаций (ООО ЦИЭКС), Вятская ул., д. 35, Москва, 127015 Россия

\* E-mail: frolova@esrc.ru

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

Поступила в редакцию 21.05.2018 г.

Выполнен совместный многофакторный анализ оценки надежности потерь от землетрясений, и определена степень значимости различных факторов. Разработаны меры по компенсации влияния наиболее значимых факторов на надежность оперативных оценок возможных потерь. Предложены пути повышения надежности оценок риска в оперативном режиме за счет калибровки моделей системы “Экстремум” с использованием базы знаний о прошедших сильных событиях России и мира. Разработана структура базы знаний и процедура выявления зон со стабильными параметрами моделей макросейсмического поля, уязвимости застройки и населения, а также рейтинга сейсмологических служб России и мира.

**Ключевые слова:** землетрясения, база знаний о последствиях, рейтинг сейсмологических служб, калибровка математических моделей, интенсивность сотрясений, ущерб застройке, потери населения, надежность оперативных оценок потерь

DOI: 10.1134/S0869780318060017

### ВВЕДЕНИЕ

В России, как и во всем мире, в рамках стратегии Сендайской рамочной программы по снижению риска бедствий на 2015–2030 гг. (<https://www.unisdr.org/files/43291.pdf>) уделяется большое внимание защите населения от природных и природно-техногенных катастроф. Землетрясения и связанные с ними негативные природные и техногенные воздействия чаще всего приводят к гибели людей и значительным экономическим ущербам. Согласно статистикам международных организаций и перестраховочных компаний последние годы наблюдается рост числа природных катастроф и их экономических и социальных последствий за счет урбанизации территорий и недостаточному уровню превентивных мероприятий. По данным Центра эпидемиологии катастроф (<http://www.emdat.be>) о последствиях землетрясений в разных странах мира за период 1900–2015 гг. произошел рост числа сейсмических катастроф и связанных с ними социальных и экономических потерь. Число погибших от землетрясений в разные годы изменяется, пики приходится на землетрясения в Китае (1976 г.), Индонезии (2004 г.) и на Гаити (2010 г.) За период 2005–2014 гг. в среднем ежегодно от землетрясе-

ний погибло более 42 тыс. человек. В 2015 г. число погибших во время землетрясений составило 9525 чел., не достигло средних значений, но составило более 40% от общего числа погибших от всех природных катастроф в мире в этот год. Во время землетрясения в Непале в апреле 2015 г. погибло 8831 чел.

Согласно статистике в случае сильных землетрясений более половины людей, оказавшихся в завалах (55%), погибают в течение первых 3-х суток. В первые 6 часов погибают 60% людей с тяжелыми травмами, угрожающими жизни. Количество погибших может быть значительно сокращено за счет своевременных и правильных действий по реагированию в первые часы после события. Оперативная и достоверная информация о размерах возможного ущерба и социальных потерях в случае сильного землетрясения необходима в ближайшие часы после события для принятия решения о проведении поисково-спасательных операций и мероприятий по оказанию гуманитарной помощи.

В статье приводятся результаты исследований по ранжированию факторов, влияющих на надежность оперативных оценок возможного ущерба. Предложены пути минимизации их негатив-

**Таблица 1.** Характеристики событий и входные данные, используемые для расчета

Дата и страна	Число погибших (http://www.emdat.be), чел.	Эталонные входные данные о параметрах события	Эталонные входные данные о региональных особенностях макросейсмического поля
8 октября 2005, Пакистан	73 338	$\varphi = 34.451^{\circ}\text{N}$ ; $\lambda = 73.649^{\circ}\text{E}$ ; $h = 10$ км; $M = 7.59$	$b = 1.5$ ; $v = 3.5$ ; $c = 3.0$ ; $k = 1.5$ ; угол $120^{\circ}$
12 мая 2008, Китай	87476	$\varphi = 30.98^{\circ}\text{N}$ ; $\lambda = 103.396^{\circ}\text{E}$ ; $h = 10$ км; $M = 7.91$	Уравнение макросейсмического поля для Восточного Китая [24]; $k = 1.5$ ; вдоль разлома
6 апреля 2009, Италия	295	$\varphi = 42.368^{\circ}\text{N}$ ; $\lambda = 13.353^{\circ}\text{E}$ ; $h = 10$ км; $M = 6.32$	$b = 1.5$ ; $v = 3.5$ ; $c = 3.0$ ; $k = 1.5$ ; вдоль разлома
25 апреля 2015, Непал	8633	$\varphi = 28.147^{\circ}\text{N}$ ; $\lambda = 84.708^{\circ}\text{E}$ ; $h = 10$ км; $M = 7.7$	$b = 1.5$ ; $v = 3.5$ ; $c = 3.0$ ; $k = 1.5$ ; угол $124^{\circ}$

ного влияния за счет калибровки моделей оценки потерь с использованием баз данных о последствиях прошлых событий. Установлено, что калибровочные параметры моделей сохраняют устойчивость в пределах географических регионов. Предложено полученные компенсирующие параметры моделей затухания сейсмической интенсивности, моделей уязвимости элементов риска и оценки рейтинга сейсмологических служб срочных донесений, а также границы зон их постоянства, сохранять в базе знаний о физических и социально-экономических последствиях землетрясений. Разработана структура и содержание базы знаний. Приводятся примеры, иллюстрирующие повышение надежности оценок потерь за счет использования откалиброванных моделей.

#### РАНЖИРОВАНИЕ ФАКТОРОВ ПО СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ПОТЕРЬ

Анализ результатов определения потерь от землетрясений с помощью системы “Экстремум” [5, 10–16, 21–23] выявил ряд факторов, влияющих на надежность оценок в оперативном режиме; из них следует отметить:

- погрешности в определении параметров землетрясений: координат эпицентра, глубины очага, магнитуды и ее типа Службой срочных донесений Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба Российской академии наук” (ССД ФИЦ ЕГС РАН) и сейсмологическими агентствами мира;
- использование обобщенных для больших территорий коэффициентов закона затухания макросейсмической интенсивности, построенного относительно магнитуды по поверхностной волне, которая часто не определяется в оперативном режиме;
- условность математических зависимостей, используемых при вычислении значений степе-

ней повреждений зданий и сооружений различного типа, оценке ущерба здоровью людей;

- отсутствие доступа к конфиденциальным источникам информации.

Довольно трудно оценить влияние каждого отдельного упомянутого фактора, так как вносимая ими неопределенность распространяется на все последующие этапы моделирования потерь. Для оценки степени влияния выше перечисленных факторов на надежность прогноза потерь в оперативном режиме были выполнены экспериментальные расчеты последствий землетрясений с помощью системы “Экстремум”. Были выбраны наиболее представительные события последних лет в Китае, Пакистане, Италии и Непале, сопровождаемые значительным ущербом (табл. 1).

В качестве источников информации о параметрах землетрясений использовались данные служб срочных донесений ФИЦ ЕГС РАН, Европейского Средиземноморского Сейсмологического Центра, Национального Сейсмологического Информационного Центра Геологической Службы США, других национальных сейсмологических служб в зависимости от страны, а также данные инструментального каталога ISC GEM [27].

Для моделирования сейсмической интенсивности использовались уравнения макросейсмического поля Н.В. Шебалина [7, 8] с различными региональными коэффициентами, а также другие уравнения [29]. При этом учитывалось отношение полуосей эллипса макросейсмического поля и его различная ориентация: вдоль разломов или в соответствии с решением механизма очага.

Данные о застройке использовались в разных вариантах: по базе данных системы “Экстремум” [5, 21, 23], по базе данных о городской и сельской застройке системы “PAGER” [24, 25], а также по информации с космических снимков высокого разрешения. Использовались различные варианты функций уязвимости, построенные на основе эмпирических данных из различных выборок: по

**Таблица 2.** Факторы, влияющие на надежность оценок потерь от землетрясений

№	№ группы факторов и ее название	Сокращенное название факторов	Пояснение к сокращенному названию
1	I “очаг”	местоположение	координаты эпицентра
2		магнитуда	магнитуда
3		глубина	глубина очага
4	II “поле”	оси	отношение полуосей эллипса макросейсмического поля
5		затухание	региональные коэффициенты уравнения макросейсмического поля
6	III “уязвимость”	ориентация	ориентация макросейсмического поля
7		модель населенного пункта	процентное соотношение зданий различных классов уязвимости в соответствии со шкалой MMSK-86 [6]
8		уязвимость классов	зависимости для оценки степени повреждения зданий (поражения людей) в случае различного сейсмического воздействия

последствиям отдельных или группы событий, а также с применением шкал сейсмической интенсивности MMSK-86 [6] и EMS-98 [19].

Рассматриваемые факторы в ходе экспериментальных исследований были объединены в три группы: первая связана с очаговыми параметрами, вторая – с макросейсмическим полем, третья – с инженерными и социальными факторами уязвимости элементов риска. Для краткости изложения перечисленным группам были присвоены названия: “очаг”, “поле” и “уязвимость” (табл. 2).

Были изучены возможные варианты моделирования макросейсмического поля в рассматриваемых регионах. Проанализированы случаи с различной ориентацией и отношением осей эллипса, разбросом региональных коэффициентов уравнения поля. Исследовались наборы данных о поведении элементов риска во время землетрясений из разных источников, позволяющих оценить уязвимость застройки и населения. В результате был получен набор наиболее вероятных значений всех исходных данных, необходимых для прогнозного расчета последствий и диапазоны их отклонения.

