

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 624.131.1:551.252

СЕЙСМИЧНОСТЬ МАРОККО
И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 08.09.2023
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ “ЭКСТРЕМУМ”

© 2024 г. Н. И. Фролова^{1,*}, И. П. Габсатарова^{2,**}, С. П. Сущев^{3,***}, Н. С. Малаева¹

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),
ул. 2-я Бауманская, 5, Москва, 105005 Россия

*E-mail: frolovanina7@gmail.com

**E-mail: ira@gsras.ru

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

Поступила в редакцию 09.11.2023 г.

После доработки 23.11.2023 г.

Принята к публикации 05.02.2024 г.

В статье решается задача подбора уравнений затухания сейсмической интенсивности для территории Марокко и моделирования последствий сильного разрушительного землетрясения 8 сентября 2023 г. 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 является калибровка модели затухания сейсмической интенсивности системы “Экстремум” для территории Марокко. Впервые для рассматриваемой территории выполнен анализ применимости уравнений затухания сейсмической интенсивности, полученных исследователями в разные годы, для оперативной оценки возможных последствий сильных событий. Изучено влияние региональной матрицы повреждений на результаты моделирования возможного ущерба от землетрясения. Для оценки возможных последствий землетрясения 08.09.2023 г. применены методы имитационного компьютерного моделирования с использованием системы “Экстремум”, разработанной с участием авторов данной статьи. В статье приводятся предварительные результаты моделирования последствий землетрясения в Марокко, дается оценка сходимости расчетных и наблюдаемых интенсивностей для различных уравнений затухания интенсивности, полученных ранее для Марокко и сопредельных территорий в пределах Альпийско-Гималайского сейсмоактивного пояса.

Ключевые слова: оперативная оценка потерь, информационная система “Экстремум”, калибровка модели, макросейсмическое поле, сильное землетрясение, Марокко

DOI: 10.31857/S0869780924020036; EDN: DZWGLG

*Посвящается памяти Г.П. Горикова (1909–1984),
выдающегося специалиста в области геотектоники
и сейсотектоники, основоположника нового направления
в науке – сейсмического районирования [2].*

ВВЕДЕНИЕ

Альпийско-Гималайский сейсмоактивный пояс (АГСП) (Средиземноморско-Трансзазиатский по [5]) чрезвычайно сейсмически активен в 2023 г. Начало было положено разрушительными Турецкими землетрясениями 06.02.2023 г. с $M_w = 7.8$ и 7.5 на Восточно-Анатолийском разломе, где

несколько веков не было столько мощного проявления сейсмичности с катастрофическими последствиями [3, 17]. В противоположных от Турецких очагов направлениях в АГСП произошли землетрясения с разрушительными эффектами: через 215 сут – на западе, в северо-западной части Африки 8 сентября 2023 г. с $M = 6.8$ (NEIC)

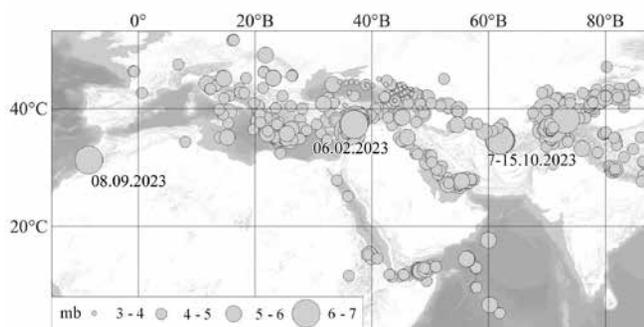


Рис. 1. Карта сейсмичности в Альпийско-Гималайском поясе, по данным ССД ФИЦ ЕГС РАН (выборка сделана от эпицентра Турецкого землетрясения с радиусом 5500 км).

в Марокко, через 246 сут – на востоке, в Афганистане, в западной части страны серия землетрясений близкой магнитуды 7 октября 2023 г. (два толчка с разницей в 30 мин. по времени возникновения), 11 и 15 октября 2023 г. с $M = 6.3–6.4$ и глубинами в верхней части земной коры (оперативные данные ЕГС ФИЦ РАН) (рис. 1).

Можно высказать предположение о триггерном влиянии Турецких землетрясений 6 февраля на сейсмичность значительной части АГСП. Так называемым “деформационным” волнам, в том числе возникшим после сильного землетрясения, как одному из “триггерных” механизмов подвижности разломно-блоковой структуры континентальной литосферы и генерации сейсмической активности [5] уделяется большое внимание в работах плеяды советских и российских ученых. Довольно полное описание этих работ приводится в монографии С.И. Шермана, посвященной тектонофизической концепции сейсмического процесса и прогнозу землетрясений.

Предметом настоящей статьи является исследование сильнейшего Марокканского землетрясения 08.09.2023 г. с $M = 6.8$ [13] с целью возможной калибровки ГИС “Экстремум” для этого района.

Авторы этой работы задались целью создания “однородного по магнитуде каталога”. Предполагается провести исследование коэффициентов макросейсмического уравнения для этого района. Для этого создана выборка по различным источникам [7, 10, 12] для Марокко и сопредельных территорий. Анализ результатов моделирования последствий и сравнение с наблюдаемыми данными по интенсивности позволяет сделать вывод о хорошей сходимости между наблюдаемыми и расчетными интенсивностями I_i при использовании уравнений для зоны Верхнего и Среднего Атласа [10], для Алжира и Атласских гор [7] и для территории Турции [12]. Сравнение полученных оценок ущерба для населенных пунктов Adassil (Адасиль) и Targua (Тарга), расположенных в сильно

пострадавшей провинции Chichaoua (Чичауа), с космическими снимками показывает удовлетворительную сходимость в оценках расчетных и наблюдаемых средних степеней повреждений застройки населенных пунктов.

СЕЙСМИЧНОСТЬ АФРИКАНСКОГО КОНТИНЕНТА

Долгое время огромный Африканский континент считался асейсмичным, вплоть до начала XX в. были известны лишь незначительные проявления сейсмичности в районе гор Атласа, Абиссинского нагорья, в районе о. Мадагаскар и локально в некоторых других территориях на юге и востоке континента. Известно, что исследованию сейсмичности этого континента уделяли внимание, кроме зарубежных, и советские ученые. Среди них особое место занимает работа “О сейсмичности Африки” выдающего ученого геолога-тектониста-сейсмолога Г.П. Горшкова [1, 14, 15]. Как пишет сам автор, эта работа была выполнена по инициативе и заданию Департамента естественных наук ЮНЕСКО на кафедре динамической геологии МГУ им. М.В. Ломоносова в содружестве с Институтом физики Земли АН СССР и Советом по сейсмологии АН СССР. Г.П. Горшков посчитал своим долгом широко обсудить созданный труд с советскими и зарубежными коллегами, среди которых были, например, Ч. Рихтер и Б. Гутенберг, которые в 1949 и 1954 г. в монографии о сейсмичности Земли [16] опубликовали каталог землетрясений мира, в том числе и Африки [1]. Данные этого каталога послужили Г.П. Горшкову основой для написания монографии “О сейсмичности Африки”. Были составлены списки землетрясений различных сеймотектонических зон Африки, построен ряд карт, характеризующих распределение сейсмичности и сеймотектонические зоны (рис. 2 и 3).

Установлено, что большую часть территории Африканского континента занимает Африканская платформа. Проявление сейсмичности связано в основном с областью альпийской складчатости (система горных сооружений Атласа) и областью разломов “Великого Рифта Африки” [1, 14, 15].

