

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 624.131.1:551.252

**КАЛИБРОВКА МОДЕЛИ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ
“ЭКСТРЕМУМ” ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОТЕРЬ ОТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
ВОСТОЧНОЙ ЗОНЫ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА**

© 2022 г. Н. И. Фролова^{1,*}, И. П. Габсатарова^{2,**}, С. П. Сушев^{3,***}, Н. С. Малаева¹

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

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

³ Московский Государственный Технический Университет им. Баумана (МГТУ), 2-я Бауманская ул., д. 5, Москва, 105005 Россия

*E-mail: frolovanina7@gmail.com

** E-mail: ira@gstras.ru

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

Поступила в редакцию 16.03.2022 г.

После доработки 05.04.2022 г.

Принята к публикации 25.04.2022 г.

Настоящее исследование направлено на калибровку моделей, используемых в системе “Экстремум” для расчета возможных потерь от сильных землетрясений. Исследуются параметры макросейсмического поля в восточной зоне Северного Кавказа по материалам землетрясений прошлого века. Район исследования расположен в сопредельной области северных структур Большого Кавказа и Терско-Каспийского прогиба. Этот высокосейсмичный район, административно относящийся к Чеченской Республике и Республике Дагестан, известен проявлением землетрясений магнитуды $M = 6.2-6.4$ в 1976 г. и $M = 5.0-5.3$ в 1966, 1969 и 1984 г. Проведенные исследования позволили расширить границы выделенной в 2019 г. зоны с “квазиустойчивыми” параметрами макросейсмического поля на восточном Кавказе, которая простиралась в основном, в пределах очаговой зоны Дагестанского землетрясения 1970 г. и ближайшего окружения, а затем была продлена до эпицентральной зоны Курчалойского землетрясения 2008 г. При исследовании выполнено сравнение наборов основных параметров землетрясений и параметров макросейсмического поля, полученных различными центрами и авторами ранее, учтены направленность излучения и расположение действующего сейсмогенного разлома земной коры. Сопоставлены наблюдаемые и расчетные значения сейсмической интенсивности, полученные с помощью системы “Экстремум”. Результаты калибровки дополнили множество наборов калибровочных данных, используемых для эффективной оперативной оценки последствий землетрясений. Их рекомендуется применять при оценке параметров обстановки системой “Экстремум” в зоне влияния разрушительных землетрясений на территории республик Северного Кавказа – Чеченской и Дагестана.

Ключевые слова: оперативные оценки потерь от землетрясений, калибровка модели макросейсмического поля, Владикавказский разлом, зона ВОЗ, квазиустойчивые параметры, информационная система “Экстремум”

DOI: 10.31857/S0869780922040014

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость предотвращения катастрофических последствий землетрясений побуждает исследователей постоянно проводить работы по совершенствованию методов оценки сейсмической опасности. Настоящее исследование продолжает цикл работ авторов, направленных на калибровку геоинформационной системы “Экстремум”, применяемой в Национальном центре по управлению кризисными ситуациями МЧС РФ для оперативной оценки возможных потерь от

сильных землетрясений, методические основы таких работ изложены в [11, 12, 31–33].

Рассматриваемый район принадлежит к сейсмически активному Альпийско-Гималайскому поясу, на примере землетрясений в котором авторами уже неоднократно проводились исследования по калибровке системы “Экстремум” [33–35] и, бесспорно, заслуживает всестороннего изучения. Предметом настоящей работы являются сильнейшие землетрясения на территории Чеченской Республики (ранее Чечено-Ингушетии)

и Республики Дагестан: Дагестанское 1970 г., Черногорское 1976 г. и Курчалойское 2008 г. Ранее в работах авторов было показано, что эпицентральные зоны Дагестанского и Курчалойского землетрясений по параметрам макросейсмического поля могут быть объединены в одну зону квазистойчивых параметров [33]. В 2020–2021 гг. очаговая зона Черногорского землетрясения 1976 г. активизировалась проявлением нескольких ощутимых событий с $M = 4.0–4.8$, что побудило авторов вновь обратиться к территории Восточного Кавказа. Впервые для целей калибровки будет рассмотрено Черногорское землетрясение 1976 г.