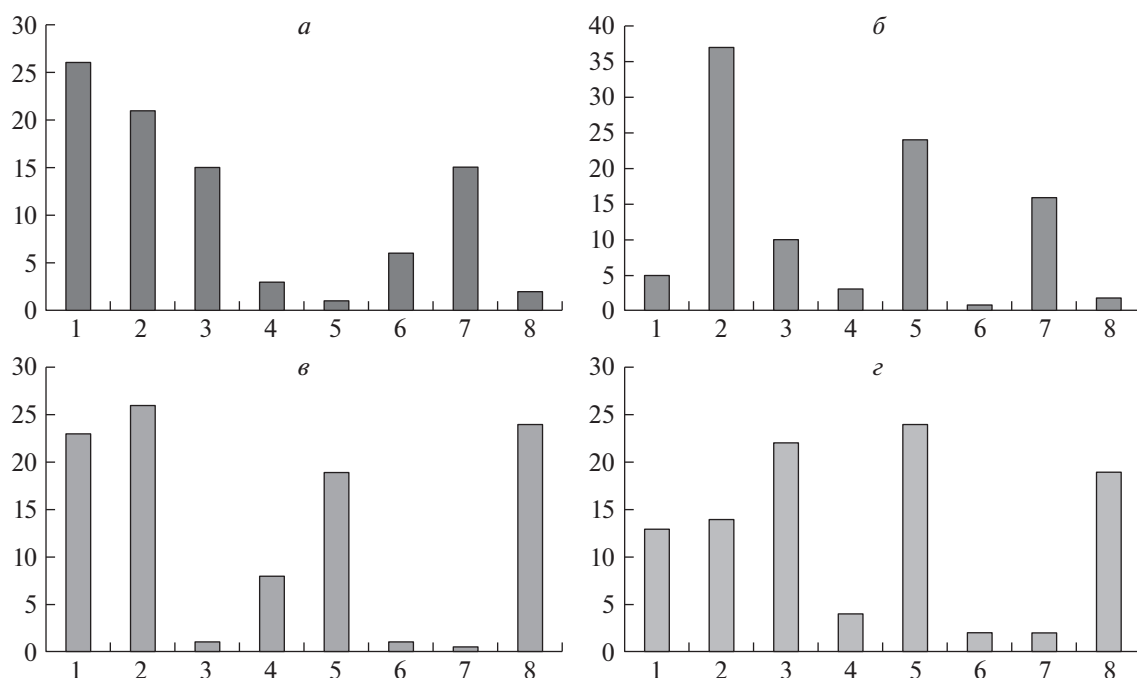
Осуществлялся контрольный расчет ожидаемых потерь с использованием наиболее вероятных – эталонных значений (см. табл. 1) всех восьми параметров (см. табл. 2) для подтверждения возможности прогноза потерь с минимальной погрешностью. При проведении расчетов исходные параметры попеременно изменялись в установленных пределах. Расчетные значения потерь сравнивались с наблюдаемыми данными о погибших (см. табл. 1). На основе сравнения оценивалась величина ошибки в оценке последствий. Влияние погрешностей различных факторов на надежность оценок потерь выражалось в процен-

тах к максимальной погрешности, достигаемой при самом неблагоприятном наборе исходных данных.

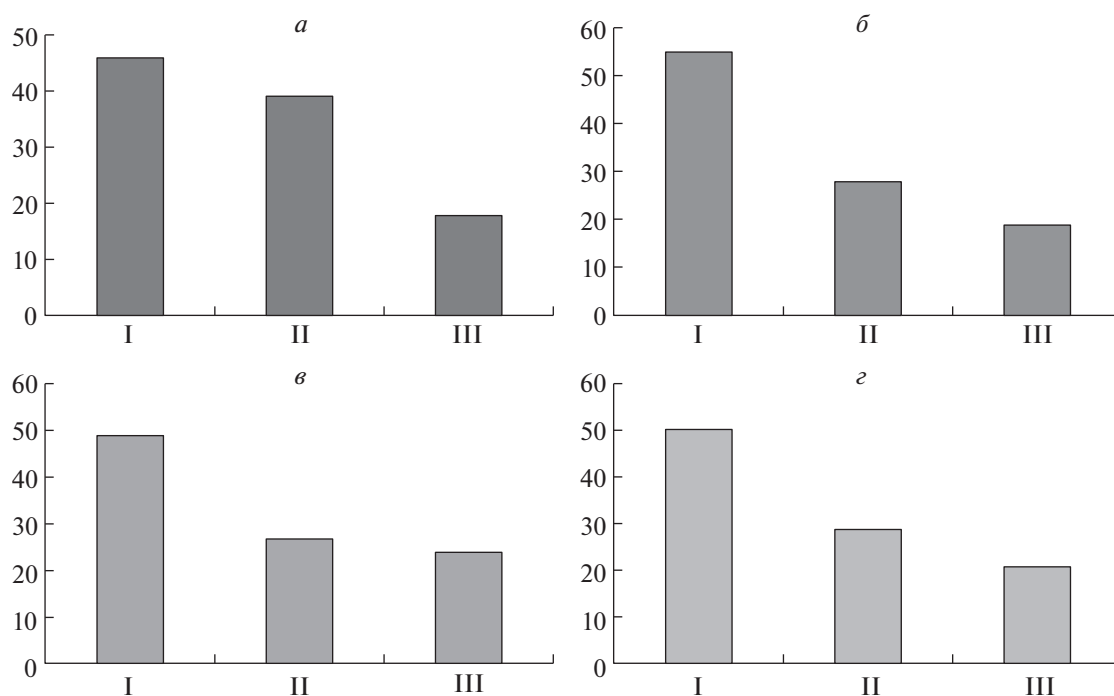
На рис. 1 приведены результаты оценки вклада перечисленных восьми факторов в погрешность определения потерь от четырех рассматриваемых событий. Видно, что каждый из рассматриваемых факторов может оказать существенное влияние на результаты оценки последствий землетрясений. В то же время однотипный лидирующий фактор для всех 4-х событий не выявляется, что может быть обусловлено высокой степенью их детализации и взаимной зависимостью. При объединении зависимых факторов в группы появляется возможность их упорядочить. Из анализа результатов усреднения влияния факторов по каждой группе для 4-х выбранных событий тенденция к снижению роли группы факторов в зависимости от ее номера становится очевидной (рис. 2).

Применительно к современному состоянию средств и методов получения оперативной информации о параметрах землетрясения и об уязвимости элементов риска, на надежность оценки потерь, в первую очередь, влияют ошибки в определении координат эпицентра, магнитуды и глубины очага. Степень влияния этой группы факторов оценивается величиной чуть более 50% (рис. 3). Значимость этой группы факторов самая высокая и занимает 1 место.

На втором месте – погрешности группы факторов “поле”, связанные с региональными особенностями затухания сейсмической интенсивности, степень влияния около 30%. На последнем месте – группа факторов “уязвимость”, описывающих классы элементов риска и их уязвимость. Следует отметить, разрыв по степени влияния I и



**Рис. 1.** Вклад факторов в погрешность определения потерь от четырех событий (землетрясений): *а* – 8 октября 2005, Пакистан; *б* – 25 апреля 2015, Непал; *в* – 12 мая 2008, Китай; *г* – 6 апреля 2009, Италия.



**Рис. 2.** Вклад групп факторов в погрешность определения потерь от четырех событий (землетрясений): *а* – 8 октября 2005, Пакистан; *б* – 25 апреля 2015, Непал; *в* – 12 мая 2008, Китай; *г* – 6 апреля 2009, Италия.

III группы факторов не столь велик, но даже небольшой разницей в 10% нельзя пренебречь.

Полученные результаты позволили сделать вывод, что для повышения эффективности оперативного реагирования в случае ЧС, вызванной

сильным землетрясением, необходимо, в первую очередь, уменьшать погрешности в определении параметров землетрясения службами срочных доносений и уточнять региональные параметры моделей оценки последствий землетрясений.

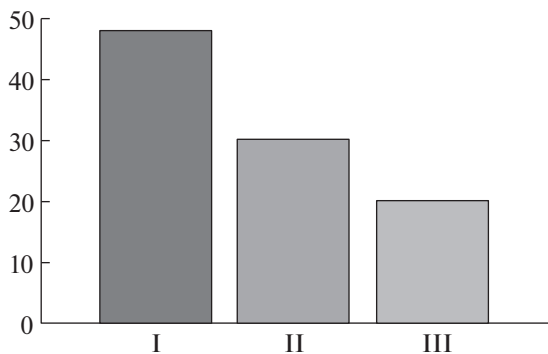


Рис. 3. Степень влияния погрешностей групп факторов на надежность оценки потерь.

### МИНИМИЗАЦИЯ ВЛИЯНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ В ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ОТДЕЛЬНЫХ ФАКТОРОВ НА НАДЕЖНОСТЬ ОЦЕНОК ПОТЕРЬ

Минимизация влияния I группы факторов – “очаг”, возможна за счет повышения точности определения параметров землетрясений в режиме службы срочных донесений и заблаговременного определения рейтинга сейсмологических служб для разных сейсмоопасных зон. Для уменьшения влияния факторов “поле” и “уязвимость” предлагается калибровка моделей оценки последствий землетрясений с использованием информации о последствиях прошлых событий.

Разработана процедура определения рейтинга сейсмологических служб мира для зон Флинна–Энгдала [20] на основе оценки погрешностей в определении параметров сильных землетрясений. На примере данных ССД ФИЦ ЕГС РАН выполнены оценки погрешностей для 50 сейсмических регионов (рис. 4) за период 1990–2010 гг.

На рис. 5 приведены данные о распределении событий по выбранным зонам. Число событий для большинства зон колеблется от нескольких десятков до нескольких сотен. Их наборы в каждой зоне образуют представительные статистические выборки.

Для получения оценок погрешностей выполнена последовательность действий:

1. Определено попадание каждого эпицентра в выбранную зону.

2. Для каждого события в группе вычислены разницы между соответствующими параметрами землетрясений (координатами, глубинами, магнитудами), определенными ССД ФИЦ ЕГС РАН и инструментальным каталогом ISC GEM [27]. Эти разницы рассмотрены как ошибки параметров.

3. Осуществлено зонирование территории мира по величине средних ошибок в определении эпицентрального расстояния, магнитуды и глубины очага.

В табл. 3 показаны осредненные оценки ошибок для континентов.

Сравнение средних ошибок в определении в оперативном режиме параметров землетрясений (за исключением магнитуды) по континентам за разные интервалы времени (1991–2000 гг. и 2001–2010 гг.) показывает, что точность определения параметров ССД ФИЦ ЕГС РАН увеличилась в 2 раза. Это объясняется, в первую очередь, внедрением цифровой наблюдательной аппаратуры и получением оперативного доступа сейсмологических служб мира к полному набору инструментальных измерений [12].