В более современных исследованиях, например в [8, 11], также подтверждается, что землетрясения в Марокко не превышали $M = 6.0$ и в основном происходили на Средиземноморском побережье и в районе гор Атлас (рис. 4). Известно разрушительное землетрясение 29.02.1960 г. в Агадире (координаты 30.45° с.ш., 9.62° з.д., $M_d = 5.9$), эпицентр которого был удален примерно на 200 км к юго-западу от эпицентра 08.09.2023 г. По [11] “ужасное землетрясение опустошило Агадир и его окрестности, ущерб катастрофичен: более 12 000 человек погибли, тысячи получили ранения, было

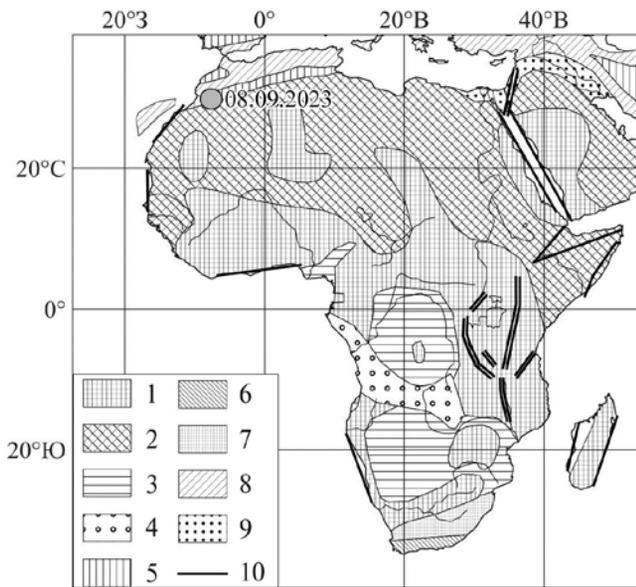


Рис. 2. Копия рисунка “Тектоническая карта Африки” из [1] с обозначением эпицентра землетрясения 08.09.2023 г.

1 – докембрийский фундамент Африканской платформы, выходящий на поверхность; 2 – области неглубокого погружения докембрийского фундамента; 3 – области глубокого погружения докембрийского фундамента; 4 – внутриплатформенные каледонские складки; 5 – герцинские складки; 6 – капские складки; 7 – предгорный прогиб Карру; 8 – альпийские складки; 9 – Месопотамско-Сирийский предгорный прогиб; 10 – основные разломы.

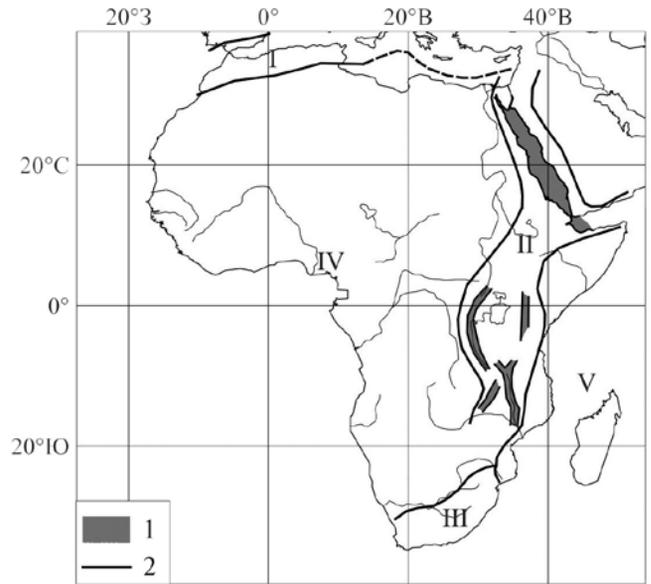


Рис. 3. Сеймотектонические зоны Африки (частичная копия рисунка карты “Эпицентров землетрясений Африки” из [1]).

1 – Восточно-африканские грабены; 2 – границы сеймотектонических зон I–V: I – область альпийской складчатости (система горных сооружений Атласа), II – область разломов “Великого Рифта Африки”, III – область капских складок, IV – область неглубокого залегания докембрийского кристаллического фундамента, V – то же, что и IV, но по восточному побережью Африки.

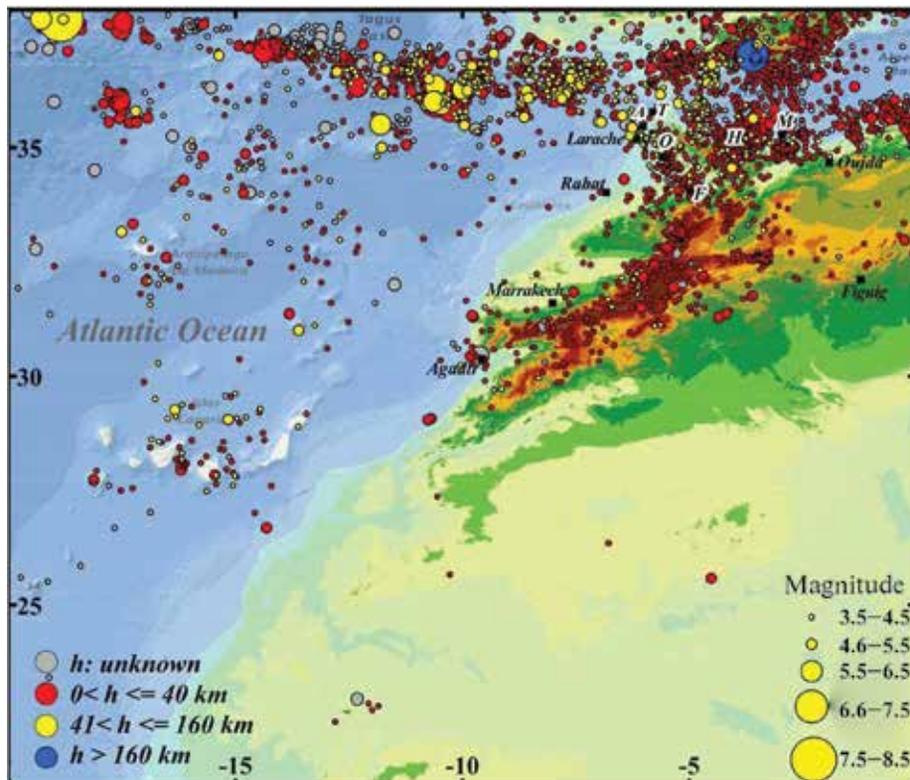


Рис. 4. Сейсмичность Марокко и его окружения (1901–2010 гг.) [11].

разрушено более 75% зданий. В населенных пунктах Ячеч, Касба, Адуар, Фаунти Талборжт более 90% зданий были разрушены или повреждены. Несмотря на небольшое значение магнитуды ($M_d = 5.9$), масштаб негативных последствий можно объяснить низким качеством строительства и небольшой глубиной гипоцентра (3 км), а также близостью к городу”.

В [18] опубликован каталог основных марокканских землетрясений с 1045 по 2005 г. Авторы этой работы задались целью создания каталога однородных по магнитуде землетрясений для дальнейшего его использования в исследовании сейсмической опасности. В представленном каталоге лишь одно 9-балльное землетрясение 1731 г. имело $M_w = 6.4$, его эпицентр находился примерно в 200 км к юго-западу от эпицентра землетрясения 08.09.2023 на побережье Атлантического океана (видимо в близкой зоне к эпицентру землетрясения 29.02.1960 г.). Эпицентры всех других сильных землетрясений Марокко были приурочены к рифтовым структурам в Средиземноморье.

