

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 624.131.1:551.252

ЗОНИРОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИХ ПОСЛЕДСТВИЙ

© 2024 г. Н. И. Фролова^{1,*}, Н. С. Малаева¹, М. В. Коломиец^{2,**}, И. П. Габсатарова²,
М. И. Рыжикова², С. П. Сушев^{3,***}, А. Н. Угаров³

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

²Федеральный исследовательский центр “Единая Геофизическая Служба РАН” (ФИЦ ЕГС РАН),
Ленина пр. 189, Обнинск, Калужская обл., 249035 Россия

³Московский государственный технический университет им. Баумана (МГТУ),
2-я Бауманская ул. 5, Москва, 105005 Россия

*E-mail: frolovanina7@gmail.com

**E-mail: kolmar@gsras.ru

***E-mail: Sersan150@mail.ru

Поступила в редакцию 28.03.2024 г.

После доработки 16.04.2024 г.

Принята к публикации 01.06.2024 г.

В статье решается задача оценки погрешностей параметров землетрясений в оперативном режиме. Выполнен анализ погрешностей в определении местоположения события и глубины очага и их приемлемости для моделирования последствий сильных землетрясений в масштабе времени близкому к реальному. Актуальность исследования определяется необходимостью получения надежных оценок возможных потерь от землетрясений для принятия решения о реагировании и выборе стратегии поисково-спасательных работ с учетом наиболее пострадавших населенных пунктов. Целью исследования являлось ранжирование погрешностей для сейсмоопасных регионов мира и оценка их приемлемости для последующего использования при оперативной оценке потерь. Приводятся результаты зонирования погрешностей в определении параметров землетрясений Службы срочных доносений (ССД) ФИЦ ЕГС РАН по сравнению с параметрами инструментального каталога ISC-GEM. Показана положительная динамика уменьшения погрешностей за период 2010–2019 гг. по сравнению с предыдущим десятилетием. Определены зоны Флинна–Энгдала с минимальными значениями погрешностей, пригодными для моделирования надежных оценок последствий в оперативном режиме.

Ключевые слова: оперативная оценка, параметры землетрясений, погрешности определения координат и глубин сильных событий, моделирование последствий землетрясений, система “Экстремум”

DOI: 10.31857/S0869780924050031 EDN: QPMKLL

ВВЕДЕНИЕ

Трагические последствия землетрясений в Турции, Марокко и Афганистане, произошедших в 2023 г. в Альпийско-Гималайском сейсмоактивном поясе, показывают, что несмотря на значительный прогресс в изучении природы катастрофических землетрясений мира и совершенствование нормативных документов по сейсмостойкому строительству, по большей части, сильные и катастрофические землетрясения остаются непредсказуемыми, а сейсмический риск все еще остается довольно высоким. В первую очередь, это характерно для районов с быстрым ростом населения и недостатком финансирования мероприятий по усилению существующей застройки на случай сильного землетрясения.

Вопросы обеспечения безопасности населения и территорий от сейсмических катастроф и связанных с ними вторичных опасностей остаются крайне актуальными.

В заявлении CODATA¹ от 01.03.2023 г. <https://codata.org/wp-content/uploads/2023/03/A-Statement-on-the-February-2023-Earthquakes-in-Turkey-Syria-FINAL.pdf> в связи с постигшей народы Турции и Сирии гуманитарной катастрофой, вызванной землетрясениями 6.02.2023 г., отмечается важность научных усилий в предоставлении оперативной информации для лиц, принимающих

¹ Комитет по данным для науки и техники (CODATA) — междисциплинарный комитет Международного совета по науке.

решения об оказании гуманитарной помощи и других неотложных мероприятиях.

Такая информация может быть предоставлена соответствующими системами для оперативной оценки последствий, которые успешно развиваются последние 20 лет и активно используют большие данные (Big Data) для калибровки своих моделей. В настоящее время известны, по крайней мере, три глобальные системы, которые оперативно предоставляют информацию о возможных последствиях сильных событий. Система “Экстремум” одна из таких систем [5].

Опыт эксплуатации системы “Экстремум” позволил ранжировать факторы, которые влияют на надежность оценок потерь от землетрясений [17, 18]. Выделены четыре группы факторов: “очаг”, “макросейсмическое поле”, “уязвимость застройки” и “уязвимость населения” [13]. Наибольший вклад в погрешность результатов оперативного моделирования последствий дают возможные ошибки определения координат эпицентра, глубины, магнитуды, описания механизма очага, в том числе ориентации разрыва в очаге, а также неточности в описании анизотропии макросейсмического поля, проявляющиеся в некорректном учете изменчивости затухания интенсивности вдоль и вкост простирания горных структур, а также протяженных очагов.

Авторы статьи уделяют большое внимание калибровке моделей системы “Экстремум”, в том числе, учету влияния особенностей регионального затухания интенсивности и выделению зон с квазистабильными параметрами макросейсмического поля. Ранее авторами были изучены особенности затухания сейсмической интенсивности для отдельных зон на территории РФ и сопредельных стран [7–11], включая Албанию и Хорватию. На примере Байкальского региона были изучены региональные параметры функций уязвимости типовой застройки [12]. По существу, была выполнена калибровка региональных моделей системы “Экстремум”, предназначенной для оценки потерь от землетрясений и сейсмического риска.

Настоящее исследование является продолжением работ авторов по изучению погрешностей в оперативном определении Службой срочных донесений (далее – ССД) Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба РАН” (далее – ФИЦ ЕГС РАН) параметров гипоцентров в сравнении с данными других центров для отдельных сейсмоопасных районов мира [6]. Исследования осуществляются в интересах МЧС РФ для поддержки принятия решения о реагировании и выборе стратегии поисково-спасательных работ с учетом наиболее пострадавших населенных пунктов на основе данных моделирования последствий в реальном масштабе времени.

Целью настоящей работы являются уменьшение негативного влияния фактора “очаг” путем

ранжирования погрешностей в определении местоположения эпицентра и глубины очага для сейсмоопасных районов мира и оценка их приемлемости для последующего использования при оперативной оценке потерь.

В статье приводятся результаты зонирования погрешностей в определении параметров землетрясений ССД ФИЦ ЕГС РАН по сравнению с параметрами инструментального каталога ISC-GEM [19]. Показана положительная динамика уменьшения погрешностей за период 2010–2019 гг. по сравнению с предыдущим десятилетием. Выполнено зонирование сейсмоопасных районов мира по величине средне квадратического отклонения погрешности (СКП) определения ССД ФИЦ ЕГС РАН пространственного положения эпицентра землетрясения и глубины очага. Выделены зоны Флинна–Энгдала с минимальными значениями погрешностей, пригодными для моделирования надежных оценок последствий с использованием системы “Экстремум” в оперативном режиме.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ПРОЦЕДУРА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Погрешности в оперативном определении параметров землетрясений: координат эпицентра, глубины очага, магнитуды и ее типа сейсмологическими службами России и мира — один из важных факторов, влияющих на надежность оперативных оценок последствий землетрясений.

Несмотря на совершенствование национальных сетей сейсмологических наблюдений с привлечением цифровых станций мировой сети и использование программ автоматической обработки данных, которые позволяют обеспечить рост точности определения параметров землетрясений в режиме службы срочных донесений, задача систематического и заблаговременного определения погрешностей сейсмологических служб для разных сейсмоопасных зон остается крайне актуальной.