На рис. 6 показаны диапазоны ошибок в определении расстояния от эпицентра землетрясения до любой текущей точки, на рис. 7 – ошибки в определении глубины. Для отдельных районов с

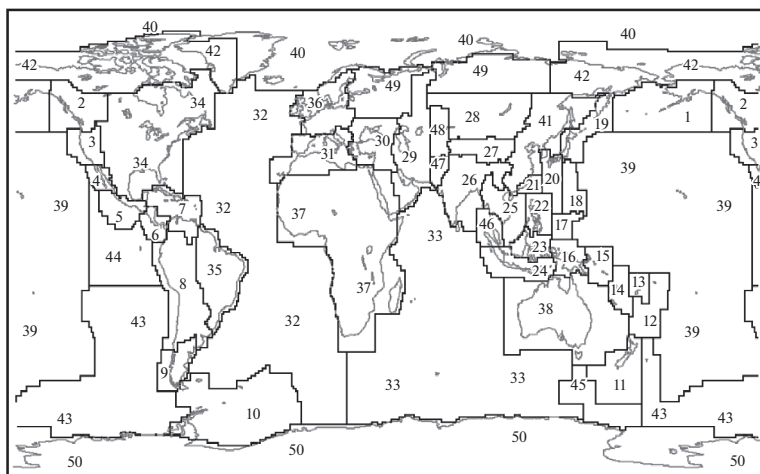


Рис. 4. Сейсмические регионы по [20].

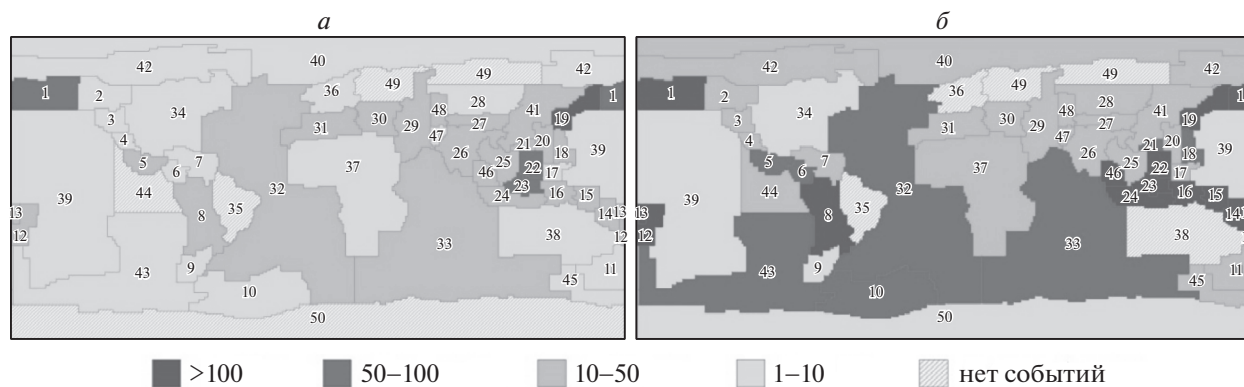


Рис. 5. Распределение событий по зонам Флинна–Энгдала до (а) и после (б) 2000 г.

очень плохими оценками глубины в период до 2000 г. ошибка превышала 30 км. После 2000 г. ошибки в определении глубин уменьшились в 1.5 раза. Ошибки в определении расстояния от эпицентра до любой текущей точки с учетом ошибок в определении координат и глубины изменяются в пределах от величин близких к нулю до более чем 100 км. В основном, ошибки для событий после 2000 г. попадают в диапазон 1–30 км (см. рис. 6б) и 40–80 км (см. рис. 7б). Наибольшие значения ошибок получены для южного полушария.

Анализ распределения зон с разным уровнем погрешностей позволяет сделать вывод о том, что в оперативном режиме точность определения параметров ССД ФИЦ ЕГС РАН сильно отличается для разных зон Флинна–Энгдала. Для территории РФ служба дает наиболее точные оценки положения очага и его глубины (см. рис. 7).

В целом за последние 10 лет точность определения ССД ФИЦ ЕГС РАН параметров землетрясений в оперативном режиме увеличилась в 2 раза.

Выполненные оценки погрешностей в определении параметров сильных землетрясений позволили выявить зоны, где погрешности в определении параметров событий не превышают 10–20 км

(см. рис. 6б и 7б). Рейтинг ССД ФИЦ ЕГС РАН при определении местоположения очага довольно высок для территории РФ и для отдельных зон Флинна–Энгдала (табл. 4).

Заблаговременное определение рейтинга сейсмологических служб России и мира для различных зон Флинна–Энгдала позволяет значительно повысить надежность оперативных оценок потерь от землетрясений.

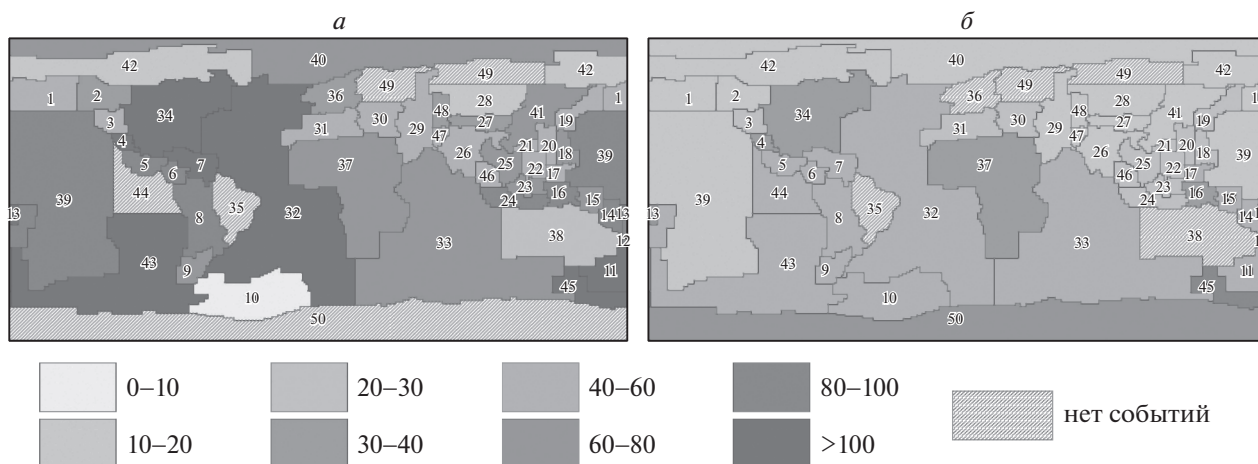
Минимизация влияния II и III групп факторов (“поле” и “уязвимость”) возможна за счет калибровки соответствующих моделей.

В качестве примера калибровки моделей макросейсмического поля рассмотрено Курчалойское землетрясение 2008 г. Процесс калибровки включает:

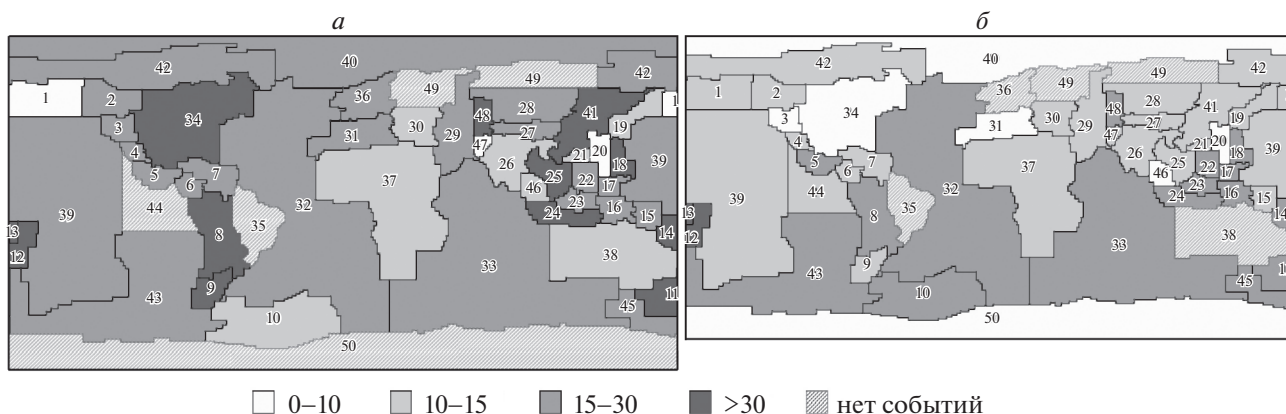
- моделирование распределения сейсмической интенсивности с использованием разных вариантов входных данных (табл. 5): уравнений макросейсмического поля с разными региональными коэффициентами, отношениями полуосей эллипса и ориентациями эллипса макросейсмического поля;
- совмещение наблюдаемого макросейсмического эффекта и расчетных макросейсмических полей;

Таблица 3. Параметры пространственного распределения погрешностей в определении местоположения эпицентров землетрясений, магнитуд и глубин очагов для разных континентов

Континенты	Количество событий		Величина ошибки (среднее значение)					
			расстояние		магнитуда		глубина	
	до 2000 г.	после 2000 г.	до 2000 г.	после 2000 г.	до 2000 г.	после 2000 г.	до 2000 г.	после 2000 г.
Евразия	577	1475	49.46	19.84	0.69	0.34	22.74	12.58
Африка	18	47	55.95	29.52	0.22	0.33	19.02	10.11
Северная Америка	112	357	73.34	28.3	0.27	0.4	20.3	11.88
Южная Америка	51	292	54.99	3.68	0.94	0.84	25.2	11.98
Австралия	210	1139	81.6	39.89	1.07	0.58	41.31	24.02



**Рис. 6.** Зонирование сейсмоопасных регионов мира по величине погрешности в определении расстояний от эпицентра до рассматриваемой точки до (а) и после (б) 2000 г.



**Рис. 7.** Зонирование сейсмоопасных регионов мира по величине погрешности в определении глубины очагов землетрясений ССД ФИЦ ЕГС РАН до (а) и после (б) 2000 г.

• определение минимума суммы разностей зарегистрированных интенсивностей и полученных путем моделирования.

Расчеты последствий Курчалойского землетрясения 2008 г. в оперативном режиме выполнены с разными входными данными (см. табл. 5).