Из вышеизложенного следует, что землетрясение 08.09.2023 г. было самым сильным в горах Атласа за всю историю, и, безусловно, может быть предметом для нашего исследования в целях калибровки системы “Экстремум” для районов северо-западной части Африки.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

08.09.2023 г. С $M = 6.8$ В МАРОККО

Расчеты моделирования последствий землетрясения проводятся с помощью системы “Экстремум” в первые минуты после определения параметров землетрясения для принятия решения о проведении спасательных и других экстренных операций. Точность оперативного прогноза последствий существенно повышается, если для данной сейсмоопасной территории заблаговременно определены рейтинг сейсмологических служб и параметры зависимостей, описывающих особенности затухания сейсмической интенсивности I_r , и региональные особенности поведения элементов риска.

В качестве региональных зависимостей затухания сейсмической интенсивности в данной статье были использованы результаты исследований, полученные в работах [7, 10] для Марокко и сопредельных территорий. Региональные оценки затухания интенсивности для зоны Атласских гор и Алжира [7] оказались близкими к зависимостям N.N. Ambraseys [6] для Балканского региона. Этот факт объясняется принадлежностью рассматриваемых территорий к одной и той же тектонической зоне – зоне альпийской складчатости [1, 14], и позволяет тестировать применимость аналогичных

зависимостей для моделирования последствий землетрясения 08.09.2023 г. в Марокко.

В статье для проверки сходимости расчетных и наблюдаемых интенсивностей использованы уравнения:

– для зоны Верхнего и Среднего Атласа (НМ) [10], $h_{cp} = 9.7$ км:

$$I = 1.72M - 1.3 \ln \left(\sqrt{\Delta^2 + h^2} \right) - 0.0013 \left(\sqrt{\Delta^2 + h^2} \right) + 1.51, \quad (1)$$

$$I = 1.4M - 1.3 \ln \left(\sqrt{\Delta^2 + h^2} \right) - 0.0013 \left(\sqrt{\Delta^2 + h^2} \right) + 2.5; \quad (2)$$

– для зоны Западного Высокого Атласа (НО) [10], $h_{cp} = 1.4$ км:

$$I = 1.72M - 1.3 \ln \left(\sqrt{\Delta^2 + h^2} \right) - 0.0013 \left(\sqrt{\Delta^2 + h^2} \right) - 1.02, \quad (3)$$

$$I = 1.4M - 1.3 \ln \left(\sqrt{\Delta^2 + h^2} \right) - 0.0013 \left(\sqrt{\Delta^2 + h^2} \right) + 0.62; \quad (4)$$

– для зоны Верхнего и Среднего Атласа (НМ) [10], $h_{usgs} = 26$ км:

$$I = 1.72M - 1.3 \ln \left(\sqrt{\Delta^2 + h^2} \right) - 0.0013 \left(\sqrt{\Delta^2 + h^2} \right) + 2.81, \quad (5)$$

$$I = 1.4M - 1.3 \ln \left(\sqrt{\Delta^2 + h^2} \right) - 0.0013 \left(\sqrt{\Delta^2 + h^2} \right) + 3.5; \quad (6)$$

– для Алжира [7]:

$h_{cp} = 6.82$ км,

$$I = 1.43M - 2.28 \ln \left(\sqrt{\Delta^2 + h^2} \right) - 0.0004 \left(\sqrt{\Delta^2 + h^2} \right) + 6.29 \pm 0.24P, \quad (7)$$

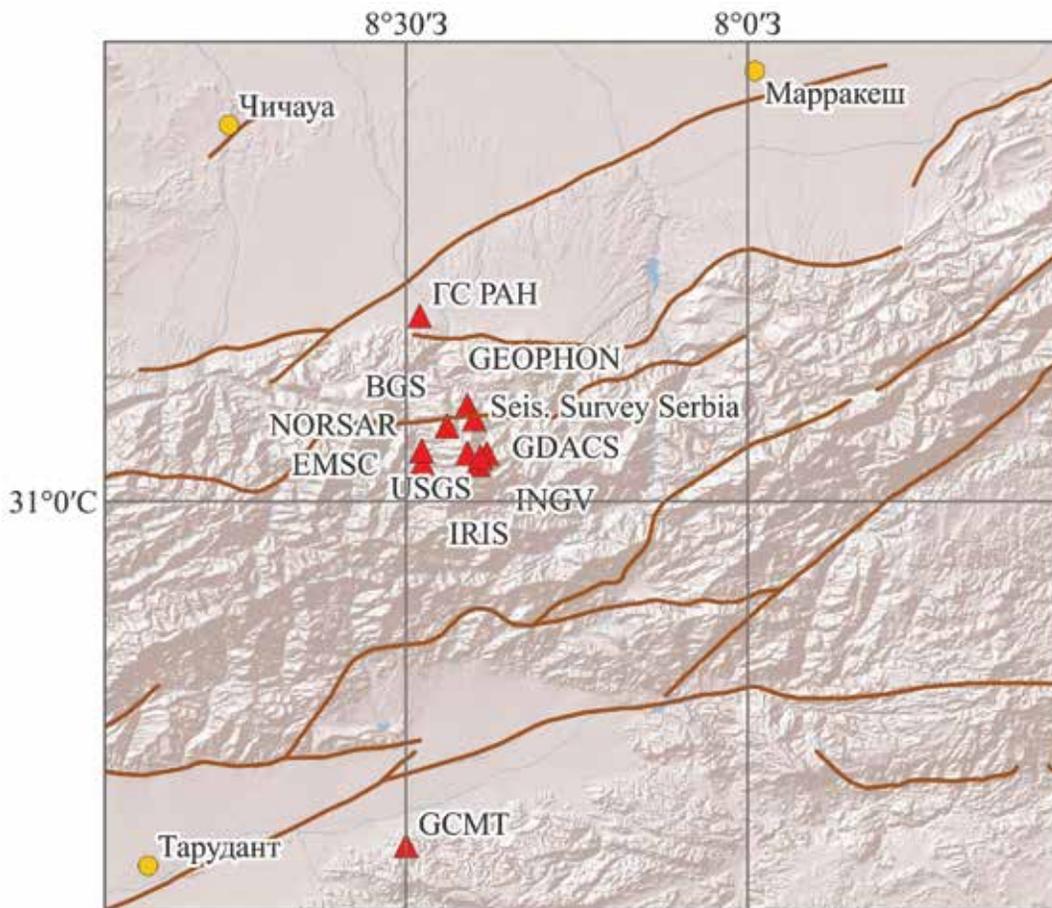


Рис. 5. Координаты эпицентра землетрясения 08.09.2023 г. в Марокко по данным разных сейсмологических служб в оперативном режиме.