При оценке возможных потерь и ущерба от будущих землетрясений при калибровке параметров моделей, используемых для расчета, весьма показательный эффект дает использование сценарийных событий, для которых могут выбираться ранее произошедшие сильные землетрясения в регионе или наиболее опасные события согласно картам зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ), которые строятся при Общем сейсмическом районировании (ОСР) [29] и при детальном сейсмическом районировании (ДСР) [26]. Основанием к выбору в качестве сценарийных событий по положению очагов уже известных сильных землетрясений являются факты обнаружения в очаговых зонах современных сильных землетрясений древних аналогов с близкими значениями магнитуды благодаря исследованиям, например, палеосейсмодислокаций [26]. Так, Дагестанское землетрясение 1970 г. произошло в эпицентральной зоне другого сильного сейсмического события – 09.03.1830 г. ($M = 6.3$, $h = 16$ км) [19]. Землетрясение 1830 г. ощущалось на большой территории Северного Кавказа и частично Закавказья: от Астрахани до Тбилиси и от Краснодара до Дербента. В эпицентральной области интенсивность сотрясений составила 8–9 баллов [18, 19]. Древние сейсмогенные оползни были выявлены и в 8-балльной плейстосейстовой области Черногорского землетрясения 1976 г. [14]. Кроме того, в качестве сценарийных событий выбираются и прогнозные потенциальные очаги землетрясений на Кавказе, например, показанные в работе [39].

Цель настоящего исследования (кроме прямого расчета возможного эффекта от землетрясения подобного по магнитуде Черногорскому 1976 г.) – уточнение уравнения макросейсмического поля и возможное расширение выделенной ранее зоны квазистойчивых параметров в восточной части Северного Кавказа для систематизации имеющихся моделей расчета возможных потерь от землетрясений, применяемых в системе “Экстремум”.

Полученный в результате исследований эффект будет проиллюстрирован на расчетах возможных степеней повреждений застройки в наиболее крупных населенных пунктах Чеченской

Республики и Республики Дагестан в случае возникновения сценарийных землетрясений в этой зоне.

ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА И СЕЙСМИЧНОСТЬ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Восточный Кавказ справедливо считается сейсмически наиболее активным на Кавказе, о чем говорят имеющиеся сведения об исторических землетрясениях этого района [17, 19, 26]. Сейсмическая активность связана, в первую очередь, с четким геологическим и морфологическим разграничением Терско-Каспийского прогиба и Большого Кавказа на всем их протяжении и сочленением этих крупнейших тектонических элементов. В Предкавказье на молодой Скифской платформе также, как и на Большом Кавказе, преобладают разрывные нарушения запад-северо-западной ориентировки [26, 39], это будет использовано в качестве дополнительного признака направленности разрыва, отображаемого в вытянутости изосейст для всей исследуемой зоны. Мезозойские и более молодые отложения зоны Известнякового Дагестана надвинуты на Терско-Каспийский краевой прогиб по пологой поверхности, падающей к югу. С этой зоной связаны уже упомянутые сильные землетрясения 1830 и 1970 г. с $M = 6.3–6.6$ и многочисленные, более слабые толчки, в связи с чем она рассматривается под названием сейсмофокальной области Дагестанского клина [4].

Дагестанское землетрясение 1970 г. хорошо изучено [8]. Сейсмичность области Дагестанского клина после землетрясения 1970 г. резко возросла и оставалась на значительно более высоком, чем прежде, уровне, даже 20 лет спустя. По мнению С.С. Арефьева объяснением этого явления может служить то, что это землетрясение было предельным, максимально возможным для данной области и вызвало сильную перестройку напряженного состояния горных пород, выразившуюся в увеличении фоновой сейсмической активности [5]. Такой ситуации не наблюдалось после Черногорского землетрясения 1976 г., произошедшего в Черных горах, простирающихся вдоль Владикавказского (Черногорского¹) субширотного глубинного разлома, что предполагало возможное проявление в этой зоне еще более сильного события. По мнению [23], сильные землетрясения обычно приурочены к дизъюнктив-

¹ Черногорский (Владикавказский) глубинный разлом, названный дагестанскими геологами еще и Восточно-Мугринским, трассируется на западном погружении Дагестанского выступа, огибая Талгинский купол, пересекает Карабудахкентскую структуру, Салтабакскую структурную террасу по восточному борту Западной антиклинальной зоны, уходит до границ с Азербайджаном.