Анализ результатов сравнения показал, что среди вариантов расчета существуют практически совпадающие по интенсивности  $I_i$  с наблюдаемыми значениями. Это вариант № 1 с инструментальными параметрами очага ( $\varphi = 43.276^\circ$ ;  $\lambda = 46.229^\circ$ ;  $M = 5.6$ ;  $h = 15$  км;  $b = 1.5$ ;  $v = 3.6$ ;  $c = 3.1$ ;  $k = 1.5$ ;

**Таблица 4.** Погрешности в определении местоположения эпицентра ССД ФИЦ ЕГС РАН в разные периоды наблюдений (км)

Номер и название зоны Флина–Энгдала [20]	До 1990 г.	1990–2000 гг.	После 2000 г.
Taiwan Area	100–120	40–60	20–30
Philippine Islands	100–120	40–60	20–30
Kalimantan, Sulawesi & Moluccas	100–120	60–80	20–30
India and Southwestern China	100–120	40–60	10–20
Southern Xinjiang to Gansu	100–120	30–40	10–20
Western Asia	–	40–60	10–20



Таблица 5. Варианты расчета последствий Курчалойского землетрясения 11.10.2008 г.

№	Параметры события	Региональные коэффициенты уравнения макросейсмического поля	Отношение полуосей эллипса, $k$
1	43.276; 46.229 M = 5.6; h = 15 км [4]	$b = 1.5; v = 3.6; c = 3.1$ для Дагестана [7, 8]	1.5
2	Те же	$b = 1.5; v = 3.6; c = 3.1$ для Дагестана [7, 8]	2
3	»	$b = 1.5; v = 3.6; c = 3.1$ для Дагестана [7, 8]	4
4	»	$b = 1.6; v = 3.1; c = 2.2$ для Северного Кавказа [7, 8]	1.5
5	»	$b = 1.4; v = 3.5; c = 4.2$ для Закавказья [7, 8]	То же
6	»	$b = 1.52; v = 3.6; c = 1.6$ для Дагестана [3]	»
7	»	$b = 1.593; v = 3.41; c = 2.44$ по монографии [1]	»
8	43.3; 46.3 M = 5.9; h = 10 км NEIC	$b = 1.5; v = 3.6; c = 3.1$ для Дагестана [7, 8]	»
9	43.47; 46.34 M = 5.9; h = 15 км CSEM	$b = 1.5; v = 3.6; c = 3.1$ для Дагестана [7, 8]	»
10	43.37; 46.35 M = 5.6; h = 10 км уточненный Обнинск	$b = 1.5; v = 3.6; c = 3.1$ для Дагестана [7, 8]	»
11	43.15; 46.10 M = 5.6; h = 15 км [4]	$b = 1.5; v = 3.6; c = 3.1$ для Дагестана [7, 8]	»
12	43.276; 46.229 M = 5.6; h = 15 км [4]	$b = 1.5; v = 4; c = 3.8$ [9] для Юго-восточной Европы и Ближнего Востока	»

ориентация поля вдоль разломов) и вариант № 11 с макросейсмическим положением эпицентра ( $\varphi = 43.15^\circ; \lambda = 46.10^\circ$ ), остальные параметры как в варианте № 1). При этом наблюдаемые значения интенсивности в 2008 и 2014 гг. тоже имеют расхождения, которые в данном случае следует считать методической погрешностью эталонных данных. На рис. 8 показаны отклонения  $I$  для расчетных значений для вариантов № 1–12. Осредненные разницы на участках в 5 км показаны точками.

При повторной оценке последствий в 2016 г. (рис. 9) использованы следующие данные:  $\varphi = 43.20^\circ; \lambda = 46.14^\circ; M = 5.6; h = 15$  км [4]; уравнение Н.В. Шебалина с региональными коэффициентами для Дагестана:  $b = 1.5; v = 3.6; c = 3.1$ ; отношение полуосей эллипса  $k = 1.5$ ; поле ориентировалось под углом  $54^\circ$  в соответствии с решением механизма очага [4]. Эти исходные данные позволили получить оценки социальных

потерь, близкие к опубликованным МЧС и хорошо сопоставимые с положением и конфигурацией изосейст по наблюдаемым данным. Разница в площадях расчетной и наблюдаемой изосейсты 7 баллов составила 5%, а 6-балльной – 30% (рис. 10).

Совпадение опубликованных данных об ущербе [4] и полученных методом моделирования подтверждает вывод о состоятельности описания класса события аналогичного Курчалойскому землетрясению и правильность выбора параметров события и характеристик макросейсмического поля, а также о целесообразности использования уравнения Н.В. Шебалина для Дагестана с коэффициентами:  $b = 1.5; v = 3.6; c = 3.1$ ; коэффициента сжатия  $k = 1.5$  и ориентацией поля под углом  $54^\circ$  [11, 13] для оперативной оценки последствий аналогичного события в регионе.

В рассматриваемом районе за период с 1785 г. по 2006 г. произошло более 20 землетрясений с



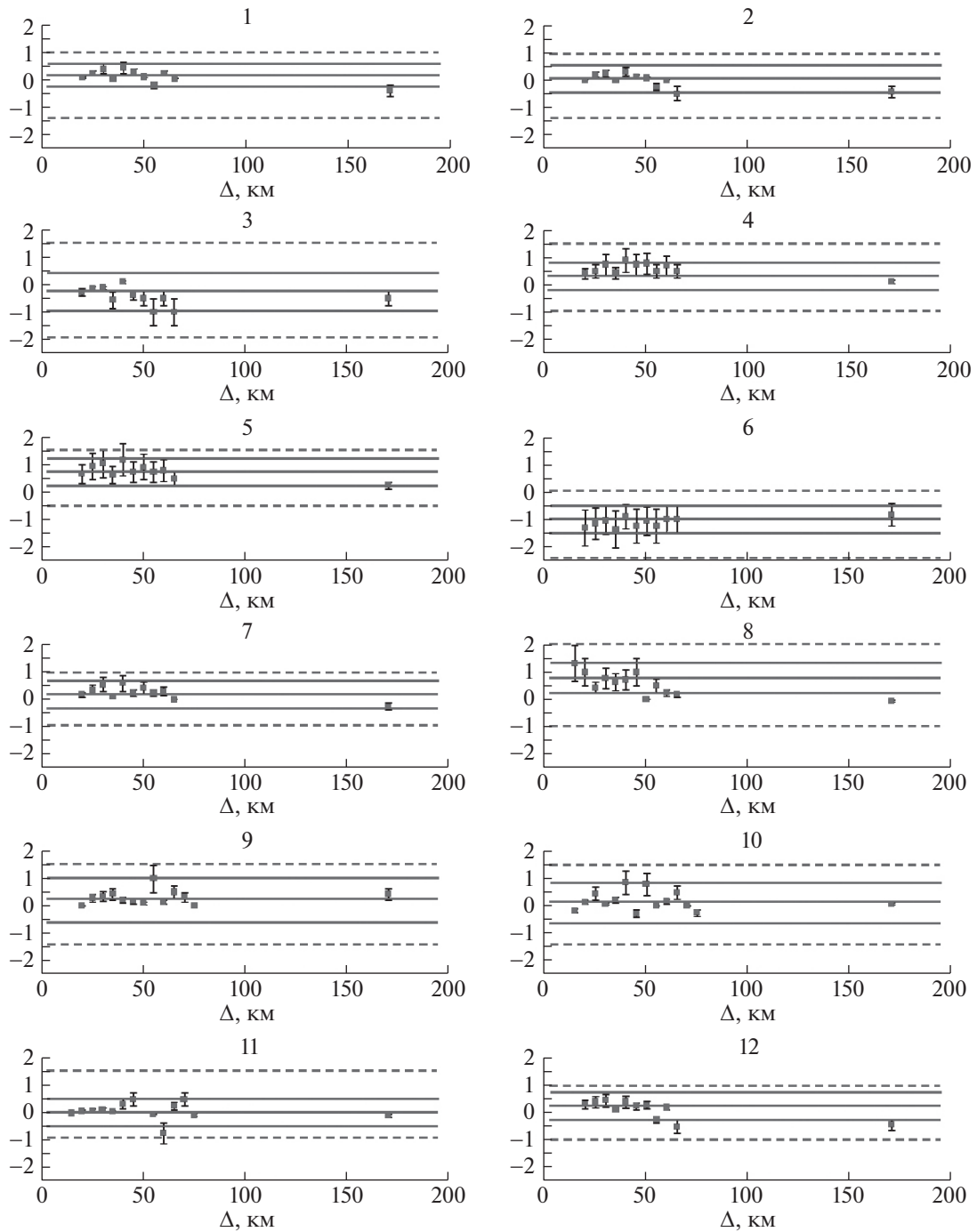


Рис. 8. Сравнение наблюдаемых и расчетных  $I$  для вариантов 1–12 (см. табл. 5).

интенсивностью сотрясений  $I_0 \geq 6$  баллов. В настоящее время продолжают работы по оцифровке изолиний, в первую очередь, высоких баллов для уточнения границ зоны (рис. 11) с устойчивыми калибровочными параметрами макросейсмического поля.

В результате калибровки модели макросейсмического поля были получены три параметра:

1) уравнение макросейсмического поля и его региональные коэффициенты; 2) ориентация осей макросейсмического поля; 3) отношение полуосей эллипса. Полученные калибровочные параметры были приписаны зоне, выделенной на рис. 11 жирной линией. Использование в системе “Экстремум” калибровочной информации для этого региона позволило минимизировать ошибку в определении потерь в оперативном режиме и

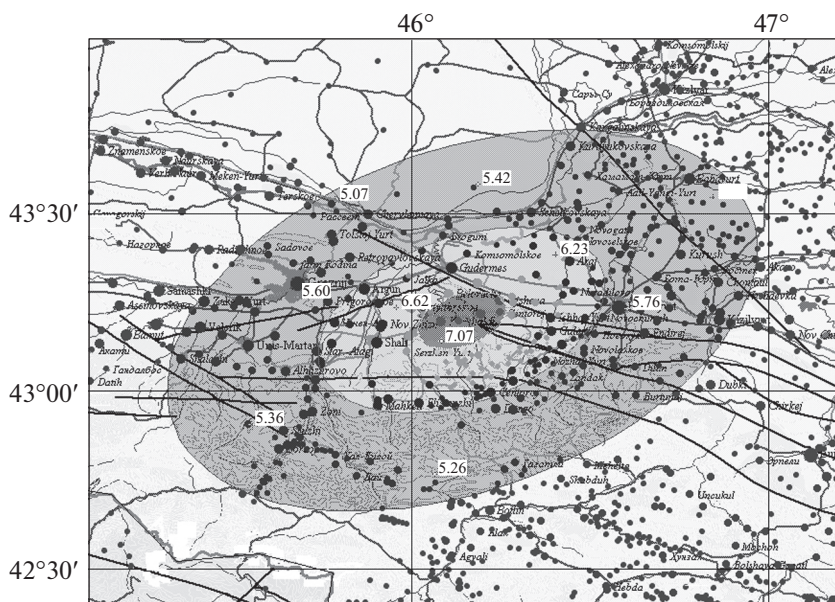


Рис. 9. Моделирование последствий Курчалойского землетрясения с окончательными параметрами.