$h_{usgs} = 26$ км,

$$I = 1.43M - 2.28 \ln(\sqrt{\Delta^2 + h^2}) - 0.0004(\sqrt{\Delta^2 + h^2}) + 6.29 \pm 0.24P; \quad (7a)$$

– для Атласских гор [7]:

$h_{cp} = 4.82$ км,

$$I = 1.48M - 2.05 \ln(\sqrt{\Delta^2 + h^2}) - 0.00074(\sqrt{\Delta^2 + h^2}) + 5.16 \pm 0.35P; \quad (8)$$

$h_{usgs} = 26$ км,

$$I = 1.48M - 2.05 \ln(\sqrt{\Delta^2 + h^2}) - 0.00074(\sqrt{\Delta^2 + h^2}) + 5.16 \pm 0.35P; \quad (8a)$$

– для юго-восточной Турции [12]:

$$I = 1.82M - 1.38 \ln(\Delta + 7) - 0.99; \quad (9)$$

– для территории Турции [12]:

$$I = 2.12M - 1.38 \ln(\Delta + 7) - 2.72, \quad (10)$$

где Δ – эпицентральное расстояние, км; h – глубина очага, км; M – магнитуда землетрясения (инструментально определенное значение M_s или пересчитанное из других оценок).

Моделирование возможного распределения интенсивностей для события 08.09.2023 г. было выполнено с использованием уравнений (1) – (10) для коэффициента сжатия эллипса $k = 1.5$ с учетом ориентации эллипса макросейсмического поля под углом 255° в соответствии с решением механизма очага.

Учитывая небольшой разброс в определении координат эпицентра сейсмологическими службами в оперативном режиме (минимальное расстояние 1.1 км, среднее – 14.1 км) (рис. 5) и то, что плотность населения провинции Марракеш-Сафи по данным <http://www.statoids.com/uma.html> на 2014 г. составляла 117.6 чел/км², что в 2.6 раза выше, чем в среднем по стране, расчеты проводились для параметров USGS $\phi = 31.064^\circ$ с.ш.; $\lambda = 8.391^\circ$ з.д. Использовалась глубина очага

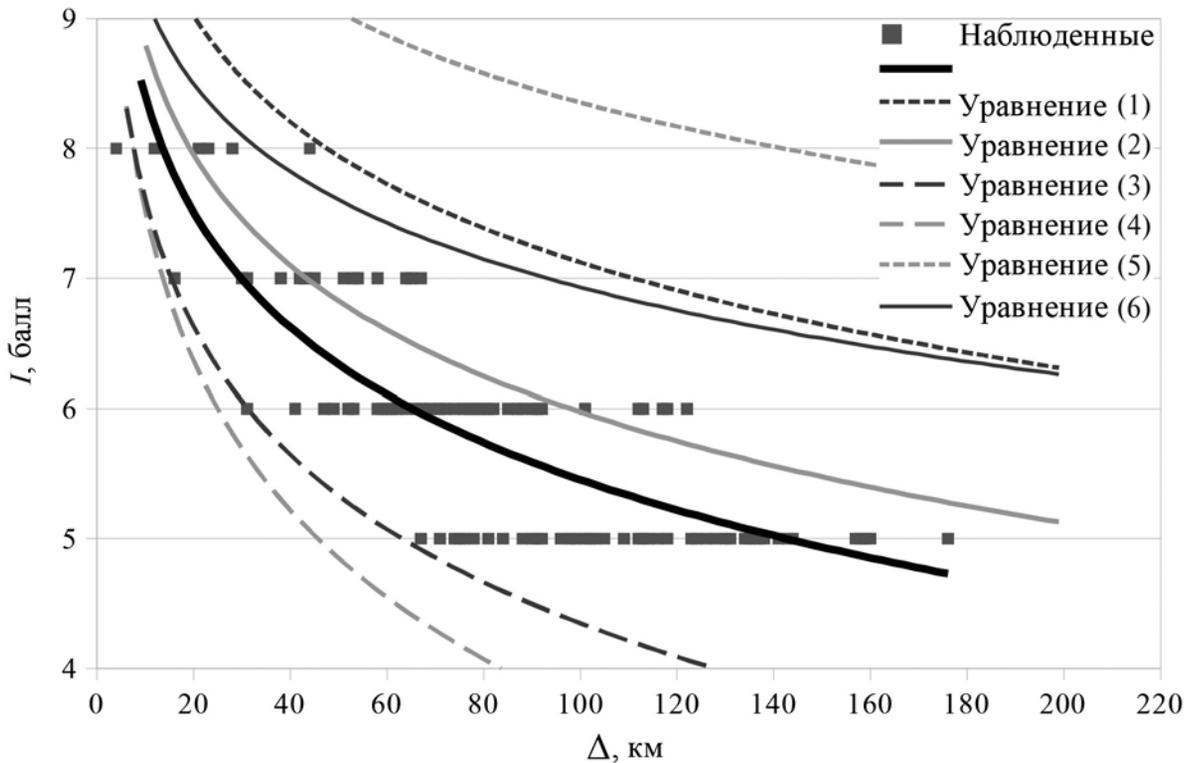


Рис. 6. Сравнение наблюдаемой и расчетных интенсивностей для уравнений (1)–(6) [10].

$h_{\text{usgs}} = 26$ км по данным USGS и средние глубины для зоны $h_{\text{ср}}$ в соответствии с рекомендациями авторов зависимостей [7, 10].

Уравнения (1)–(6) получены преобразованием уравнения Шпонхоера-Ковеслигети [19]:

$$I_0 - I = 3 \log \left(\frac{\sqrt{R^2 + h^2}}{h} \right) + 1.3a \left(\sqrt{R^2 + h^2} - h \right) \quad (11)$$

к виду

$$I = aM - b \ln \left(\sqrt{R^2 + h^2} \right) + c \left(\sqrt{R^2 + h^2} \right) + d, \quad (12)$$

где Δ – эпицентральный расстояние, км; h – глубина очага, км; M – магнитуда землетрясения, I_0 – интенсивность в эпицентре, балл; a , b , c , d – коэффициенты.

Для пересчета магнитуд в (1), (3), (5) использовалась зависимость $M(I_0)$ вида:

$$M = 0.58I_0 + 0.85, \quad (13)$$

в (2), (4), (6):

$$M = 0.716 I_0 + 0.517 \log(h) - 0.207, \quad (14)$$

где h – глубина очага, км; M – магнитуда землетрясения, I_0 – интенсивность в эпицентре, балл.

Для выбора уравнения затуханий интенсивности, которые в случае повторения события могут быть использованы в оперативной оценке потерь, расчетные значения интенсивности I_i сравнивались с наблюдаемыми по данным GDACS [<https://www.gdacs.org/>].

Задача состояла в выборе и запоминании наиболее вероятных параметров, которые могут быть применены в случае повторения события в рассматриваемой зоне.

На рис. 6 приведены результаты сравнения расчетных и наблюдаемых значений интенсивностей сотрясений I (точки и аппроксимирующая их кривая) при использовании уравнений затухания (1)–(6) [10].

Анализ рис. 6 показывает систематическое завышение расчетной интенсивности I при использовании уравнений (1), (5) и (6). При использовании уравнения (5) разница составляет несколько баллов. Уравнения (3) и (4) дают систематическое занижение расчетной интенсивности I . На расстояниях до 20–30 км эта разница незначительна, порядка 0.2–0.3 балла, с увеличением эпицентрального расстояния разница возрастает и на расстояниях 80–120 км достигает 1.5–2 балла. Наилучшая сходимость получена для уравнения (2) для зоны Верхнего и Среднего Атласа. На расстояниях до 50 км разница составляет 0.2 балла, на расстояниях свыше 160 км она увеличивается на 0.4 балла.