В статье метод оценки погрешностей применяется к оперативным параметрам ССД ФИЦ ЕГС РАН, которые сравниваются с уточненными параметрами землетрясений по инструментальному каталогу GEM-ISC.

ССД ФИЦ ЕГС РАН осуществляет в оперативном режиме сейсмический мониторинг территории России и Мира [3], обеспечивает органы государственной власти РФ и другие заинтересованные учреждения срочной информацией о параметрах произошедших землетрясений (время возникновения, координаты эпицентра, глубина очага, ошутимость в баллах, разрушительные последствия) [2]. Для землетрясений на территории России магнитудный порог обрабатываемых

событий составляет $m_b \geq 4.0$, для Евразии $m_b \geq 4.5$, для земного шара – $m_b \geq 5.5$.

В настоящее время ССД для определения параметров землетрясений использует следующие входные потоки информации от цифровых станций: волновые формы в режиме, близком к реальному времени; времена вступлений основных сейсмических волн (*arrival*) станций из международных и региональных центров, фрагменты волновых форм от станций, загружаемые по запросу и сводки в кодах МСК-85 и *IMS* (рис. 1, табл. 1). Автоматические донесения о параметрах землетрясений в течение 9–20 мин рассылаются в правительственные организации, министерства и ведомства, том числе в МЧС РФ, и в международные сейсмологические центры.

Первая версия инструментального каталога ISC-GEM была разработана в рамках проекта GEM на основе ежегодных сейсмических бюллетеней мира, выпускаемых ISC [14, 20]. В каталог, опубликованный в 2012 г., вошли события с уточненными параметрами землетрясений за период 1900–2009 гг. [21]. В настоящем исследовании используется версия каталога, включающая события до 2019 г. (Version 10.0, dated 21st March 2023. URL: <http://www/isc.ac.uk/iscgem/download.php>).

На рис. 2 приведена информация о количестве используемых в исследовании событий за период 1999–2019 гг. Число зарегистрированных ССД событий возросло с 1378 до 4560 в период с 1999 по 2007 г. После 2007 г. среднее число зарегистрированных ССД событий в год составило около 4500.

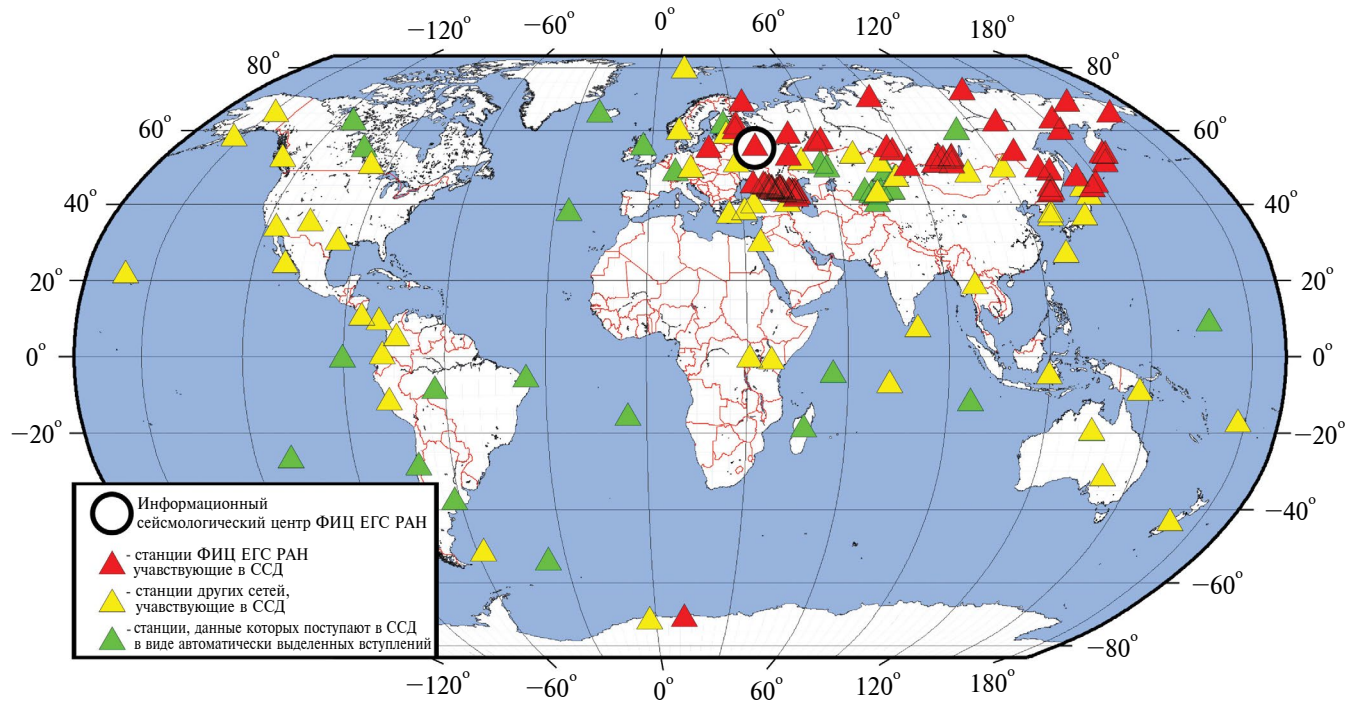


Рис. 1. Сейсмические станции, данные которых используются в ССД ФИЦ ЕГС РАН в режиме, близком к реальному времени по [2].

Таблица 1. Входные потоки информации для определения параметров землетрясений [4, 6]

Входные потоки информации	Количество станций			
	1999 г.	2009 г.	2019 г.	ССД, н. вр.
Волновые формы от цифровых станций в режиме, близком к реальному времени	9	68	86	113
Время вступлений основных сейсмических волн (<i>arrival</i>) из международных и региональных центров	8	40	32	45
Фрагменты волновых форм, загружаемые по запросу	11	11	44	40
Сводки в кодах МСК-85 и <i>IMS</i> телесейсмических/региональных станций России и СНГ	11 / 21	19 / 10	23 / 73	73

Ежегодное число событий в инструментальном каталоге ISC-GEM за рассматриваемый период изменялось от 1001 до 2083 (в среднем 1500 событий в год). Отчасти это произошло за счет увеличения числа станций в обработке землетрясений (см. табл. 1).

На рис. 3 указано количество исследуемых событий по зонам Флинна–Энгдала [16] для двух временных периодов. Оценка погрешностей в определении параметров сильных землетрясений выполнялась для 50 сейсмических регионов (табл. 2).

Процедура определения погрешностей ССД в определении местоположения эпицентра и глубины очага включала следующую последовательность действий:

1. Определение попадания каждого из эпицентров в выбранный регион (зону Флинна–Энгдала) и присвоение событию номера региона, по которому формируются группы.

2. Для каждого события в группе вычисление разницы между соответствующими параметрами землетрясений (координатами, глубиной очага), определенными разными сейсмологическими службами. Эти невязки рассматриваются как ошибки в определении параметров ССД.

Зонирование территории мира по величине средних ошибок в определении координат эпицентра ΔR и глубины очага Δh в оперативном режиме.