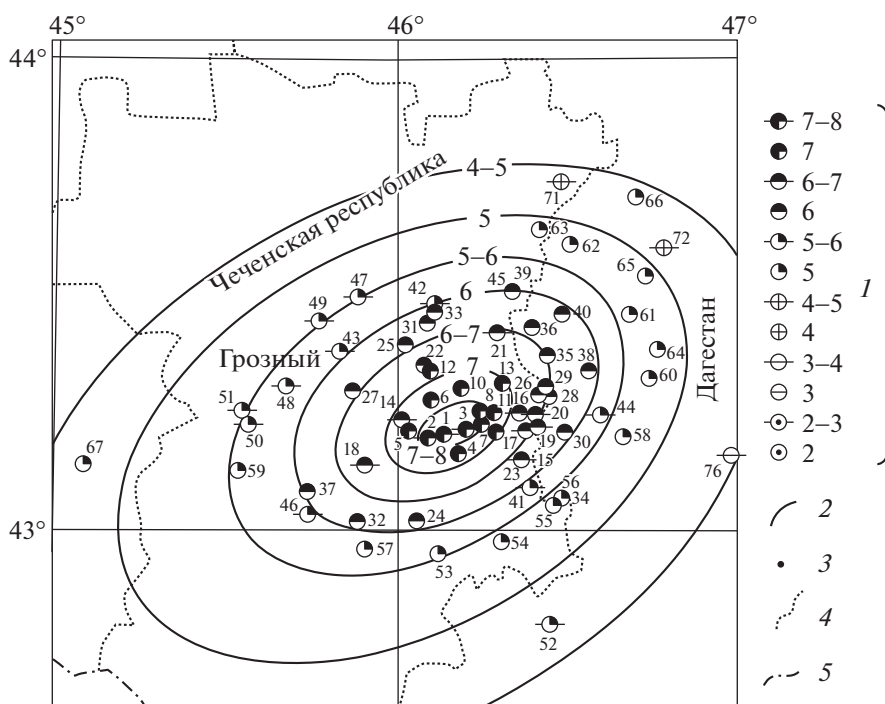
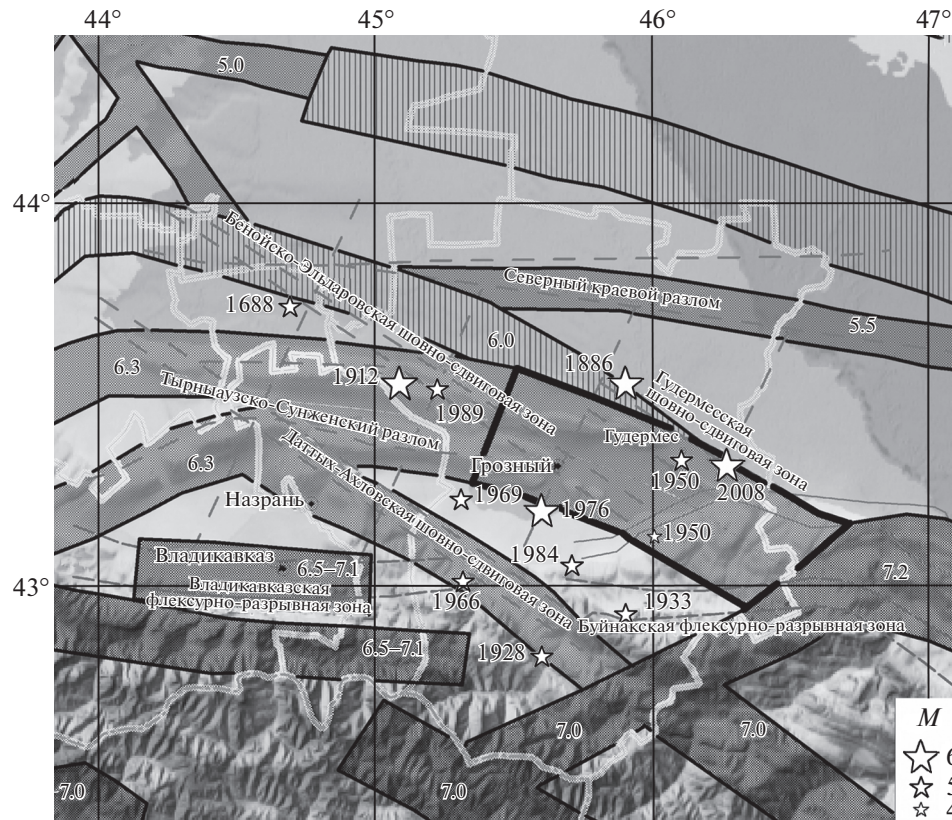


Рис. 10. Карта изосейст Курчалойского землетрясения 11 октября 2008 г. с  $I$  от 7–8 до 4–5 баллов по [1].

увеличить надежность оценок потерь в несколько раз.

Для выявления устойчивых (характерных) параметров функций уязвимости элементов риска в регионе также используют информацию о последствиях прошлых событий. Поскольку в системе “Экстремум” для моделирования возмож-

ного ущерба застройке используется нормальный закон, то процесс калибровки включает подбор его двух параметров: определенной и не менее определенной степени повреждений для сооружений рассматриваемого типа и среднеквадратическое отклонение случайной величины – степени повреждения здания. В качестве примера ка-



**Рис. 11.** Карта эпицентров сильнейших землетрясений центральной части Терско-Каспийского прогиба на фоне основных структурных элементов по “Схеме сейсмогенерирующих структур Чеченской Республики и сопредельных территорий и зон ВОЗ ( $M_{max} > 6$ )”.

либровки моделей уязвимости элементов риска (зданий) рассмотрено землетрясение в Л’Аквиле, Италия в 2009 г.

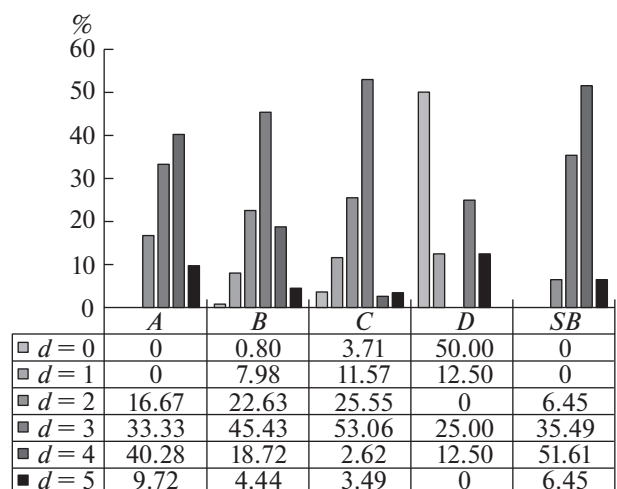
На рис. 12 приведены эмпирические данные о распределении наблюдаемых степеней повреждений зданий разного типа во время землетрясения 2009 г. в Италии. Количество зданий в процентах, получивших степени повреждений от  $d = 0$  (нет повреждений) до  $d = 5$  (полное обрушение), может быть использовано для получения калибровочных параметров региональных функций уязвимости застройки в Италии.

Ниже приводится перечень основных баз данных о последствиях землетрясений, анализируются их полнота и применимость для решения задачи минимизации влияния рассмотренных факторов на надежность оценок потерь.

**АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ БАЗ ДАННЫХ О ПОСЛЕДСТВИЯХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ИХ ПРИМЕНИМОСТЬ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ОПЕРАТИВНЫХ ОЦЕНОК**

Чаще всего информация о негативных последствиях катастроф собирается сразу после собы-

тия, приведшего к чрезвычайной ситуации, в связи с необходимостью проведения поисково-спасательных работ и планированием работ по восстановлению разрушенных зданий и систем



**Рис. 12.** Распределение наблюдаемых степеней повреждений зданий разного типа во время землетрясения 2009 г. в Италии.

жизнеобеспечения. При этом качество информации и доступность к конфиденциальным источникам информации оставляют желать лучшего.

Существующие в настоящее время базы данных о последствиях землетрясений на глобальном уровне довольно разнородны и, как правило, не включают полного описания параметров события и его последствий. К большинству глобальных баз данных нет открытого доступа. Для отдельных сильных землетрясений собирается информация о последствиях на национальном или региональном уровнях. Хорошо известны такие базы данных для стран Латинской Америки [17] и др. Довольно часто возникают сложности в определении последствий конкретного события из-за больших расхождений в оценках социальных потерь и отсутствия источника информации.

В настоящем разделе анализируются наиболее достоверные базы данных о последствиях землетрясений на глобальном уровне. К ним относятся, в первую очередь, базы данных страховых компаний Swiss Re и Munich Re, и база о последствиях катастроф EM-DAT, созданная и поддерживаемая Исследовательским центром эпидемиологии катастроф в Брюсселе.

База данных перестраховочной компании Munich Re NATHAN (Natural Hazards Assessment Network) содержит информацию о последствиях природных катастроф, начиная с 1979 г. по настоящее время, включая землетрясения. Наиболее полными и достоверными считаются данные после 1980 г. На сайте компании размещена веб-версия базы данных NATHAN, которая состоит из 3-х модулей и содержит информацию о количестве погибших и экономических потерях. По сравнению с ранней версией базы данных, когда можно было загрузить стандартную информацию, новый инструмент NatCatSERVICE (Natural catastrophe know-how for risk management and research) позволяет получить доступ к более обширной информации и выполнить анализ данных (<https://www.munichre.com/en/reinsurance/business/non-life/natcatservice/index.html>). Несмотря на расширение функций и доступа к данным, исходные данные в полном объеме остаются доступными только клиентам Munich Re.