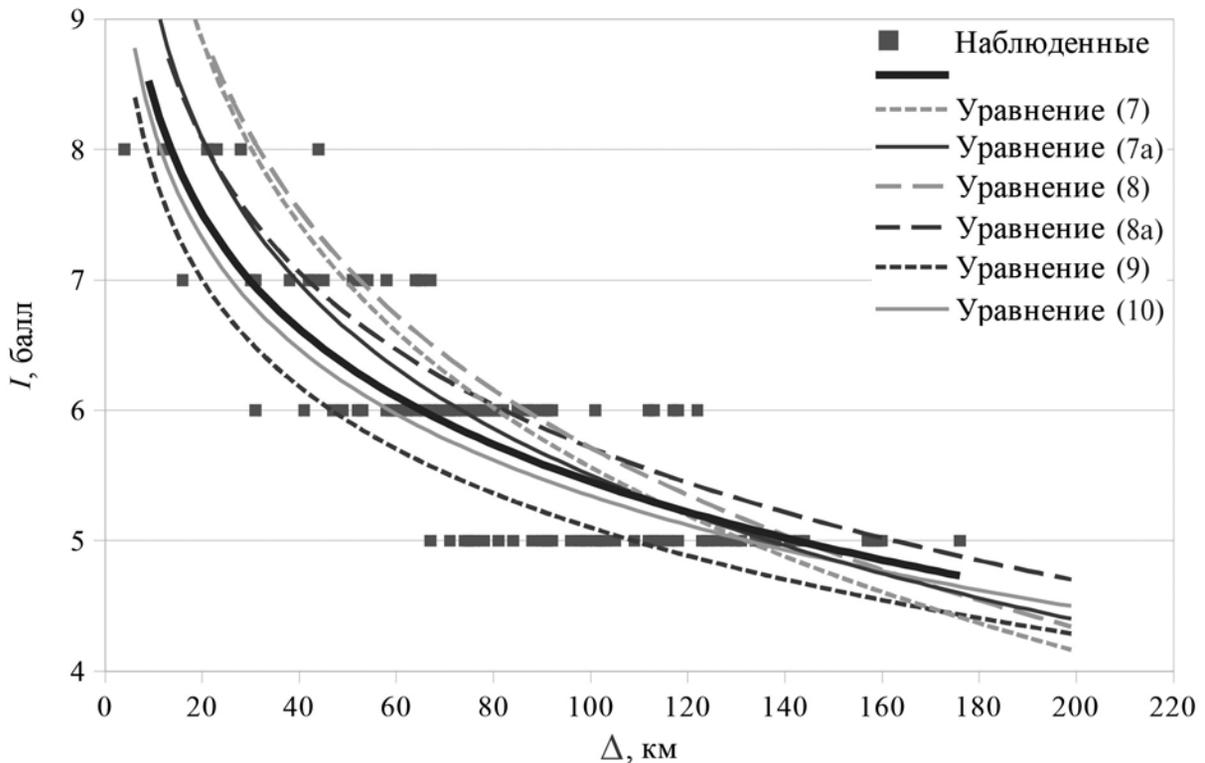


Рис. 7. Сравнение наблюдаемой и расчетных интенсивностей для уравнений (7), (7a), (8), (8a) по [7]; (9), (10) по [12].

Таблица 1. Отклонения наблюдаемых и расчетных интенсивностей ΔI для разных баллов при использовании уравнений (1)–(10)

I_i , балл	Уравнения затухания интенсивности											
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(7a)	(8)	(8a)	(9)	(10)
5	2.0	0.8	-0.9	-1.6	3.2	1.8	0.3	0.3	0.4	0.4	0.0	0.2
6	1.4	0.3	-1.2	-2.0	2.7	1.2	0.1	-0.1	0.3	0.2	-0.6	-0.3
7	1.2	0.1	-1.5	-1.9	2.3	0.9	0.3	0.1	0.4	0.1	-0.9	-0.7
8	1.2	0.0	-1.5	-1.7	1.8	0.3	1.0	0.0	1.0	-0.2	-0.8	-0.7
I_{cp}	1.6	0.5	-1.1	-1.7	2.8	1.4	0.3	0.1	0.4	0.3	-0.4	-0.1

На рис. 7 приведены результаты сравнения расчетных и наблюдаемых значений интенсивностей сотрясений I_i (точки и аппроксимирующая их кривая) при использовании уравнений затухания (7, 7a, 8, 8a), а также (9) и (10).

Анализ рис. 7 показывает наилучшую сходимость расчетных и наблюдаемых значений интенсивностей I_i для уравнения (10) для территории Турции]. Уравнения (7), (7a) для Алжира и (8), (8a) для Атласских гор дают завышенные оценки расчетной интенсивности I_i от 0.3 до 1 балла на близких расстояниях, на расстояниях более 120 км расчетные значения I_i приближаются к наблюдаемым. Но уравнение (7a) дает почти совпадающие оценки расчетных и наблюдаемых I_i на эпицентральных расстояниях $\Delta > 70$ км.

В табл. 1 приведены значения отклонений наблюдаемых и расчетных интенсивностей ΔI при использовании разных уравнений затухания.

Анализ рис. 6, 7 и табл. 1 позволяет сделать вывод о хорошей сходимости между наблюдаемыми и расчетными интенсивностями I_i при использовании уравнений (2), (7a), (8a) и (10).

На рис. 8 приведены результаты моделирования последствий землетрясения 08.09.2023 г. с $M = 6.8$ в Марокко с помощью системы “Экстремум” для уравнений затухания интенсивности (2) для зоны Верхнего и Среднего Атласа и (8a) для Атласских гор. Степени повреждений зданий приведены по шкале MMSK-86 [4], где $d = 1$ – легкие повреждения, $d = 2$ – умеренные повреждения, $d = 3$ – тяжелые повреждения, $d = 4$ – частичные