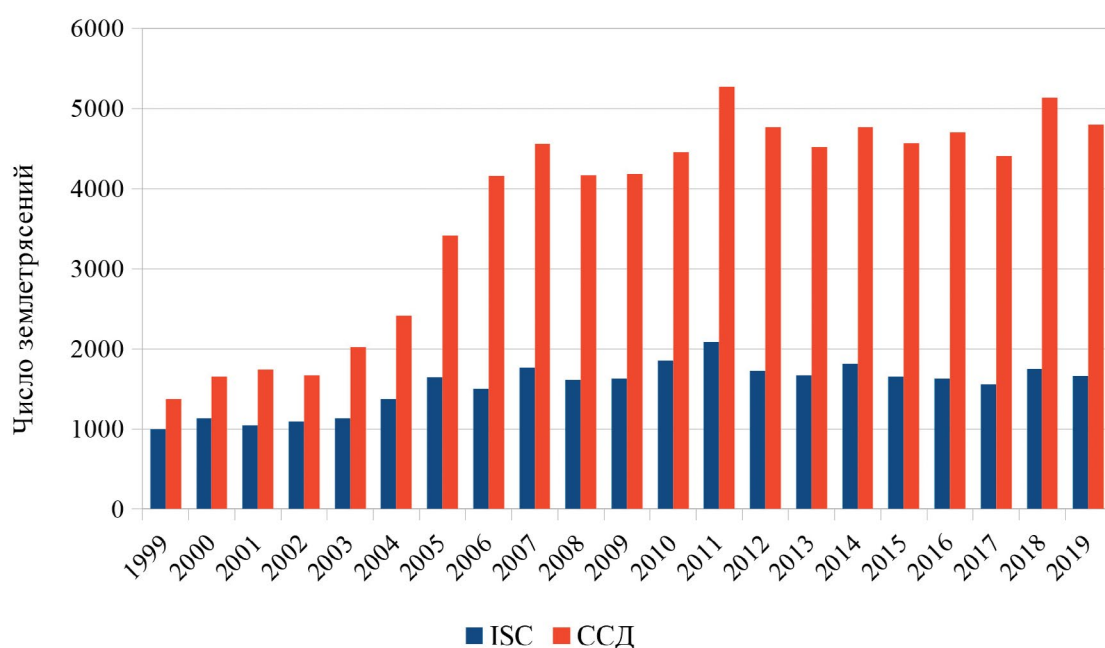


Рис. 2. Число землетрясений, зарегистрированных ССД ФИЦ ЕГС РАН за период 1999–2019 гг. и приведенных в инструментальном каталоге.

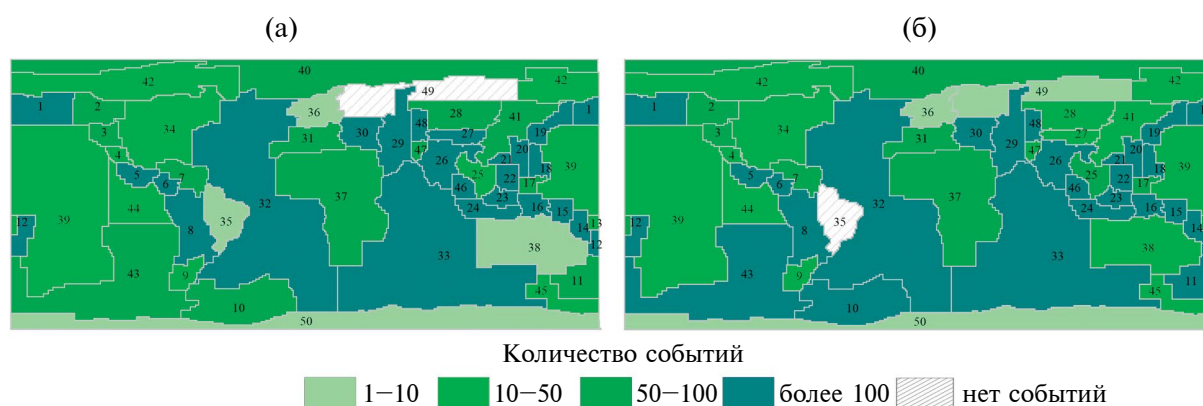


Рис. 3. Распределение числа исследуемых землетрясений по регионам Флинна–Энгдала за периоды времени: а) до 2010 г.; б) после 2010 г.

Продолжение таблицы 2

Номер зоны Флинна– Эндгала	Количество событий		Величина ошибки (среднее значение), км			
		01.2010– 12.2019	ΔR	Δh		
				01.1999– 12.2009	01.1999– 12.2009	
25	57	87	31	14	21	10
26	213	231	26	12	21	10
27	143	81	28	13	18	9
28	86	60	21	10	16	7
29	184	259	33	13	22	9
30	193	203	35	14	14	7
31	71	81	36	15	13	6
32	311	578	49	20	18	2
33	290	478	44	19	24	4
34	14	16	52	16	19	4
35	1	–	12	–	0	–
36	6	10	33	14	12	10
37	123	130	45	20	19	8
38	2	22	37	16	12	6
39	17	37	47	16	33	5
40	118	138	19	12	14	4
41	65	52	18	8	13	6
42	39	47	13	10	16	4
43	106	238	56	23	18	4
44	28	57	37	25	14	2
45	22	64	57	25	20	3
46	734	297	25	13	14	10
47	95	53	24	16	20	7
48	161	153	25	11	20	9
49	–	2	–	9	–	0
50	1	1	62	6	0	5

Таблица 2. Параметры пространственного распределения погрешностей в определении местоположения эпицентров землетрясений и глубин очагов для разных зон Флинна–Эндгала с 01.1999 по 12.2019 г.

Номер зоны Флинна– Эндгала	Количество событий		Величина ошибки (среднее значение), км			
		01.2010– 12.2019	ΔR	Δh		
				01.1999– 12.2009	01.1999– 12.2009	
1	457	547	24	13	15	01.2010– 12.2019
2	67	92	27	16	18	6
3	90	98	29	18	13	6
4	50	54	40	21	14	6
5	199	368	44	24	20	13
6	148	209	44	19	18	11
7	77	130	43	14	17	8
8	527	1151	48	20	23	10
9	23	35	45	24	17	9
10	112	321	44	20	20	12
11	62	161	50	22	30	9
12	1132	1632	47	23	48	14
13	55	84	58	22	38	12
14	646	935	43	20	28	12
15	635	903	43	16	22	14
16	441	517	36	16	21	10
17	103	119	28	13	26	13
18	281	362	30	15	24	11
19	916	1215	31	14	17	10
20	130	179	37	12	16	10
21	189	158	34	14	17	9
22	444	530	36	16	26	17
23	613	549	34	14	28	12
24	776	615	37	16	28	10

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Сравнение средних ошибок ΔR и Δh в определении параметров землетрясений ССД в оперативном режиме по континентам за разные интервалы времени показывает, что точность определения параметров увеличивается (табл. 3).

До 2009 г. погрешность определения координат эпицентра ΔR составляла 20–40 км, с 2010 до конца 2019 г. – 14–20 км. С 1999 по 2009 г. погрешность определения параметров глубины очага Δh уменьшилась до 10–24 км, а с 2010 г. точность определения Δh увеличилась почти в 2 раза до 7–13 км.