База данных SIGMA перестраховочной компании Swiss Re – вторая по полноте после базы данных о последствиях Munich Re. Содержит информацию о последствиях природных и техногенных катастроф за период с 1970 г. по настоящее время. Но, как и к базе Munich Re, к ней нет открытого доступа. Сведения о социальных и экономических потерях ежегодно публикуются в периодическом издании SIGMA (<http://www.swissre.com/sigma>). В публикацию включаются события, которые удовлетворяют критериям компании: больше 20 погибших и/или пропавших без вести, и/или

больше 50 раненых, и/или больше 2000 людей оставшихся без крова.

База данных EM-DAT природных, техногенных катастроф и конфликтах создана в 1988 г., содержит информацию о социальных и экономических последствиях с 1900 г. и постоянно обновляется за счет получения новых уточненных данных о социальных потерях и ущербе (<http://www.cred.be>). Для включения события в базу должен выполняться, по крайней мере, один из 4-х критериев: в результате события погибло 10 и более человек; число пострадавших составило 100 или более человек; объявлена чрезвычайная ситуация; поступила просьба об оказании международной помощи. К числу недостатков этой базы данных можно отнести отсутствие полной информации о параметрах землетрясения: времени возникновения землетрясений, типе магнитуды, глубине очага. В отдельных случаях наблюдаются ошибки в дате события за счет неточностей в определении времени возникновения землетрясений, так как не делается различия между локальным временем и временем UTC.

Национальный геофизический центр данных США поддерживает базу данных о последствиях разрушительных землетрясений мира. В базу включены события начиная с 2150 д.н.э. и до наших дней. Критериями для включения в базу являются экономические и социальные показатели: ущерб от землетрясения составляет порядка 1 млн долларов или более; в результате землетрясения погибло 10 или более человек, а также характеристики землетрясения: магнитуда 7.5 и более, интенсивность 10 баллов и более. В базу данных также включаются события, которые генерировали цунами. Система позволяет сделать выборку по годам и по странам (<http://www.ngdc.noaa.gov>). Для наиболее сильных событий приводятся данные не только по количеству погибших и раненых, количеству поврежденных и разрушенных домов и экономическим потерям, но и детальные описания макросейсмических проявлений, и также дается перечень публикаций для более глубокого изучения.

Университет Ричмонда в рамках проекта “База данных стихийных бедствий” с 2002 по 2006 гг. поддерживал базу данных о последствиях природных и техногенных катастроф, включая землетрясения. Информация о землетрясениях эпизодическая: около 100 событий с описанием погибших, раненых и ущербе для всех сейсмоопасных стран мира. Основное внимание было уделено сбору данных о наиболее сильных событиях, информация о которых уточнялась по мере выявления дополнительного материала (<http://learn-ing.richmond.edu/disaster/index.cfm>).

Азиатский центр по уменьшению последствий катастроф поддерживает специальный



веб-сайт, где приводится информация об унифицированных номерах природных катастроф (GLIDE numbers). Основная цель этого проекта способствовать поиску информации о последствиях природных катастроф в различных базах данных (<http://www.glidenumber.net/glide/public/search/search.jsp>).

Начиная с 2003 г. Центр по уменьшению последствий катастроф в г. Карлсруэ (Германия) проводит анализ достоверности и полноты существующих баз данных о социально экономических последствиях землетрясений мира и каталогов землетрясений с целью создания новой коммерческой базы CAT DAT [18]. В 2010 г. база CAT DAT интегрирована в Earthquake-report.com (<https://earthquake-report.com>) для оперативного пополнения информацией о последствиях сильных землетрясений в реальном масштабе времени.

В конце 2010 г. стартовал проект GEMECSD – ГИС ориентированная база, по созданию базы унифицированных данных о последствиях сильных землетрясений последних лет для калибровки моделей поведения зданий для отдельных регионов мира [26]. Она служит информационным центром по накоплению информации о последствиях землетрясений и вторичных явлений. Пользователи могут добавлять в базу информацию в соответствии с заранее установленными стандартами и протоколами. В базе хранится информация о параметрах землетрясения, социальных и физических последствиях, включая данные о наблюдаемом макросейсмическом эффекте и инженерном анализе поведения зданий и сооружений разного типа. Приоритет отдается событиям, произошедшим в разных сейсмоопасных районах мира за последние 40 лет. В настоящее время база включает детальные описания 79 событий и размещена на сайте: <https://platform.openquake.org>.

Наиболее полные базы данных о социальных и экономических последствиях землетрясений NATHAN, Sigma and EMDAT рассматривают природные и техногенные катастрофы как инциденты, последствия которых негативно сказываются на обществе. Они не анализируют природные события с точки зрения физического процесса и поэтому не уделяют должного внимания точности описания параметров событий. Такие базы, как правило, не включают землетрясения, в результате которых погибает небольшое количество людей или вообще отсутствуют погибшие. В то же время для калибровки моделей оценки потерь важны как события, приводящие к потерям, так и события с большими значениями магнитуды и не приводящие к потерям.

Выполненный анализ глобальных баз данных показывает, что отсутствие единых методологических подходов к созданию баз данных и единого терминологического аппарата ограничивают

прозрачность баз, затрудняют их сравнение с целью получения более достоверной информации.

Источники данных о последствиях также влияют на достоверность информации в разных базах. Необходимо использование по возможности больших источников информации и уточнение данных по мере появления новой информации.

Несмотря на значительное количество глобальных баз данных о последствиях и каталогов землетрясений, поддерживаемых национальными и международными агентствами, ни одна из них не может быть напрямую использована для калибровки моделей оценки потерь и определения рейтинга службы в рассматриваемом регионе.

Для повышения надежности оперативной оценки последствий с использованием компьютерных имитационных моделей предлагается создать новую базу последствий землетрясений, которая помимо информации об уточненных параметрах событий и детальной информации об их последствиях будет включать калибровочные данные, характеризующие особенности сейсмических проявлений для различных сейсмоопасных регионов. Калибровочные данные, связывающие описания события (время, место, глубина, магнитуда) с его последствиями (распределение интенсивностей, степень повреждения застройки, число пострадавших и погибших), могут быть использованы при уточнении значений свободных коэффициентов имитационных моделей. Объединение перечисленных данных в одной базе знаний – важная задача, обеспечивающая возможность калибровки компьютерных имитационных моделей, предназначенных для оценки последствий сильных событий.

## ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СОДЕРЖАНИЯ БАЗЫ ЗНАНИЙ

Предлагаемая авторами база знаний должна обеспечить подбор и хранение калибровочных коэффициентов, уточняющих положение эпицентра, распределение интенсивности колебаний грунта, степени повреждения зданий и сооружений, а также степени поражения населения, расположенного в зданиях, транспорте и на открытой местности.

Делается допущение, что калибровочные коэффициенты будут обладать определенной устойчивостью в пределах географических и геологических зон, что позволит записать их границы в базу знаний так, чтобы на случай повторения сильного события (попадания его в зону) при оперативной оценке последствий можно было бы воспользоваться калибровочными (компенсационными) коэффициентами, привязанными к данной зоне.

Для выбора наиболее достоверной оценки местоположения эпицентра в базу знаний предлага-

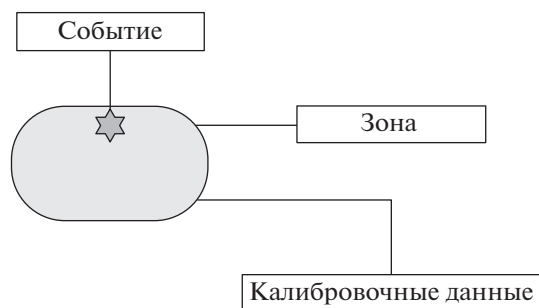


Рис. 13. Связь понятий.

ется записывать рейтинг служб срочных донесений, привязанный к выделенным зонам постоянства калибровочных коэффициентов.

Для уточнения оценки значений интенсивностей в точках пространства в базу знаний предлагается записать коэффициенты уравнения макросейсмического поля, характерную величину сжатия эллипса макросейсмического поля и его ориентировку.

Для уточнения оценок степени повреждения зданий необходимо определить и запомнить значение коэффициентов, определяющих качество (уязвимость) застройки на территории выделенных зон.

Для уточнения степени поражения населения соответствующие коэффициенты должны учесть время, прошедшее с последнего события в регионе, культурные и религиозные особенности населения.

Событие и калибровочные данные связаны единым координатным пространством (рис. 13), в котором зафиксированы границы зоны, с привяз-

анными к ней калибровочными данными и параметрами эпицентра. Каждому событию может соответствовать набор зон устойчивости групп параметров калибровки моделей оценки потерь.

Для выявления границ зон постоянства коэффициентов, их величин, кроме средств ввода данных о зарегистрированных сильных событиях, пользователю базы знаний требуются программные средства, обеспечивающие моделирование этих событий, оценку расхождений результатов моделирования с расчетными данными, а также минимизацию указанных расхождений за счет изменения значения калибровочных коэффициентов. Дополнительно должна быть обеспечена возможность распространять полученные коэффициенты на зоны аналогии.

Пространственный характер регистрируемых в базе знаний данных о произошедших и наблюдаемых событиях предопределяет их жесткую привязку ко времени и месту. Подбираемые в процессе моделирования калибровочные коэффициенты привязаны к зоне их постоянства, в пределах которой может быть зафиксировано несколько событий, составляющих характерную группу (рис. 14). При организации базы знаний первичными ключами должны стать неповторяющиеся индексы зафиксированных событий, на которые должны ссылаться, выделенные в процессе калибровки зоны, характеризующиеся постоянством значений калибровочных коэффициентов. Наборы калибровочных коэффициентов привязываются к зонам их постоянства.