Таблица 1. Сильнейшие землетрясения на территории Восточного Кавказа

Дата	Координаты	Магнитуда, M	Интенсивность MSK-64, балл	Название
09.03.1830	43.0 47.0	6.3	8–9	Дагестанское-I
10.08.1912	43.5 45.1	5.7	8	Терское (Эльдаровское)
05.10.1928	42.8 45.6	4.7	7	Аргунское
24.10.1933	42.9 45.9	5.2	7–8	Веденовское
02.03.1966	43.03 45.71	5.0	7	Аргунское-II
17.06.1969	43.27 45.19	5.1	7 (6–7)	Ачхой-Мартановское
14.05.1970	43.00 47.09	6.6	9 (8–9)	Дагестанское
22.11.1971	41.23 48.38	5.5	7	Старогрозненское
23.12.1974	42.95 46.82	5.0	7	Салатаусское
28.07.1976	43.1 45.5	6.2 (6.4)	8–9	Черногорское
03.08.1989	43.49 45.23	5.0	7	Горагорское
11.10.2008	43.24 46.17	5.6 (5.8)	8	Курчалойское
12.12.2020	43.037 45.542	4.8	5–6	

ным узлам (на исследуемом участке это пересечение диагональной Даттых-Ахловской шовной зоны [15, 16] и Владикавказского (Черногорского) разлома) и к зонам глубинных разломов большой протяженности, каким является Владикавказский (Черногорский) разлом.

Наиболее сильные землетрясения исследуемой зоны приведены в табл. 1. Большая часть названных землетрясений произошла в высокосейсмичной Терско-Сунженской сейсмогенерирующей области [15, 16] и в зоне Дагестанского клина.

Эпицентр Черногорского землетрясения 28.07.1976 г. (с магнитудой по разным оценкам от 6.2 до 6.4 и интенсивностью в эпицентре 8–9 баллов) находился в горах, в безлюдной местности, однако в близлежащих селах наблюдался разрушительный эффект, максимально достигший 8 (местами до 9) баллов в селении Чожи-Чу и 7 (местами до 8) баллов в нескольких немного более удаленных селах. Дагестанские сейсмологи выезжали в эпицентральную зону и опубликовали результаты наблюдений Черногорского землетрясения 28 июля 1976 г. в Трудах Дагестанского филиала АН СССР [14]. Этими данными мы воспользуемся для калибровки системы “Экстремум” и моделирования возможных последствий от такого уровня землетрясений в южной части территории Чеченской Республики (ЧР).

Макросейсмические сведения о части землетрясений участвовали в уточнении коэффициентов макросейсмического поля в работе [33]. Другая часть из них, а именно, ближайšie к эпицентру Черногорского землетрясения 1976 г., Аргунское, 1966 г., Ачхой-Мартановское 1969 г.,

4.03.1984 г., 03.08.1989 г. и 12.12.2020 г., участвовали в уточнении параметров макросейсмического поля, применительно к району Черногорского землетрясения. Полученный результат описан ниже в самостоятельном разделе.

ЗОНЫ ВОЗ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА

Зоны ВОЗ являются сеймотектонической основой карт сейсмической опасности и могут быть использованы для основы зонирования территории. Согласно зонированию территории в системе АИУС РСЧС² [13], территория ЧР относится к зоне пересечения сейсмолинементов с $M_{\max} = 6.5$, имеющих кавказское направление и диагональное к нему, по линейментно-доменно-фокальной модели (ЛДФ-модель) зон ВОЗ [29].

По более детальным оценкам [15, 16] большая часть территории ЧР относится к зонам ВОЗ ($M_{\max} = 6$), центральная ее часть к $M_{\max} = 6.5$, а с юга и востока территории соседствуют зоны с $M_{\max} = 7$. Последние по времени уточненные оценки [26] относят большую часть территории ЧР к зоне $M_{\max} = 6.3$, северную ее часть – к $M_{\max} = 6$. Существуют и другие варианты зон ВОЗ для этой территории. Рассмотрим их с целью возможного

² АИУС РСЧС – Автоматизированная Информационная Управляющая Система Российской системы чрезвычайных ситуаций – система сбора, комплексной обработки оперативной информации о чрезвычайных ситуациях и информационного обмена между различными подсистемами и звеньями РСЧС, передачи органами повседневного управления необходимых указаний силам и средствам ликвидации чрезвычайных ситуаций.