За весь рассмотренный период времени абсолютные значения погрешностей в определении координат ΔR для разных зон Флинна–Энгдала варьируют в диапазоне от 6 до 62 км, глубины Δh – от нуля до 48 км (см. табл. 2). В основном ошибки ΔR для событий до 2010 г. попадают в диапазон до 30–60 км, а после 2010 г. значительно уменьшаются и находятся в диапазоне 10–20 км. Ошибки Δh для событий в указанные периоды попадают в диапазон 15–30 км и до 10 км соответственно.

За период до 2010 г. наибольшие значения погрешностей ΔR получены для зон 13, 34, 43, 45, 50, расположенных в южном и западном полушариях, они превышают 50 км. Максимальное значение ΔR (62 км) получено для зоны 50 (рис. 4).

За период 2010–2019 гг. значения погрешностей ΔR уменьшаются в 2 раза для всех регионов. Максимальные значения ошибок в определении координат ΔR , полученные для регионов 44 и 45, составляют 25 км; минимальные значения составляют 8 км для зоны 41 и 6 км для зоны 50.

Погрешности в определении глубин Δh за временной интервал 2010–2019 гг. по сравнению с предыдущим десятилетием уменьшились в 2 раза и не сильно отличаются для разных зон Флинна–Энгдала. Для территории РФ (регионы 19, 28–30, 41, 42, 49) точность определения Δh в среднем увеличилась в 2.5 раза, а для регионов 32, 39, 44, 45 – более, чем в 7 раз (рис. 5).

Для территории РФ за весь рассмотренный период (по декабрь 2019 г.) ССД получены наиболее точные средние оценки положения эпицентра ΔR и глубины очага Δh – 18 и 12 км соответственно. Для регионов 41, 42 точность определения координат выше по сравнению с другими регионами на территории РФ. Погрешность ΔR для них составляет 13 и 11 км соответственно, тогда как для остальных от 15 до 25 км.

Точность определения глубины Δh для периода 1999–2009 гг. варьирует от 13 км для региона 41 до 22 км для региона 29. Погрешность определения глубины Δh с 2010 г. изменяется от 4 км (регион 42) и до 10 км (регион 19). В среднем за весь рассмотренный период погрешность в определении глубины Δh варьирует от 9 до 15 км.

Увеличение точности определения гипоцентра связано с увеличением числа станций, задействованных в работе ССД (см. табл. 1).

Интересно отметить тенденцию уменьшения значений погрешностей в определении местоположения эпицентров ΔR и глубин очага Δh при увеличении магнитуды землетрясения. В табл. 4 приведены погрешности ΔR и Δh для разных континентов в зависимости от диапазона магнитуды M_w для событий с января 2010 г. по декабрь 2019 г.

Для большинства исследуемых событий (~56%) в диапазоне магнитуд M_w 5–6 получены значения погрешностей в определении ΔR , не превышающие 20 км. Для других диапазонов магнитуд основная часть событий также лежит в диапазоне ΔR менее 20 км. Количество событий, для которых погрешность в определении местоположения эпицентра ΔR составляет более 40 км, не превышает 5% (рис. 6).

Среди исследованных зон Флинна–Энгдала с высоким уровнем сейсмичности наибольший интерес представляют зоны 29–31, частично относящиеся к территории России и расположенные в Альпийско-Гималайском сейсмоактивном поясе (АГСП). В 2023 г. зона АГСП характеризовалась чрезвычайно высокой сейсмической активностью. Здесь произошли катастрофические землетрясения: 6 и 20 февраля в Турции; 8 сентября

Таблица 3. Распределения погрешностей в определении местоположения эпицентров землетрясений ΔR , глубин очагов Δh для разных континентов

Континент	Количество событий	Величина погрешности (среднее значение), км	
		ΔR	Δh
	1999–2009/2010–2019	1999–2009/2010–2019	1999–2009/2010–2019
Австралия и Океания	2973 / 4254	44 / 20	33 / 13
Африка	194 / 211	42 / 18	17 / 7
Евразия	5546 / 5400	31 / 14	21 / 10
Северная Америка	1025 / 1384	33 / 18	16 / 10
Южная Америка	740 / 1637	47 / 19	22 / 10

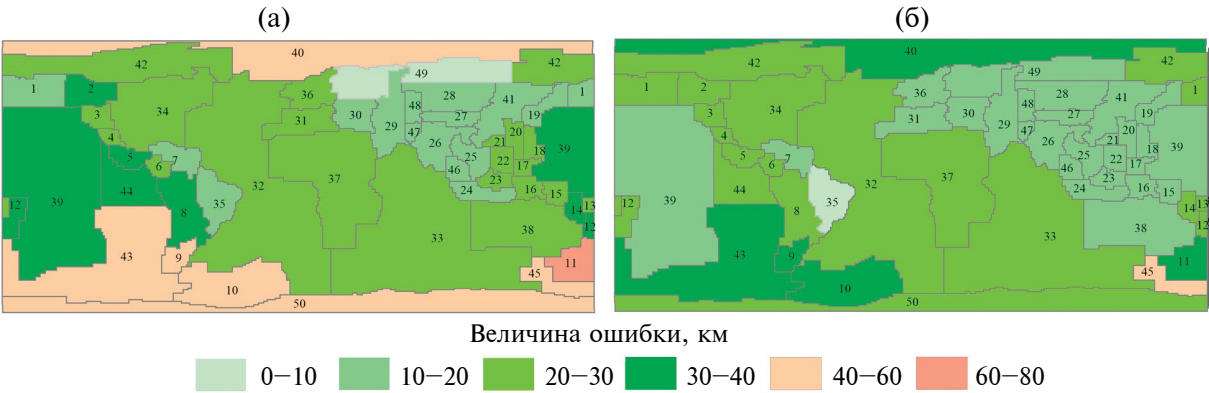


Рис. 4. Зонирование сейсмоопасных регионов мира по величине погрешности в определении координат ΔR до (а) и после 2010 г. (б).

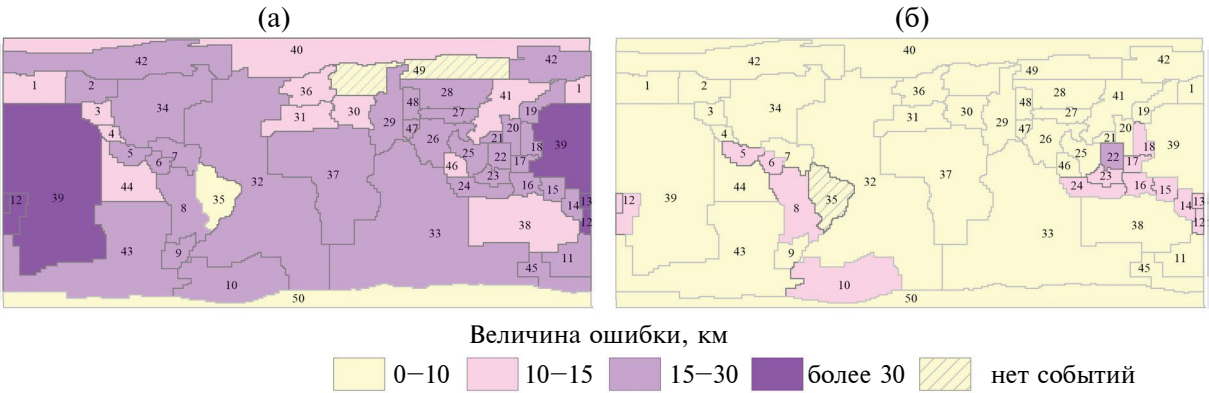


Рис. 5. Зонирование сейсмоопасных регионов мира по величине погрешности в определении глубины очагов Δh до (а) и после 2010 г. (б).