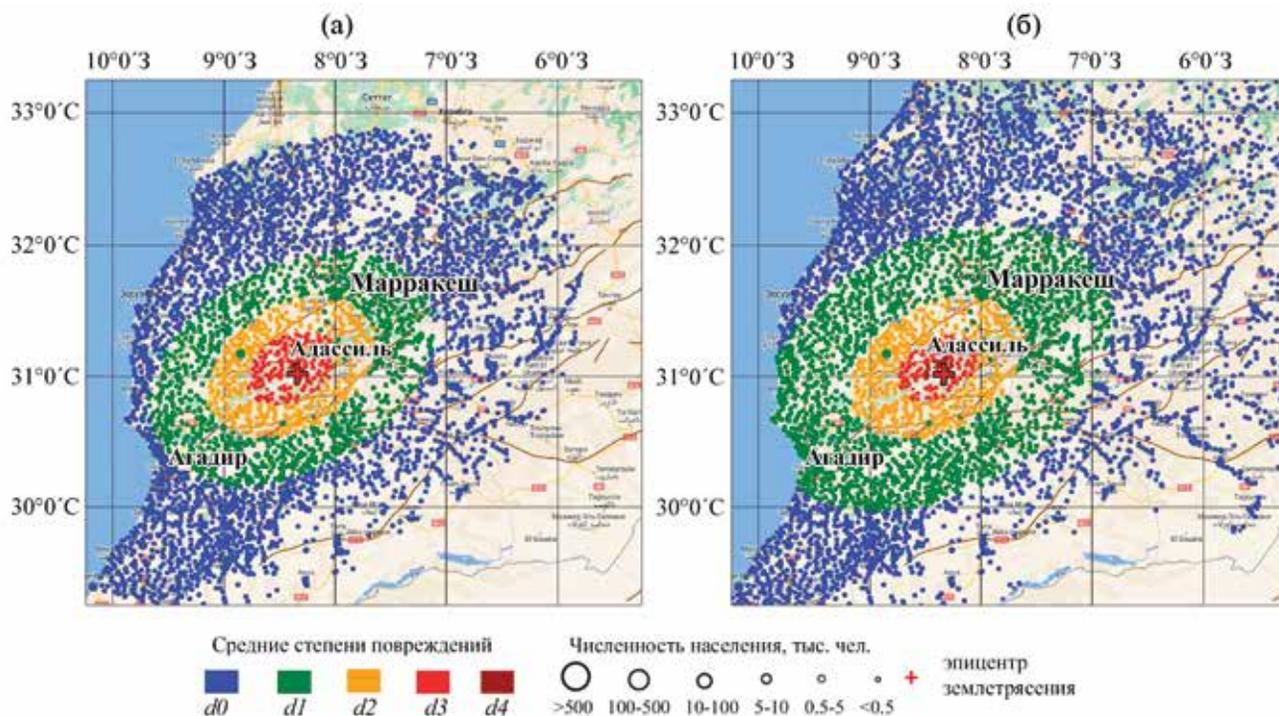


Рис. 8. Моделирование последствий землетрясения 08.09.2023 г. с $M = 6.8$ в Марокко с помощью системы “Экстремум” для уравнения: а – (8а), б – (2). Средние степени повреждений: d_0 – нет повреждений, d_1 – легкие, d_2 – умеренные, d_3 – тяжелые, d_4 – частичные разрушения.

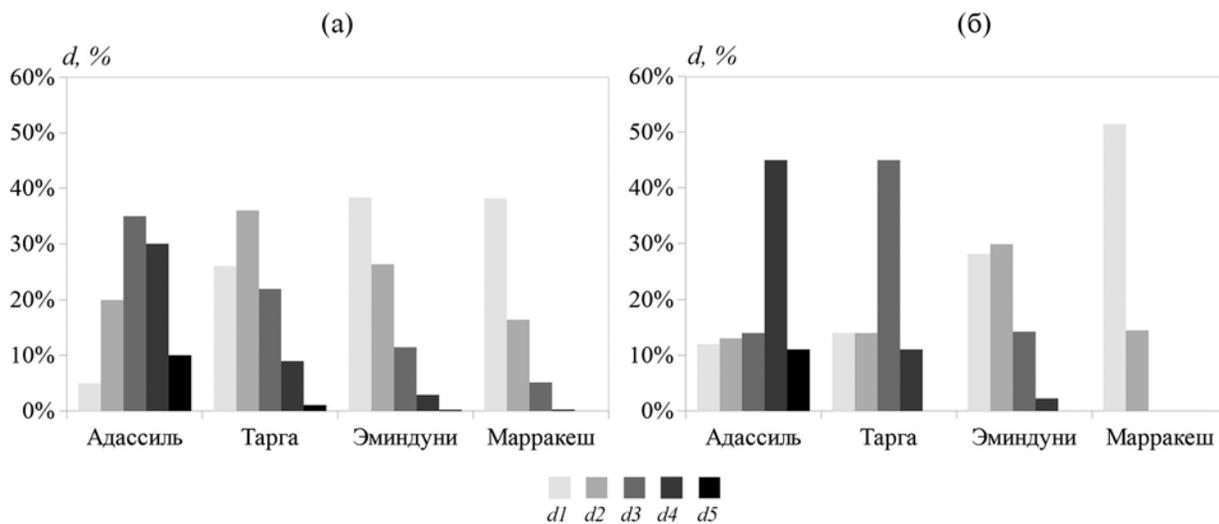


Рис. 9. Диаграммы средних степеней повреждений для отдельных населенных пунктов для (7а) для Алжира [7]: а – матрица повреждений по [9]; б – матрицы повреждений по шкале EMS-92.

разрушения, $d = 5$ – обвалы. Для расчета степеней повреждения d использовалась матрица повреждений по [9].

При использовании уравнений (7а) для Алжира и (10) для территории Турции были получены близкие результаты в определении средних степеней повреждений d_{cp} зданий в населенных пунктах при использовании матрицы повреждений [9].

Для изучения влияния матрицы повреждений на оценки потерь были выполнены расчеты

последствий для уравнения (7а) с использованием матрицы [9] и матрицы по шкале EMS-92.

Анализ рис. 9 показывает, что оценки вероятности отдельных расчетных степеней повреждения зданий при использовании разных матриц повреждений имеют значительный разброс. Для населенного пункта Эминдуни оценки вероятности степени $d = 1$ для разных матриц отличаются на 27%. Для населенных пунктов Марракеш и Эминдуни оценки вероятности возможных

Таблица 2. Вероятности степеней повреждений для отдельных населенных пунктов при использовании уравнения (7а) для Алжира

Населенный пункт	Вероятность степеней повреждений при использовании матриц по [9] (в числителе) и по шкале EMS 92 (в знаменателе)					
	$d = 1$	$d = 2$	$d = 3$	$d = 4$	$d = 5$	d_{cp}
Adassil (Адассиль)	0.05/0.12	0.20/0.13	0.35/0.14	0.30/0.45	0.10/0.11	3.20/3.15
Targua (Тарга)	0.26/0.14	0.36/0.14	0.22/0.45	0.09/0.11	0.01/0.0	2.05/2.21
Imindounite (Эминдуни)	0.38/0.28	0.26/0.30	0.11/0.14	0.03/0.02	0.0/0.0	1.37/1.39
Marrakech (Марракеш)	0.38/0.51	0.16/0.14	0.05/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.87/0.80

(а)

(б)



Рис. 10. Снимки населенных пунктов: а – Адассиль, б – Тарга.[UNOSAT. Preliminary_Assessment_Report_EQ20230909MAR_Adassil_10Sep2023-1].

степеней $d = 2$ не превышает 14%. А для Адассиль разница в оценках вероятности степени повреждения $d = 3$ при использовании разных матриц составила 60%.

В табл. 2 приведены значения вероятностей разных степеней повреждений для отдельных населенных пунктов при использовании уравнения (7а) и двух матриц повреждений.

Разница в оценке средних степеней повреждений d_{cp} варьирует от 1.4% для Эминдуни до 8% для Марракеша (см. табл. 2). Т.е. использование разных матриц повреждения не оказывает сильного влияния на оценки средних степеней повреждения d_{cp} для населенных пунктов в целом с учетом застройки разного типа.

Сравнение полученных оценок ущерба для Адассиль и Тарга, расположенных в сильно пострадавшей провинции Chichaoua (Чичауа), с космическими снимками показывает удовлетворительную сходимость в оценках расчетных и наблюдаемых потерь. На рис. 10 приведены

космические снимки UNOSAT из предварительного отчета EQ20230909MAR от 10.09.2023 г., на которых наблюдается соответствие расчетных и реальных оценок степеней повреждения $d = 4$ и $d = 5$ в этих населенных пунктах.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В процессе калибровки модели макросейсмического поля системы “Экстремум” для территории Марокко выполнен анализ применимости уравнений затухания сейсмической интенсивности, полученных исследователями в разные годы для зоны Верхнего и Среднего Атласа [10], Алжира и Атласских гор [7] и территории Турции [12].