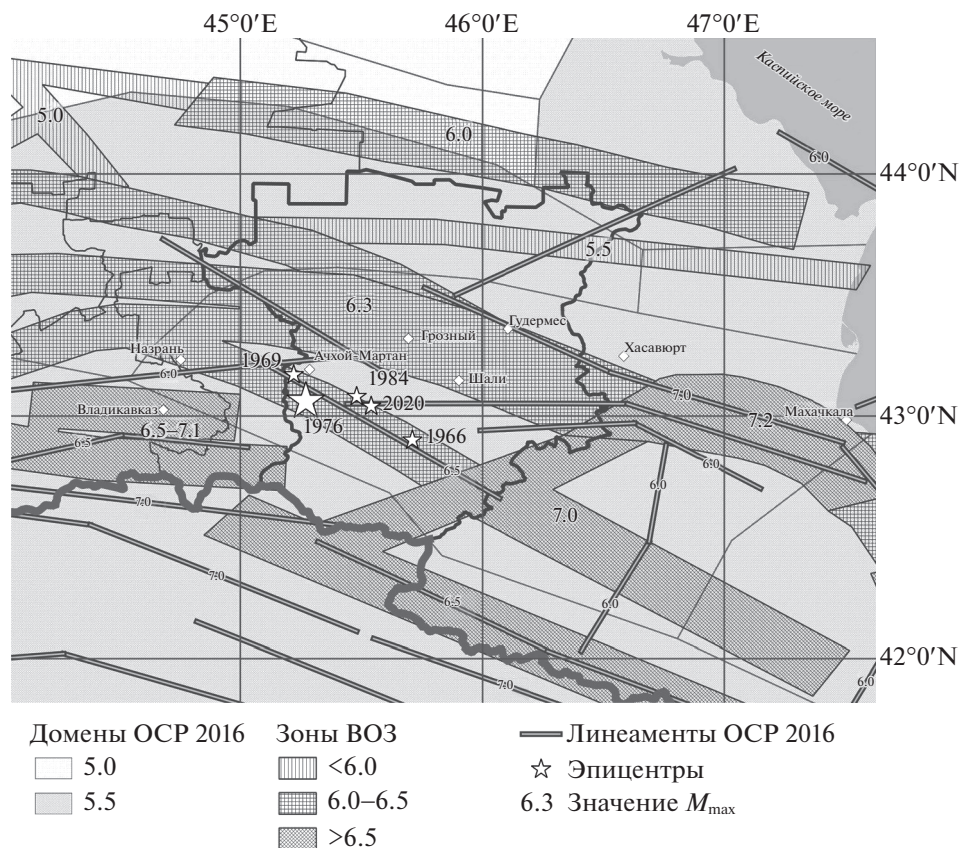


Рис. 1. Наложение зон ВОЗ по [26] на карту доменов и линеаментов по [20]. Звездами показаны эпицентры землетрясений в исследуемой зоне.

применения для расширения границ “калибровочной” области в восточной части Северного Кавказа.

Рассмотрим оценки M_{max} по внерегиональному сеймотектоническому методу [23]. Суть метода заключается в проведении независимого от сейсмологических данных геодинамического районирования земной коры с привлечением признаков, характеризующих ее современное строение и состояние, и с применением кластерного анализа комплекса геолого-геофизических данных. Результаты такого районирования сопоставляются с имеющимися сейсмологическими материалами, и для каждой геодинамической обстановки выявляется своя величина M_{max} . При построении карты M_{max} Кавказа впервые в полной мере был реализован учет всех многочисленных и разнородных по содержанию данных (геологических, геофизических, геодезических, дешифрованных космических снимков), характеризующих условия возникновения очагов землетрясений [39]. В этой работе даются максимальные оценки $M_{max} = 7.1$ вблизи зоны, где было зарегистрировано Черногорское землетрясение 1976 г. Эти данные мы можем использовать для обоснования

максимальной магнитуды сценарийного землетрясения в исследуемом нами районе.

Предстоит решить задачу как можно более широкого зонирования территории для оперативной оценки возможной силы землетрясения и расчета потерь от него с использованием обобщенных параметров модели. Поэтому рассмотрим другие варианты построения зон ВОЗ в сравнении с ЛДФ-моделью оценки вероятностной сейсмической опасности региона Крым–Кавказ в виде зон ВОЗ, подготовленной для карты Общего сейсмического районирования ОСР [30].

В [24, 26] карты сейсмической опасности для Северного Кавказа разработаны в масштабе, близком к масштабу ДСР. Была составлена схема зон ВОЗ посредством выделения и картирования по геологическим и геодинамическим данным активных тектонических структур на рассматриваемой территории; в результате была создана ее сеймотектоническая модель с оценкой сейсмического потенциала M_{max} . Для исследуемого района представим эту зону ВОЗ в сопоставлении доменов и линеаментов ОСР-2016 (рис. 1). Значительная часть зон ВОЗ вокруг исследуемых землетрясений попадает в одну доменную струк-