в Марокко; 7, 11 и 15 октября в Афганистане. В мае и июне на Черноморском побережье Краснодарского края произошла серия ощутимых землетрясений с магнитудами $3.1 \leq m_b \leq 4.4$ [1].

На рис. 7 показано процентное распределение событий по разнице значений погрешностей ΔR в зависимости от магнитуды M_w для зоны 30 в целом (см. рис. 7а) и отдельно для Северного Кавказа (см. рис. 7б).

Таблица 4. Распределения погрешностей в определении местоположения эпицентров ΔR и глубин очага Δh для разных диапазонов магнитуды M_w по континентам

Континент	Величина ошибки (среднее значение), км	
	Диапазоны магнитуды $M_w < 5 / 5-6 / 6-7 / > 7$	
	ΔR	Δh
	22 / 20 / 16 / 17	15 / 13 / 9 / 9
Африка	18 / 6 / 10 / –	7 / 5 / 6 / –
Евразия	17 / 18 / 12 / 13	12 / 7 / 9 / 8
Северная Америка	18 / 20 / 16 / 17	11 / 3 / 7 / 10
Южная Америка	22 / 18 / 17 / 12	11 / 10 / 8 / 11

Процентное распределение событий по разнице определения глубин в зависимости от магнитуды M_w показано на рис. 8. Для большинства событий (55%) в диапазоне магнитуд M_w 5–6 погрешности в определении глубины Δh не превышают 15 км, и в других диапазонах магнитуд M_w погрешность также находится в диапазоне $\Delta h < 15$ км. Количество событий, для которых $\Delta h > 30$ км, не превышает 5%.

ДИСКУССИЯ

Анализ полученных результатов показал значительное увеличение точности определения ССД ФИЦ ЕГС РАН параметров сильных событий РФ и мира в оперативном режиме за последнее десятилетие.

Для зон Флинна–Энгдала, куда входят сейсмоопасные территории РФ и сопредельных стран, был выполнен подробный анализ динамики уменьшения погрешностей в определении местоположения эпицентра ΔR . Анализ представленных на рис. 9 данных позволяет сделать вывод о значительном уменьшении погрешностей определения местоположения эпицентра ССД ФИЦ ЕГС РАН, особенно за период после 2010 г.

Исходя из предположения, что приемлемая надежность оценки последствий землетрясений

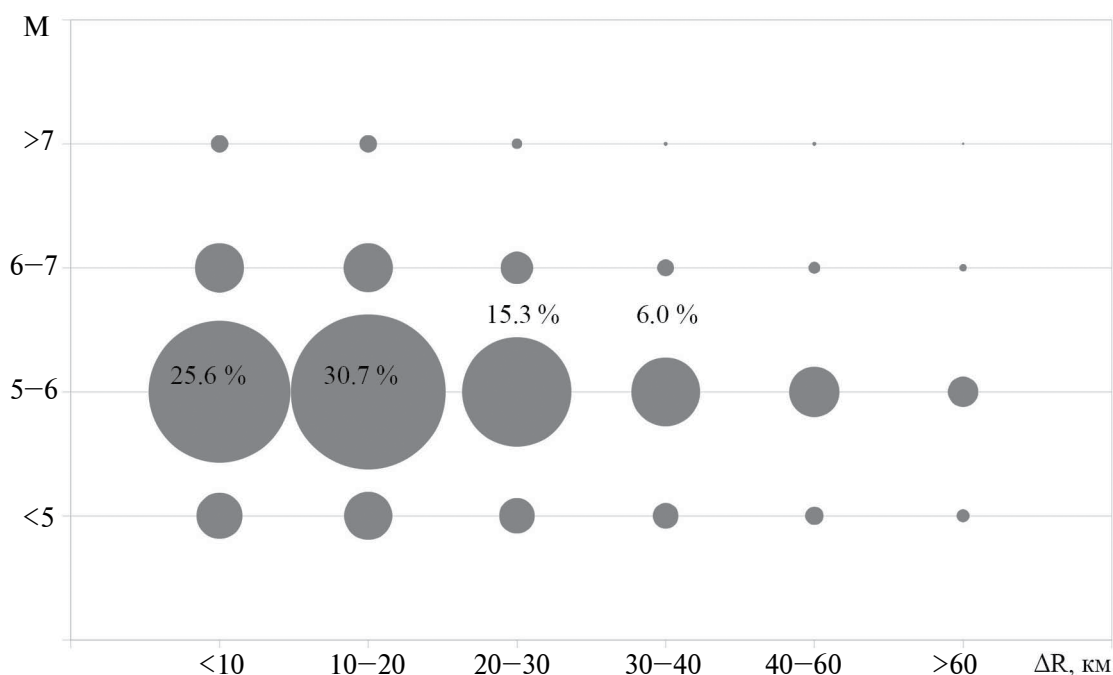


Рис. 6. Распределение событий в процентах по значениям погрешностей в определении координат ΔR для разных диапазонов магнитуд; радиус кружка зависит от количества событий в диапазоне; для не подписанных кружков процент событий $<5\%$.

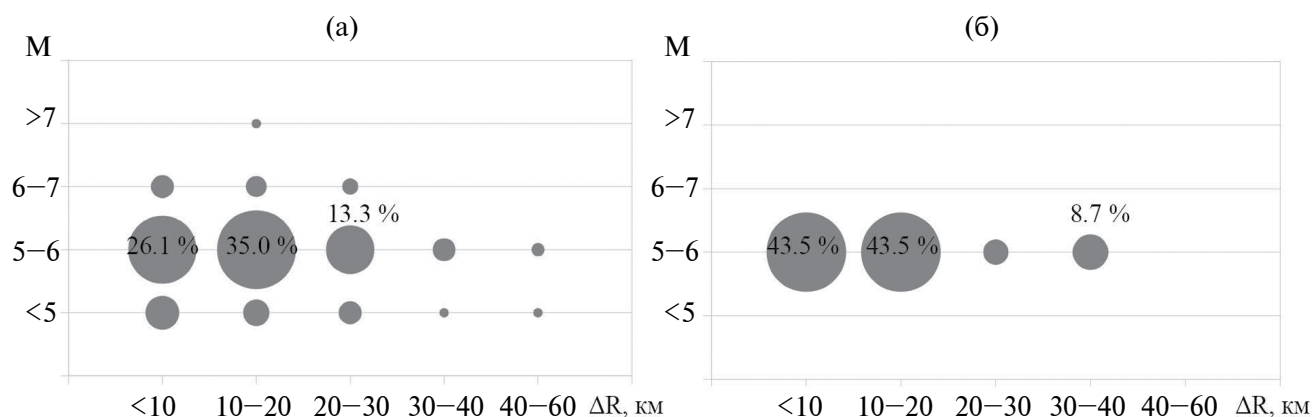


Рис. 7. Распределение событий по разнице определения координат ΔR в зависимости от магнитуды: а – зона FE 30; б – Северный Кавказ; неподписанные кружки – $<5\%$ событий.