Для оценки возможных последствий землетрясения 08.09.2023 г. применялись методы имитационного компьютерного моделирования с использованием системы “Экстремум”, разработанной с участием авторов данной статьи. Результаты моделирования последствий землетрясения показали хорошую сходимость наблюдаемых

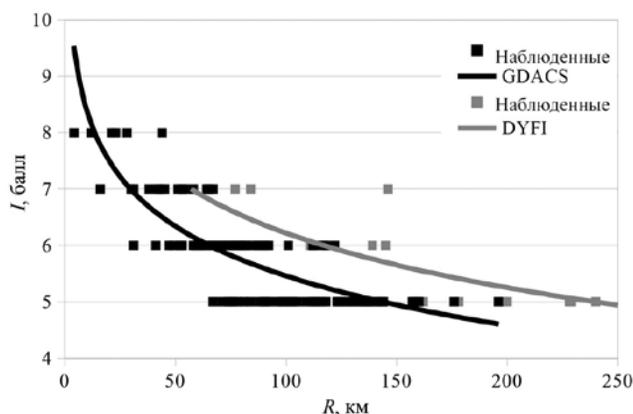


Рис. 11. Сравнение наблюдаемых значений интенсивности в населенных пунктах по данным GDACS и DYFI USGS.

и расчетных значений интенсивности I_i при использовании уравнений для зоны Верхнего и Среднего Атласа, Алжира и Турции.

При использовании уравнения для зоны Верхнего и Среднего Атласа [10] на расстояниях до 50 км разница ΔI составляет 0.2 балла, на расстояниях более 160 км – 0.4 балла. Наилучшая сходимость наблюдаемых и расчетных значений интенсивностей I_i получена для уравнения для территории Турции [12], на всех эпицентральных расстояниях ΔI не превышает 0.1 балла. Уравнения для Алжира и Атласских гор [7] дают завышенные оценки расчетной интенсивности I_i от 0.3 до 1 балла на близких расстояниях, на расстояниях более 120 км расчетные значения I_i приближаются к наблюдаемым. На эпицентральных расстояниях $\Delta > 70$ км уравнение для Алжира [7] дает почти совпадающие оценки расчетных I_i и наблюдаемых значений интенсивности.

Оценки, полученные в настоящем исследовании, носят предварительный характер. Процедура калибровки региональных моделей затухания сейсмической интенсивности должна выполняться с использованием уточненной макросейсмической информации по отдельным населенным пунктам. Такая информация может быть доступна только через месяцы или годы.

В настоящем исследовании расчетные значения интенсивности I_i сравнивались с наблюдаемыми значениями интенсивности для населенных пунктов в соответствии с информацией, размещенной на сайте GDACS [gdacs.org], которые, судя по расхождениям с информацией, размещенной на сайте DYFI Геологической службы США, также является неокончательной.

Информация на сайте DYFI дает завышенные оценки наблюдаемой интенсивности по сравнению данными GDACS. Разница достигает 0.7–0.8 балла (рис. 11). На сайте DYFI приведены данные

об ощущениях для населенных пунктов на расстояниях 50 км и более от эпицентра.

Несмотря на то, что полученные оценки расчетных интенсивностей носят предварительный характер использование уравнения затухания сейсмической интенсивности для Алжира [7] позволяет получить расчетные средние степени повреждения $d_{ср}$ застройки для наиболее сильно пострадавших населенных пунктов близкие к наблюдаемым на 10 января 2023 г. [UNOSAT_Preliminary_Assessment_Report_EQ20230909MAR_Adassil_10Sep2023-1].

ВЫВОДЫ

Процедура калибровки региональных моделей затухания сейсмической интенсивности предполагает выделение границ зон с квазистабильными параметрами поля. В дальнейшем для уточнения калибруемых параметров поля и определения границ зон для их применения необходимо проведение работ по сбору информации о макросейсмических проявлениях прошлых событий в рассматриваемом регионе.

Для успешной калибровки моделей макросейсмического поля системы “Экстремум” и других глобальных систем, используемых для оперативной оценки последствий землетрясений, необходимо создание и своевременное пополнение базы знаний о макросейсмических и инженерно-сейсмологических последствиях землетрясений. В этой связи представляется важным международное сотрудничество в области обработки “больших данных” (Big Data) и создание распределенной базы знаний о физических и социально-экономических последствиях прошлых сильных землетрясений в рамках проектов ООН/КОДАТА с указанием границ калибровочных зон.

Авторы выражают благодарность своим коллегам за постоянную поддержку, обсуждение методических вопросов по калибровке моделей для оценки последствий землетрясений в оперативном режиме. Особая благодарность сотрудникам ООО ЦИЭКС за плодотворное сотрудничество и вклад в развитие среды системы “Экстремум”

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. Горшков Г.П. О сейсмичности Африки // Бюлл. совета по сейсмологии. М.: Изд-во АН СССР, 1963. № 13. 40 с.
2. Короновский Н.В., Брянцева Г.В., Гуцин А.И. Георгий Петрович Горшков – ученый, педагог, организатор //

- Прикладные аспекты динамической геологии. 2019. С. 4–12.
3. Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Суцев С.П., Малаева Н.С. Калибровка системы “Экстремум”: предварительные результаты оценки последствий разрушительного землетрясения 06.02.2023 г. в Турции // Вопросы инженерной сейсмологии. 2023. Т. 50. № 3. С. 44–70. <https://doi.org/10.21455/VIS2023.3-4>
 4. Шебалин Н.В., Ершов И.А., Шестоперов Г.С., Гехман А.С. Улучшенный вариант шкалы сейсмической интенсивности (ММСК-86) на базе шкал MSK-64 и МСССС-73 (заключительный отчет). М.: МСССС, ИФЗ, 1986. 61 с.
 5. Шерман С.И. Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция. Новосибирск: Гео, 2014. 362 с.
 6. Ambraseys N.N. Intensity-attenuation and magnitude-intensity relationships for northwest European earthquakes // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 1985. V. 13. P. 733–788.
 7. Benouar D. Magnitude-Intensity and intensity-attenuation relationships for Atlas region and Algerian earthquakes // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 1994. V. 23. P. 717–727.
 8. Chalouan, A., Gil, A. J., Galindo-Zaldívar, J., Ruano, P. et al. Active faulting in the frontal Rif Cordillera (Fes region, Morocco): Constraints from GPS data // Journal of Geodynamics. 2014. V. 77. P. 110–122.
 9. Chavez J., Goula X., Roca A. et al. Preliminary risk assessment for Catalonia (Spain) // Proc. XI European Conf. Earthq. Engineer., Paris, France, 1998.
 10. Cherkaoui T.E. Contribution à l'étude de l'aléa sismique au Maroc. Géophysique [physics.geo-ph]. Université Joseph-Fourier. Grenoble I. 1991. 247 p.
 11. Cherkaoui T.E., El Hassani A. Seismicity and Seismic hazard in Morocco // Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre. 2012. V. 34. P. 45–55.
 12. Earthquake risk reduction in the Balkan region. UNDP Project executed by UNESCO in association with UNDRO. (RER/79/014). Working Group A “Seismology, Seismotectonics, Seismic Hazard and Earthquake Prediction”, Final Report. Athens. December 1982. 152 p.
 13. Fariás C. A Foreign Geophysicist in Marrakesh during Morocco's Largest Earthquake // Seismological Research Letters. 2024, 95 (1): 1–3. <https://doi.org/10.1785/0220230334>
 14. Gorshkov G.P. Seismicity of Africa. UNESCO Publ. Provisional NS/NR/2. Add. I, Paris, 1961. P. 101–151.
 15. Gorshkov G.P. The seismicity of Africa, Chapter 3 // A review of the natural resources of the African continent. UNESCO, 1963, Printed in France, NC.62/XII.1/A. P. 101–151.
 16. Gutenberg B., Richter C.F. Seismicity of the Earth and Associated Phenomena. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1949. P. 1–273; 1954. P. 1–310.
 17. Hancılar U., Şeşetyan K., Çaktı E., Şafak E., et al. Kahramanmaraş–Gaziantep Türkiye M 7.7 Earthquake, 6 February 2023 (04:17 GMT+03:00). Strong Ground Motion and Building Damage Estimations. KOERI Preliminary Report (v6), 16.02.2023 (v6), 13.02.2023 (v5), 09.02.2023 (v4), 08.02.2023 (v3), 07.02.2023 (v2), 06.02.2023 (v1). KOERI, 2023. 42 p.
 18. Peláez J.A., Chourak M., Tadili B.A., Brahim L. A. et al. A catalog of main Moroccan earthquakes from 1045 to 2005 // Seismological Research Letters. 2007. V. 78. № 6. P. 614–621.
 19. Sponheuer W. Methoden zur Herdtiefenbestimmung in der Makroseismik. Akademie-Verlag, Berlin. 1960. 117 p.