При получении результатов обследования территории, подверженной очередному сильному событию, данные заносятся в базу знаний. Уточняются параметры землетрясения (координаты эпи-

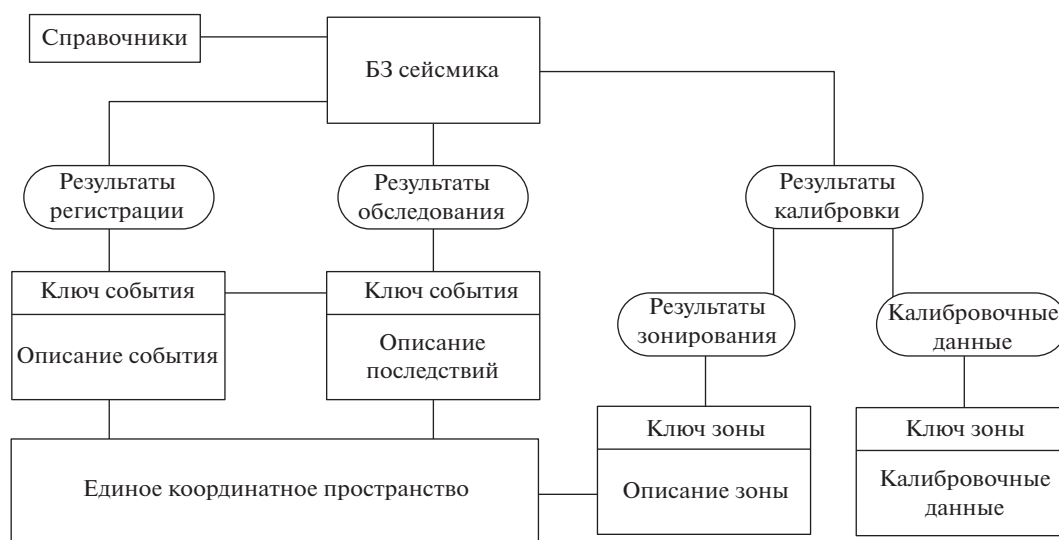


Рис. 14. Структура базы знаний.



Рис. 15. Результаты калибровки.

центра; глубина очага; магнитуда) и наблюдаемое распределение интенсивностей; ущерб застройке; социальные потери (рис. 15). Далее, уточняется рейтинг служб срочных донесений методом сравнения оперативных данных и тех, что получены в процессе последующего анализа инструментальных и макросейсмических данных. После уточнения рейтинга производится подбор коэффициентов моделей прогнозирования потерь, обеспечивающих минимальное расхождение в наблюдаемом и зарегистрированном эффекте. Проверяется сходимость известных величин коэффициентов, характерных для данной зоны, со вновь полученными значениями. Принимается решение об изменении коэффициентов или границ зоны.

Зарегистрированные на определенное время границы зон, величины рейтинга служб срочных донесений и характерные коэффициенты при появлении новых значений из базы знаний не удаляются, а используются для выявления тенденций к изменению.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье выполнен анализ факторов, влияющих на надежность оперативных оценок последствий, приводятся результаты исследований по ранжированию этих факторов и поиску путей минимизации их негативного влияния за счет компенсации влияния наиболее значимых из них с использованием баз данных о последствиях про-

шлых событий и процесса калибровки расчетных моделей.

Разработаны структура и содержание базы знаний о последствиях, которая может быть использована для калибровки моделей по оценке последствий землетрясений в оперативном режиме. Приведены процедуры применения данных макросейсмических наблюдений и инженерного анализа последствий для калибровки системы “Экстремум”.

Установлено, что калибровка сводится к двум действиям, позволяющим сформировать зоны постоянства калибровочных параметров и вычислить значения показателей, которые могут быть использованы для оперативных оценок потерь и риска.

Сравнивая результаты оценок, полученные с использованием калибровочных данных и без них, можно сделать вывод, что надежность оценок после калибровки возрастает во много раз, иногда во много десятков и сотни раз.

Один из наиболее важных результатов выполненного исследования – рекомендации о необходимости выполнения процесса калибровки в качестве обязательного атрибута организации оперативных расчетов последствий.

Показана эффективность использования откалиброванной системы для повышения качества оперативных оценок потерь. В случае успешного завершения калибровки системы, использующей



для этого базу знаний, возникает возможность существенно повысить надежность оперативной оценки последствий при попадании события в выделенную калибровочную область. Как показали исследования, исключаются грубые промахи в оценке последствий, а ожидаемая погрешность может быть в среднем снижена до величины, не превышающей 30% от зарегистрированных потерь.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аверьянова В.Н., Баулин Ю.И., Кофф Г.Л., Лутиков А.И., Миндель И.Г., Несмеянов С.А., Севостьянов В.В.* Комплексная оценка сейсмической опасности территории г. Грозного. М.: Минстрой России, 1996. 107 с.
2. *Асанов О.А., Левкович Р.А., Гайсумов М.Я., Керимов И.А., Габсатарова И.П., Головкова Л.В., Иванова Л.Е., Пономарева Н.Л., Чепкунас Л.С., Рыжикова М.И.* Макросейсмические проявления Курчалойского землетрясения 11 октября 2008 г. с  $M_w = 5.8$ ,  $I_0 = 7-8$  баллов // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. Обнинск: ГС РАН, 2014. С. 421–432.
3. *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.
4. *Габсатарова И.П.* Инструментальные параметры очага Курчалойского землетрясения 11 октября 2008 г. с  $KP = 14.5$ ,  $M_w = 5.8$ ,  $I_0 = 7-8$  (Чеченская республика) // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. Обнинск: ГС РАН, 2014. С. 433–448.
5. *Ларионов В.И., Фролова Н.И., Угаров А.Н., Суцев С.П., Козлов М.А., Малаева Н.А., Барская Т.В.* Оценка сейсмического риска // Геоэкология. 2017. № 2. С. 11–26.
6. *Шебалин Н.В., Еришов И.А., Шестоперов Г.С. и др.* Улучшенный вариант шкалы сейсмической интенсивности (MMSK-86) на базе шкал MSK-64 и МСССС-73 (заключительный отчет). М.: МСССС, ИФЗ. 1986. 61 с.
7. *Шебалин Н.В.* Методы использования инженерно-сейсмологических данных при сейсмическом районировании // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 95–121.
8. *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.
9. *Шебалин Н.В.* Количественная макросейсмика (фрагменты незавершенной монографии) // Вычислительная сейсмология. 2003. Вып. 34. С. 54–200.
10. *Фролова Н.И., Чепкунас Л.С., Малаева Н.С.* Учет региональных особенностей затухания сейсмической интенсивности при оперативной оценке потерь от землетрясений // Геоэкология. 2012. № 1. С. 63–74.
11. *Фролова Н.И., Габсатарова И.П.* Использование макросейсмических данных для повышения надежности оперативных оценок потерь на примере Курчалойского землетрясения // Матер. 9-й Международной научно-практ. конф. “Геориск-2015”: в 2 т. / Отв. ред. В.И. Осипов. М.: РУДН, 2015. Т. 2. С. 391–399.
12. *Фролова Н.И., Коломиец М.В., Угаров А.Н., Барская Т.В.* Оценка погрешностей в определении параметров землетрясений ССД ГС РАН // Матер. 9-й Международной научно-практ. конф. “Геориск-2015”: в 2 т. / Отв. ред. В.И. Осипов. М.: РУДН, 2015. Т. 1. С. 527–534.
13. *Фролова Н.И., Боннин Ж., Габсатарова И.П., Угаров А.Н., Барская Т.В.* Анализ факторов, влияющих на надежность оперативных оценок потерь от землетрясений // Сб. тр. конф. Сергеевские чтения. М.: РУДН, 2016. Вып. 18. С. 230–234.
14. *Bonnin J., Frolova N., Larionov V., Shakhramanian V., Sushchev S., Ugarov A., Kozlov M., Starovoit O.* Reliability of possible earthquake impact assessment with alert seismological surveys application // European Seismological Commission. XXVIII General Assembly. Genoa, Italy, 1–6 September 2002. Book of Abstracts. P. 63.
15. *Bonnin J., Frolova N.* Near real-time loss assessment due to strong earthquakes: the state of the art // European Seismological Commission, XXIX General Assembly. Abstracts. Potsdam: University and GFZ Potsdam, 2004. P. 168.
16. *Bonnin J., Frolova N.* Global systems for earthquake loss estimation in emergency mode // Proc. of XV Int. scientific and practical conf. “Issues of protection of population and territories from emergencies”, Emercom of Russia, 2010, Moscow, FGU VNII GoChS, P. 195–203.
17. *Cardona O.D., Ordaz M., Salgado-Galvez M.A., Barbat A.H.* Latin American and Caribbean earthquakes in the GEM’s Earthquake Consequences Database (GEMECD) // Natural Hazards. October 2017. doi 10.1007/s11069-017-3087-9
18. *Daniell J.E.* The Socioeconomic Impact of Earthquake Disasters Earthquake Hazard, Risk, and Disasters // Elsevier Inc, chapter 9, 2014. <http://dx.doi.org/> doi 10.1016/B978-0-12-394848-9.00009-2
19. *European Macroseismic Scale 1992: (up-dated MSK-scale) // Cahier du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie. V. 7. G. Grunthal (ed). 1993.*
20. *Flinn E.A., Engdahl E.R.* Seismic and geographical regionalization // Bull. Seism. Soc. Am. 1974. V. 64. № 3. P. II. P. 771–993.
21. *Frolova N., Larionov V., Bonnin J.* Earthquake Casualties Estimation In Emergency Mode // Human Casualties in Earthquakes, Advances in Natural and Technological Hazards Research. Springer Science, 2011. P. 107–124.
22. *Frolova N., Bonnin J., Larionov V., Ugarov A.* Ways to Increase the Reliability of Earthquake Loss Estimations in Emergency Mode // Geophysical Research Abstracts. EGU General Assembly. 2016. V. 18, EGU2016–3278, 2016. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-3278.pdf>.