в масштабе времени близкому к реальному с вероятностью ($P_\alpha = 0.85$) может быть достигнута при погрешности определения местоположения эпицентра ΔR меньше протяженности зоны поражения более чем в 5 раз, получено значение приемлемой погрешности $\Delta R = 12$ км.

Следует отметить, что для отдельных зон Флинна–Энгдала получены оценки погрешности в определении координат эпицентра землетрясения $\Delta R > 20$ км, соизмеримые с размерами крупных мегаполисов. В случае оперативного моделирования последствий землетрясения в зоне с такими погрешностями возможно ошибочное

исключение части городской застройки при оценке размеров ущерба.

Для получения надежных оперативных потерь от землетрясений с помощью системы “Экстремум” важно заблаговременно и систематически определять разброс погрешностей ΔR и Δh для минимизации их влияния. Результаты по зонированию погрешностей, полученные в настоящем исследовании, представлены в виде тематических карт для применения в информационных системах. В системе “Экстремум” [5] слой информации, содержащий границы зон с различной погрешностью ΔR и Δh , позволяет выбрать оптимальный

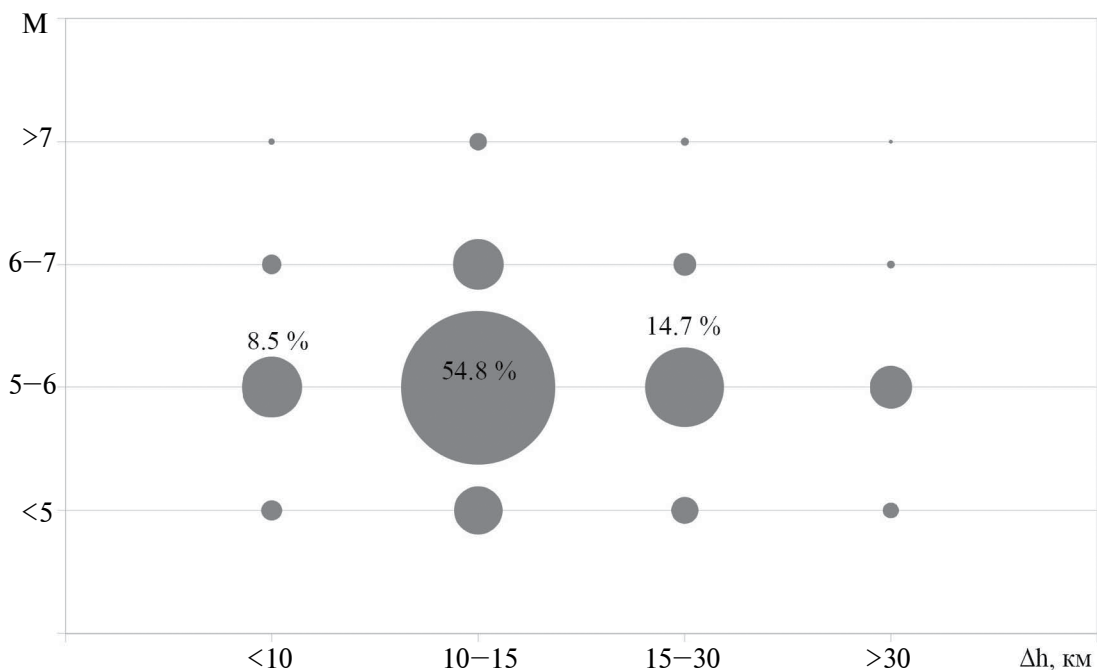


Рис. 8. Распределение событий по разнице определения глубин в зависимости от магнитуды; неподписанные кружки – <5% событий.

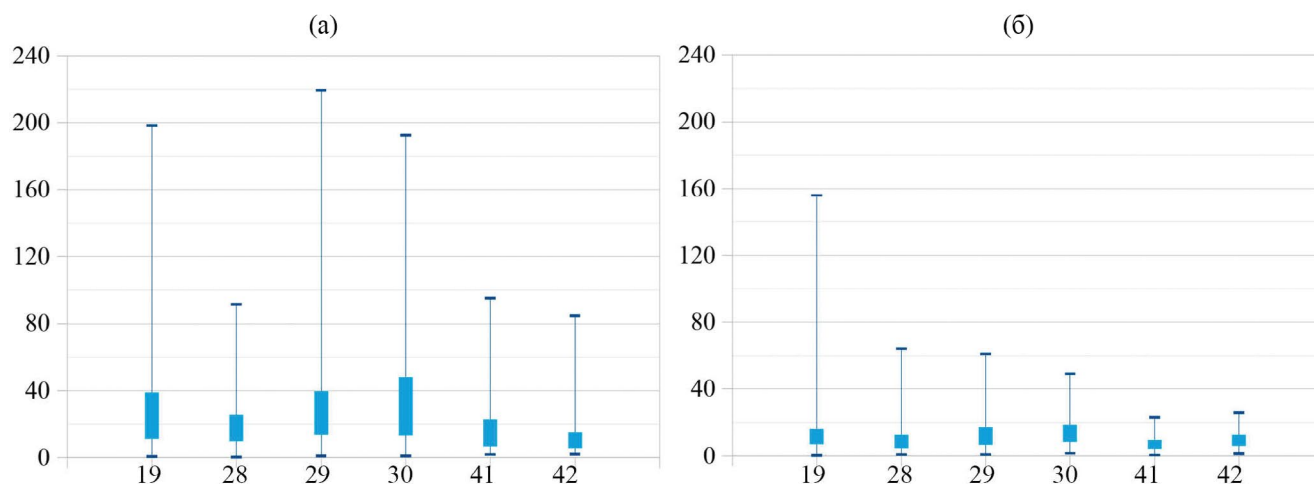


Рис. 9. Диаграммы погрешностей в определении местоположения эпицентра ΔR до (а) и после 2010 г. (б). Прямоугольники – диапазоны квартилей 25–75%; линии – полный диапазон погрешностей от минимального до максимального значений.

вариант стратегии для получения интервальных оценок возможного ущерба и других важных параметров обстановки в случае ЧС. Для этого достаточно определить попадание гипоцентра в зону и прочесть её характеристику.

Следует отметить, что погрешности ΔR , Δh и размеры зон Флина–Энгдала связаны друг с другом. Увеличение размеров зон снижает уровень вариации значений средних погрешностей. Это становится заметно при сравнении вариаций средних погрешностей для отдельных зон Флина–Энгдала и для континентов. Для континентов погрешности мало отличаются друг от друга. При

выборе стратегии зонирования погрешностей следует учитывать уровень сейсмической опасности, плотность населения и уровень экономического развития территорий. Для густозаселённых территорий со сравнительно низким уровнем экономического развития и высокой сейсмичностью целесообразно использовать зоны Флина–Энгдала с большей детализацией.

Альтернативой зонированию погрешностей ΔR и Δh могут служить карты с изолиниями, построение которых основано на гипотезе о том, что погрешности локализации изменяются плавно. Приняв такую гипотезу, можно по значениям

погрешностей в эпицентрах землетрясений с известными координатами построить сетку погрешностей, а затем изолинии, соединяющие точки с их одинаковыми значениями. Использование таких сеток и карт изолиний в информационных системах для получения необходимой характеристики осуществляется методом интерполяции и реализовано в виде функции в различных системах, в том числе в системе “Экстремум”. Применение этого метода исключает необходимость оптимизации размеров зон Флина–Энгдала.