SEISMICITY OF MOROCCO AND SIMULATION OF 08.09.2023 EARTHQUAKE CONSEQUENCES WITH “EXTREMUM” SYSTEM APPLICATION

N. I. Frolova^{a,#}, I. P. Gabsatarova^{b,##}, S. P. Suchshev^{c,###}, N. S. Malaeva^a

^aSergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per., 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia

^bGeophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Lenina av., 189, Obninsk, Kaluga region, 249035 Russia

^cMoscow State Technical University named after Bauman, 2-ya Baumanskaya str., 5, Moscow, 105005 Russia

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

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

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

This paper reports the use of regional intensity attenuation equations for the territory of Morocco by modeling the impact of the destructive earthquake of September 8, 2023 in the country. The relevance of the 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 a search and rescue strategy for the heavily affected settlements. The paper has for its goal the calibration of the “Extremum” system seismic intensity attenuation models for the territory of Morocco. Our study is the first to analyze the seismic intensity attenuation equations obtained by researchers at different times with a view to their applicability to near real time loss assessment for strong events occurring in the area of study. We investigate as well how the results of earthquake loss simulation are affected by regional damage matrixes. Computer simulation was applied to the assessment of the possible impact due to the September 8, 2023 earthquake using the “Extremum” system developed with authors’ participation. This paper provides preliminary results of modeling the impact of the Morocco earthquake, as well as an assessment of the convergence achieved by calculated and observed intensities for various intensity prediction equations obtained before for the Morocco and adjacent areas within the Alpine-Himalayan seismically active belt.

Keywords: real time earthquake loss estimation, information system “Extremum”, calibration of the models, macroseismic field, strong earthquake, Morocco

REFERENCES

1. Gorshkov G.P. [The seismicity of Africa]. *Byull. Soveta po seismologii* Moscow, USSR Academy of Sciences Publ, 1963, no. 13, 40 p. (in Russian)
2. Koronovskii N.V., Bryantseva G.V., Gushchin A.I. [Georgiy Petrovich Gorshkov – scientist, teacher, organizer]. *Prikladnye aspekty dinamicheskoi geologii*, 2019, pp. 4–12. (in Russian)
3. Frolova N.I., Gabsatarova I.P., Sushchev S.P., Malaeva N.S. [Calibration of the Extremum system: preliminary results of assessing the consequences of the devastating earthquake of 02.06.2023 in Turkey]. *Voprosy inzhenernoi seismologii*, 2023, vol. 50, no. 3, pp. 44–70. <https://doi.org/10.21455/VIS2023.3-4> (in Russian)
4. Shebalin N.V., Ershov I.A., Shestoporov G.S., Gekhman A.S. [Improved version of the seismic intensity scale (MMSK-86) based on the MSK-64 and MSSSS-73 scales (final report)]. Moscow, MSSSS, IFZ Publ., 1986. 61 p. (in Russian)
5. Sherman S. I [Seismic process and earthquake forecast: tectonophysical concept]. LLC Academic Publ. House Geo Publ, 2014. 362 p. (in Russian)
6. Ambraseys N.N. Intensity-attenuation and magnitude-intensity relationships for northwest European earthquakes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1985, vol. 13, pp. 733–788.
7. Benouar D. Magnitude-Intensity and intensity-attenuation relationships for Atlas region and Algerian earthquakes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1994, vol. 23, pp. 717–727.
8. Chalouan, A., Gil, A. J., Galindo-Zaldívar, J., Ruano, P. et al. Active faulting in the frontal Rif Cordillera (Fes region, Morocco): Constraints from GPS data. *Journal of Geodynamics*, 2014, vol. 77, pp. 110–122.
9. Chavez J., Goula X., Roca A. et al. Preliminary risk assessment for Catalonia (Spain). *Proc. XI European Conf. Earthq. Engineer.*, Paris, France, 1998.
10. Cherkaoui T.E. Contribution a l'étude de l'alea sismique au Maroc. Geophysique [physics.geo-ph]. Universite Joseph-Fourier, Grenoble I. 1991. 247 p. (in French)
11. Cherkaoui T.E., El Hassani A. Seismicity and Seismic hazard in Morocco. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre*. 2012, vol. 34, pp. 45–55.
12. Earthquake risk reduction in the Balkan region. UNDP Project executed by UNESCO in association with UN-DRO. (RER/79/014). Working Group A “Seismology, Seismotectonics, Seismic Hazard and Earthquake Prediction”, Final Report. Athens. December 1982. 152 p.
13. Farias C.A. Foreign Geophysicist in Marrakesh during Morocco's Largest Earthquake. *Seismological Research Letters*, 2024, 95 (1): 1–3. <https://doi.org/10.1785/0220230334>.
14. Gorshkov G.P. Seismicity of Africa. UNESCO Publ. Provisional NS/NR/2. Add. I, Paris, 1961, pp. 101–151.
15. Gorshkov G.p P. The seismicity of Africa, Chapter 3. In: A review of the natural resources of the African continent. UNESCO, Printed in France, NC.62/XII.1/A, 1963, pp. 101–151.
16. Gutenberg B., Richter C.F. Seismicity of the Earth and Associated Phenomena. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1949, pp. 1–273; 1954, pp. 1–310.
17. Hancılar U., Şeşetyan K., Çaktı E., Şafak E., et al. Kahramanmaraş–Gaziantep Türkiye M 7.7 Earthquake, 6 February 2023 (04:17 GMT+03:00). Strong Ground Motion and Building Damage Estimations. KOERI Preliminary Report (v6), 16.02.2023 (v6), 13.02.2023 (v5), 09.02.2023 (v4), 08.02.2023 (v3), 07.02.2023 (v2), 06.02.2023 (v1). KOERI, 2023. 42 p.
18. Peláez, J.A., Chourak, M., Tadili, B.A., Brahim, L.A. et al. A catalog of main Moroccan earthquakes from 1045 to 2005. *Seismological Research Letters*, 2007, vol. 78, no. 6, pp. 614–621.
19. Sponheuer W. Methoden zur Herdtiefenbestimmung in der Makroseismik. Akademie-Verlag, Berlin.1960. 117 p. (in German)