23. 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. T. 88. Прил. 1. С. 63–80. doi 10.1007/s11069-016-2653-x
24. Jaiswal K.S., Wald D.J. Improving PAGER's real-time earthquake casualty and loss estimation toolkit: challenges // The 15th World Conf. 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).
25. Jaiswal K.S., Wald D.J., Earle P.S., Porter K.A., Hearne M. Earthquake casualty models within the USGS prompt assessment of global earthquakes for response (PAGER) system // Advances in natural and technological hazards research, Springer, 2011. V. 29. P. 83–94.
26. 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
27. Storchak D.A., Giacomo D. Di, Bondár I., Harris J., Engdahl E.R., Lee W.H.K., Villaseñor A., Bormann P., and Ferrari G. ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009) // GEM Technical Report. 2012. V. 1.0.0. 128 p. GEM Foundation, Pavia, Italy. doi 10.13117/GEM.GEGD.TR2012.01
28. Tertulliani A., Arcoraci L., Berardi M., Bernardini F., Camassi R., Castellano C., Del Mese S., Ercolani E., Graziani L., Leschiutta L., Rossi A., Vecchi M. An application of EMS98 in a medium-sized city: The case of L'Aquila (Central Italy) after the April 6, 2009 Mw 6.3 earthquake // Bull. Earthquake Eng. 2011. V. 9. Is. 1. P. 67–80. doi 10.1007/s10518-010-9188-4
29. The practice of earthquake hazard assessment. R.K. McQuire (Ed.). Denver. 1993. 284 p.

## KNOWLEDGE BASE ABOUT PAST EARTHQUAKES CONSEQUENCES AS A TOOL TO INCREASE THE RELIABILITY OF NEAR REAL TIME LOSS ESTIMATION

N. I. Frolova<sup>a,#</sup> and A. N. Ugarov<sup>b,##</sup>

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

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

<sup>#</sup> *E-mail: frolova@esrc.ru*

<sup>##</sup> *E-mail: garo@esrc.ru*

A multi-factor analysis of the earthquake loss estimations reliability has been performed and the significance of various factors has been determined. Measures have been developed to compensate for the influence of the most significant factors on the reliability of near real time loss estimates. The ways to increase the reliability of risk assessments in the emergency mode at the expense of the “Extremum” system models calibration with the use of the impact knowledge base on the past events in Russia and the world are proposed. The structure of the knowledge base as well as the procedure for identifying zones with stable parameters of shaking intensity attenuation, vulnerability of buildings and population, and a rating of seismological services in Russia and the world are developed.

**Keywords:** *earthquakes, impact knowledge base, rating of seismological services, mathematical models calibration, shaking intensity, damage to buildings, social losses, reliability of near real time loss estimations*

### REFERENCES

1. Aver'yanova, V.N., Baulin, Yu.I., Koff, G.L., Lutikov, A.I., Mindel, I.G., Nesmeyanov, S.A., Sevost'yanov, V.V. *Kompleksnaya otsenka seismicheskoi opasnosti territorii g. Groznogo* [Complex estimation of seismic hazard for the Grozny City territory]. Moscow, Ministroi Rossii, 1996, 107 p. (in Russian)
2. 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. Macroseismic effect of the Kurchaloi Earthquake on October 11.2008 with Mw = 5.8, I<sub>0</sub> = 7–8. *Zemletryaseniya Severnoi Evrazii, 2008 god* [Earthquakes of the Northern Eurasia, 2008]. Obninsk: GS RAS, 2014, pp. 421–432. (in Russian)
3. Bystritskaya, Yu.V. Comparison of macroseismic and instrumental data (Dagestan earthquakes). *Seismichnost' i gidrogazokhimiya territorii Dagestana* [Seismicity and hydrogasgeochemistry of the Dagestan territory]. IG Dag FAN SSSR, 1978, vol. 2, no. 17, pp. 78–84. (in Russian)
4. Gabsatarova, I.P. Instrumental parameters of 11 October, 2008 Kurchaloi earthquake source, RP = 14.5, Mw = 5.8, I<sub>0</sub> = 7–8 (Chechen Republic). *Zemletryaseniya Severnoi Evrazii, 2008 god* [Earthquakes of the Northern Eurasia, 2008]. Obninsk: GS RAS, 2014, pp. 433–448 (in Russian)
5. Larionov, V.I., Frolova, N.I., Ugarov, A.N., Sushchev, S.P., Kozlov, M.A., Malaeva, N.A., Barskaya, T.V. Seismic risk assessment. *Geoekologiya*, 2017, no. 2, pp. 11–26. (in Russian)
6. Shebalin, N.V., Ershov, I.A., Shestoporov, G.S., et al. *Uluchshennyi variant shkaly seismicheskoi intensivnosti (MMSK-86) na baze shkal MSK-64 i MSSSS-73 (zaklyuchitel'nyi otchet)* [Improved version of seismic intensi-

- ty scale (MMSK-86) based on scales MSK-64 and MSSSS-73 (the final report). Moscow, MSSSS-IFZ, 1986, 61 p. (in Russian)
7. Shebalin, N.V. Procedures of engineering seismological data application for seismic zoning. *Seismicheskoe raionirovanie SSSR* [Seismic zoning of the USSR], Moscow, Nauka, 1968, pp. 95–121. (in Russian)
  8. Shebalin, N.V. Reference earthquakes and macroseismic field equations. *Novyi katalog sil'nykh zemletryasenii 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)
  9. Shebalin, N.V. Macro seismic problems. *Vychislitel'naya seismologiya*, 2003, vol. 34, pp. 54–200. (in Russian)
  10. Frolova, N.I., Chepkunas, L.S., Malaeva, N.S. Influence of regional peculiarities of seismic intensity attenuation on earthquake loss estimations in emergency mode. *Geoekologiya*, 2012, no. 1, pp. 63–74. (in Russian)
  11. Frolova, N.I., Gabsatarova, I.P. Macro seismic data application for increasing reliability of near real time loss estimations: the case of Kurchaloi earthquake. *Mater. 9 Mezhdunarodnoi nauchno-praktich. Konf. "Georisk-2015"* [Proc. of 9th International scientific and practical conference "GEORISK-2015"]. Moscow, RUDN, 2015, vol. 2, pp. 391–399. (in Russian)
  12. Frolova, N.I., Kolomiets, M.V., Ugarov, A.N., Barskaya, T.V. Uncertainty estimation in earthquake parameters determination by SSD GS RAS. *Mater. 9 Mezhdunarodnoi nauchno-praktich. Konf. "Georisk-2015"* [Proc. of 9th International scientific and practical conference "GEORISK-2015"]. Moscow, RUDN, 2015, vol. 1, pp. 527–534. (in Russian)
  13. Frolova, N.I., Bonnin, J., Gabsatarova, I.P., Ugarov, A.N., Barskaya, T.V. Analysis of factors contributing to reliability of loss estimation in near real time. *Sbornik trudov konferentsii "Sergeevskie cheteniya"* [Proc. of Sergeev Readings Conference]. Moscow, RUDN, 2016, vol. 18, pp. 230–234. (in Russian)
  14. Bonnin, J., Frolova, N., Larionov, V., Shakhramanian, V., Sushchev, S., Ugarov, A., Kozlov, M., Starovoi, O. Reliability of possible earthquake impact assessment with alert seismological surveys application. *European Seismological Commission. XXVIII General Assembly*, Genoa, Italy, 1–6 September 2002. Book of Abstracts, pp. 63.
  15. Bonnin, J., Frolova, N. Near real-time loss assessment due to strong earthquakes: the state of the art. *European Seismological Commission, XXIX General Assembly. Abstracts*. Potsdam, University and GFZ Potsdam, 2004, pp. 168.
  16. Bonnin, J., Frolova, N. Global systems for earthquake loss estimation in emergency mode. *Proc. of XV Int. scientific and practical conf. "Issues of protection of population and territories from emergencies"*, Emercom of Russia, 2010, Moscow, FGU VNII GOChS, pp. 195–203.
  17. Cardona, O.D., Ordaz, M., Salgado-Galvez, M.A., Barbat, A.H. Latin American and Caribbean earthquakes in the GEM's Earthquake Consequences Database (GEMECD). *Natural Hazards*. October 2017. DOI: 10.1007/s11069-017-3087-9.
  18. Daniell, J.E. The Socioeconomic impact of earthquake disasters. *Earthquake Hazard, Risk, and Disasters*. Elsevier Inc, chapter 9, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-394848-9.00009-2>
  19. European Macro seismic Scale 1992: (up-dated MSK-scale). *Cahier du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie*, vol. 7, G.Grunthal (Ed.), 1993.
  20. Flinn, E.A., Engdahl, E.R. Seismic and geographical regionalization. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1974, vol. 64, no. 3, part II, pp. 771–993.
  21. Frolova, N., Larionov, V., Bonnin, J. Earthquake casualties estimation in emergency mode. *Human Casualties in Earthquakes, Advances in Natural and Technological Hazards Research*. Springer Science, 2011, pp. 107–124.
  22. Frolova, N., Bonnin, J., Larionov, V., Ugarov, A. Ways to increase the reliability of earthquake loss estimations in emergency mode. *Geophysical Research Abstracts*. EGU General Assembly, 2016, vol. 18, EGU2016-3278, 2016. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-3278.pdf>
  23. 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, appendix 1, pp. 63–80. DOI: 88:S63-S80 DOI 10.1007/s11069-016-2653-x.
  24. 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)
  25. Jaiswal, K.S., Wald, D.J., Earle, P.S., Porter, K.A., Hearne, M. Earthquake casualty models within the USGS prompt assessment of global earthquakes for response (PAGER) system. *Advances in natural and technological hazards research*, Springer, 2011, vol. 29, pp. 83–94.
  26. 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.
  27. Storchak, D.A., Giacomo, D. Di, Bondár, I., Harris, J., Engdahl, E.R., Lee, W.H.K., Villaseñor, A., Bormann, P., and Ferrari, G. ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009). GEM Technical Report, 2012. V.1.0.0. 128 p. GEM Foundation, Pavia, Italy. DOI: 10.13117/GEM.GEGD.TR2012.01
  28. Tertulliani, A., Arcoraci, L., Berardi, M., Bernardini, F., Camassi, R., Castellano, C., Del Mese S., Ercolani, E., Graziani, L., Leschiutta, L., Rossi, A., Vecchi, M. An application of EMS98 in a medium-sized city: The case of L'Aquila (Central Italy) after the April 6, 2009 Mw 6.3 earthquake. *Bull. Earthquake Eng.* 2011, vol. 9, issue 1, pp. 67–80. DOI 10.1007/s10518-010-9188-4
  29. The practice of earthquake hazard assessment. R.K. McQuire (Ed.). Denver. 1993. 284 p.