Метод зонирования погрешностей и метод изолиний могут использоваться совместно, при этом для оценки характеристики зоны Флина–Энгдала наряду с гипоцентрами можно учитывать узлы сетки, полученные интерполяцией.

ВЫВОДЫ

Оценка оперативных потерь от землетрясений осуществляется с учетом интересов МЧС РФ и используется для принятия решений о реагировании на ЧС, вызванную сильным землетрясением. Надежность оценок потерь зависит от многих факторов, в первую очередь, от точности параметров землетрясений: координаты, глубины очага и магнитуды, которые используются в формулах макросейсмического поля для моделирования возможной интенсивности сотрясений в населенных пунктах [13, 15].

Полученные в настоящем исследовании результаты сравнения каталогов ССД ФИЦ ЕГС РАН и GEM-ISC свидетельствуют о значительном увеличении точности определения местоположения эпицентра и глубины очагов сильных событий, особенно после 2010 г., что способствует повышению надежности оценок потерь от землетрясений в режиме близком к реальному времени.

В дальнейшем для сейсмоопасных территорий с высокой плотностью населения и низким уровнем экономического развития предполагается выполнение более детальных исследований погрешностей ΔR и Δh с целью исключения грубых ошибок при моделировании последствий сильных событий с использованием системы “Экстремум”.

Авторы выражают признательность коллективу Центра исследований экстремальных ситуаций за их вклад в развитие системы “Экстремум” и коллегам из ФИЦ ЕГС РАН за плодотворное сотрудничество.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГЭ РАН по теме НИР № 122022400105-9 “Прогноз, моделирование и мониторинг эндогенных и экзогенных геологических процессов для снижения уровня их негативных последствий” и государственного задания ФИЦ ЕГС РАН № 075-01271-23.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградов Ю.А., Рыжикова М.И., Петрова Н.В., Пойгина С.Г., Коломиец М.В. Сильные землетрясения земного шара в I полугодии 2023 г. по данным ССД ФИЦ ЕГС РАН // Российский сейсмологический журнал. 2023. Т. 5. № 3. С. 7–27. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.3.01>.
2. Виноградов Ю.А., Рыжикова М.И., Петрова Н.В., Пойгина С.Г., Коломиец М.В. Сильные землетрясения земного шара во II полугодии 2023 г. по данным ССД ФИЦ ЕГС РАН // Российский сейсмологический журнал. 2024. Т. 6. № 1. С. 7–24.
3. Информация Службы срочных донесений // ФИЦ ЕГС РАН [сайт]. URL: <http://www.gsras.ru/new/ssd.htm> (дата обращения 10.01.2024).
4. Коломиец М.В., Дуленцова Л.Г., Рыжикова М.И. Служба срочных донесений ФИЦ ЕГС РАН // Российский сейсмологический журнал. 2019. Т. 1. № 1. С. 84–91. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2019.1.08>
5. Ларионов В.И., Суцев С.П., Угаров А.Н., Фролова Н.И. Оценка сейсмического риска с применением ГИС-технологий // Природные опасности России. Т. 6: Оценка и управление природными рисками / Под ред. А.Л. Рагозина. М.: Изд. Фирма “КРУК”, 2003. С. 209–231.
6. Старовойт О.Е., Чепкунас Л.С., Коломиец М.В., Рыжикова М.И. Служба срочных донесений ГС РАН // Землетрясения Северной Евразии, 2009 год. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН. 2015. С. 234–243.
7. Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Лутиков А.И., Суцев С.П., Малаева Н.С. Оценка сейсмического риска на территории Ставропольского края // Геофизические процессы и биосфера. 2022. Т. 21. № 3. С. 111–136. <https://doi.org/10.21455/GPB2022.3-9>.
8. Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Петрова Н.В., Угаров А.Н., Малаева Н.С. Влияние особенностей затухания сейсмической интенсивности на надежность оперативных оценок потерь от землетрясений // Геоэкология. 2019. № 5. С. 23–37.
9. Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Суцев С.П., Угаров А.Н., Малаева Н.С. Калибровка модели затухания сейсмической интенсивности на Балканах (землетрясения в Хорватии 2020 г.) // Геоэкология. 2021. №5. С. 3–21. <https://doi.org/10.31857/S0869780921050040>
10. Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Угаров А.Н., Малаева Н.С. Калибровка модели затухания сейсмической интенсивности на примере землетрясений в Албании // Геоэкология. 2020. № 5. С. 62–77.
11. Фролова Н.И., Коломиец М.В., Угаров А.Н., Барская Т.В. Оценка погрешностей в определении параметров землетрясений ССД ГС РАН // 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. 1. С. 527–534.
12. Фролова Н.И., Малаева Н.С., Ружич В.В. и др. Оценка социальных и экономических показателей сейсмического риска на примере г. Ангарск // Геофизические процессы и биосфера. 2022. Т. 21. № 2. С. 86–113. <https://doi.org/10.21455/gpb2022.2-5>.
13. Фролова Н.И., Угаров А.Н. База знаний о сильных землетрясениях как инструмент повышения надежности оперативных оценок потерь // Геоэкология. 2018. № 6. С. 1–18.
14. Adams, R.D., Hughes, A.A., McGregor, D.M. Analysis procedures of the International Seismological Centre // Phys. Earth Planet. Inter., 1982. V. 30. P. 85–93.

15. *Bonnin J., Frolova N.I., Larionov V.I. et al.* Reliability of possible earthquake impact assessment with alert seismological surveys application // Proc. 28 General ESC Assembly. Genoa, Italy. 2002.
16. *Flinn E.A., Engdahl E.R.* Seismic and geographical regionalization // Bull. Seism. Soc. Am. 1974. V. 64. № 3. P. II.
17. *Frolova N., Larionov V., Bonnin J.* Earthquake casualties estimations in emergency mode // Advances in Natural and Technological Hazards Research. 2011. V. 29. P. 107–123.
18. *Frolova, N.I., Larionov, V.I., Bonnin, J. et al.* Loss caused by earthquakes: Rapid estimates // Nat. Hazards. 2017. V.88. P. 63–80.
19. ISC-GEM Catalogue [Электронный ресурс]. URL: <http://www.isc.ac.uk/iscgem/download.php> (дата обращения 10.01.2024).
20. *Storchak D.A., Bird A.L. & Adams R.D.* Discrepancies in earthquake location between ISC and other agencies // Journal of Seismology. 2000. V. 4. P. 321–331.
21. *Storchak D.A., Giacomo D.Di, Bondár I. et al.* ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009) // GEM Technical Report. GEM Foundation, Pavia, Italy. 2012. V1.0.0. 128 pp.
<https://doi.org/10.13117/GEM.GEGD.TR2012.01>

ZONING UNCERTAINTIES IN ALERT SURVEY DETERMINATION OF EARTHQUAKE PARAMETERS FOR INCREASING RELIABILITY OF NEAR REAL TIME LOSS SIMULATION

N. I. Frolova^{a, #}, N. S. Malaeva^a, M. V. Kolomiets^{b, ##}, I. P. Gabsatarova^{b, ###},
M. I. Ryzhikova^b, S. P. Suchshev^{c, ####}, A. N. Ugarov^c

^a*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,*

Ulanskii per. 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia

^b*Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences,
pr. Lenina 189, Obninsk, Kaluga region, 249035 Russia*

^c*Bauman Moscow State Technical University,
2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russia*

[#]*E-mail: frolovanina7@gmail.com*

^{##}*E-mail: kolmar@gsras.ru*

^{###}*E-mail: ira@gsras.ru*

^{####}*E-mail: Sersan150@mail.ru*

This paper reports the uncertainties in earthquake parameter determination by alert surveys. The uncertainties dynamics in event location and depth determination is analyzed, as well as the possibility of their usage for near real time loss simulation is estimated. The relevance of this study follows from the needed reliable estimates of possible loss due to earthquakes in order to aid the decision making process for the response and the proper choice of search and rescue strategy for the heavily affected settlements. The study is aimed at zoning the uncertainties in event parameters determination by alert surveys and at assessing their applicability in near real time consequences simulation. The paper provides the results of comparison between the earthquake parameters determination by the Earthquake Emergency Alert Service (EEAS) of the Federal Research Center – Geological Survey of Russia (FRC GS RAS) and those presented in the Global Instrumental Earthquake Catalogue (GEM-ISC). Positive dynamics in parameters uncertainty is registered for the period 2010–2019 as compared to the previous decade. The Flynn–Engdahl zones with minimum values of uncertainties which may be used in order to get reliable loss estimations in near real time mode were identified.

Keywords: *earthquake parameters, alert survey estimation, uncertainties in epicenter location and focal depth determination, near real time earthquake loss simulation, the information system “Extremum”*

REFERENCES

1. Vinogradov, Yu.A., Ryzhikova, M.I., Petrova, N.V., Poigina, S.G., Kolomiets, M.V. [Strong earthquakes of the globe in the first half of 2023 according to the data of the FRC GS RAS]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal*, 2023, vol. 5, no. 3, pp. 7–27.
<https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.3.01>. (in Russian)
2. Vinogradov, Yu.A., Ryzhikova, M.I., Petrova, N.V., Poigina, S.G., Kolomiets, M.V. [Strong earthquakes of the globe in the second half of 2023 according to the FRC GS RAS]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal*, 2024, vol. 6, no. 1, pp. 7–24. (in Russian)
3. [Information from the earthquake emergency alert service]. FRC GS RAS. URL: <http://www.gsras.ru/new/ssd.htm> (accessed 10.01.2024). (in Russian)
4. Kolomiets, M.V., Dulentsova, L.G., Ryzhikova, M.I. [Earthquake emergency alert service of the FRC GS RAS]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal*, 2019, vol. 1, no. 1. pp. 84–91.
<https://doi.org/10.35540/2686-7907.2019.1.08>. (in Russian)
5. Larionov, V.I., Sushchev, S.P., Ugarov, A.N., Frolova, N.I. [Seismic risk assessment using GIS technologies]. In: [Natural hazards of Russia. Vol. 6: Assessment and management of natural risks]. A.L. Ragozin, Ed., Moscow, KRUK Publ., 2003, p. 209–231. (in Russian)

6. Starovoit, O.E., Chepkunas, L.S., Kolomiets, M.V., Ryzhikova, M.I. [Earthquake emergency alert service of the FRC GS RAS]. In: [Earthquakes of Northern Eurasia, 2009], Obninsk, FRC GS RAS Publ., 2015, pp. 234–243. (in Russian)
7. Frolova, N.I., Gabsatarova, I.P., Lutikov, A.I., Sushchev, S.P., Malaeva, N.S. [Seismic risk assessment in the Stavropol krai]. *Geofizicheskie protsessy i biosfera*, 2022, vol. 21, no. 3, pp. 111–136.
<https://doi.org/10.21455/GPB2022.3-9>. (in Russian)
8. Frolova, N.I., Gabsatarova, I.P., Petrova, N.V., Ugarov, A.N., Malaeva, N.S. [The seismic intensity attenuation features influence on the reliability of earthquake losses operational estimates]. *Geokologiya*, 2019, no. 5. pp. 23–37. (in Russian)
9. Frolova, N.I., Gabsatarova, I.P., Sushchev, S.P., Ugarov, A.N., Malaeva, N.S. [The seismic intensity attenuation model calibration in the Balkans (earthquakes in Croatia in 2020)]. *Geokologiya*, 2021, no. 5. pp. 3–21.
<https://doi.org/10.31857/S0869780921050040>. (in Russian)
10. Frolova, N.I., Gabsatarova, I.P., Ugarov, A.N., Malaeva, N.S. [Seismic intensity attenuation model calibration using the example of earthquakes in Albania]. *Geokologiya*, 2020, no. 5, pp. 62–77. (in Russian)
11. Frolova, N.I., Kolomiets, M.V., Ugarov, A.N., Barskaya, T.V. [Estimation of errors in determining earthquake parameters FRC GS RAS]. In: [Analysis, forecast and management of natural risks in the modern world. Proc. 9th Int. Scientific and Practical Conference “Georisk-2015”]. V.I. Osipov, Ed., Moscow, RUDN University Publ., 2015, vol.1, pp. 527–534. (in Russian)
12. Frolova, N.I., Malaeva, N.S., Ruzhich, V.V., Berzhinskaya L.P. et al. [Social and economic indicators of seismic risk assessment by the example of Angarsk city]. *Geofizicheskie protsessy i biosfera*, 2022, vol. 21, no. 2, pp. 86–113.
<https://doi.org/10.21455/gpb2022.2-5>. (in Russian)
13. Frolova, N.I., Ugarov, A.N. [Knowledge base on strong earthquakes as a tool to improve the reliability of operational loss estimates]. *Geokologiya*, 2018, no. 6. pp. 1–18. (in Russian)
14. Adams, R.D., Hughes, A.A., McGregor, D.M. Analysis procedures of the International Seismological Centre. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1982, vol. 30, pp. 85–93.
15. Bonnin, J., Frolova, N.I., Larionov, V.I. Sushchev, S.P. et al. Reliability of possible earthquake impact assessment with alert seismological surveys application. In: Proc. 28 General ESC Assembly. Genoa, Italy, 2002.
16. Flinn, E.A., Engdahl, E.R. Seismic and geographical regionalization. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1974, vol. 64, no.3, part 2.
17. Frolova, N., Larionov, V., Bonnin, J. Earthquake casualties' estimations in emergency mode. *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, 2011, vol. 29, pp. 107–123.
18. Frolova, N.I., Larionov, V.I., Bonnin, J. et al. Loss caused by earthquakes: Rapid estimates. *Nat. Hazards*, 2017, vol. 88. pp. 63–80.
<https://doi.org/10.1007/s11069-016-2653-x>.
19. ISC-GEM Catalogue. Available at: URL: <http://www.isc.ac.uk/iscgem/download.php> (accessed 10.01.2024).
20. Storchak, D.A., Bird, A.L., Adams, R.D. Discrepancies in earthquake location between ISC and other agencies. *Journal of Seismology*, 2000, vol. 4, pp. 321–331.
21. Storchak, D.A., Giacomo, D.Di, Bondár, I. et al. ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009). *GEM Technical Report*. GEM Foundation, Pavia, Italy, 2012, V1.0.0, 128 pp.
<https://doi.org/10.13117/GEM.GEGD.TR2012.01>.