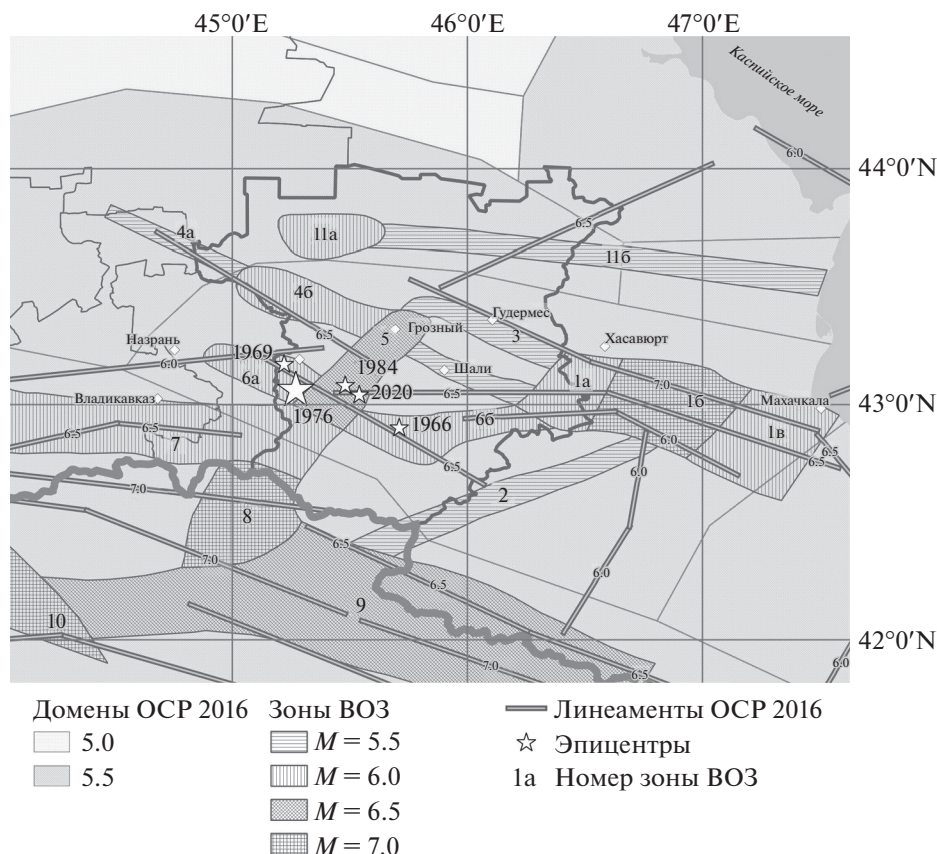


Рис. 2. Наложение зон ВОЗ по [15, 16] на карту доменов и линеаментов по [20]. Звездами показаны эпицентры землетрясений в исследуемой зоне. Зоны ВОЗ: 1 – Махачкалинская (1а – Хасавюртский участок $M_{\max} = 6.0$, 1б – Буйнакский узел $M_{\max} = 7.0$); 2 – Андий Койсуйская $M_{\max} = 5.5$; 3 – Гудермесская $M_{\max} = 5.5$; 4 – Бенойско-Эльдаровская (4а – Моздокская $M_{\max} = 6.0$, 4б – Горагорский узел $M_{\max} = 6.0$); 5 – Черногорская $M_{\max} = 6.5$; 6 – Даттых-Ахловская (6а – Серноводский участок $M_{\max} = 6.0$, 6б – Аргунский участок $M_{\max} = 6.0$); 7 – Владикавказская зона $M_{\max} = 6.0$; 8 – Борисахская $M_{\max} = 7.0$; 9 – зона Водораздельного хребта $M_{\max} = 6.5$; 10 – Джава-Лечхумская $M_{\max} = 7.0$; 11 – Северная краевая (южная ветвь) (11а – Наурский узел $M_{\max} = 6.0$; 11б – Старогладковский участок $M_{\max} = 5.5$).

туру (тонкие серые линии на рис. 1), расположенную в центральной части ЧР и Республики Дагестан и простирающуюся западнее и южнее ранее выделенной нами зоны при калибровочных работах в 2019 г. [33].

Несколько более дифференцирована карта зон ВОЗ, составленная при комплексном обследовании г. Грозный и его окружения в 1996 г. (рис. 2), однако и в этом случае зоны ВОЗ для исследуемых землетрясений можно объединить границами одного домена.

Положение эпицентра землетрясения 1976 г. связано с дизъюнктивным узлом и комбинацией двух зон противоположной ориентации – № 5 и № 6.

Зона № 5 по [15, 16] – “Черногорская зона ВОЗ своей северной частью непосредственно захватывает территорию г. Грозного. Она связана с субмеридиональной зоной поперечного дробления, имею-

щей глубокое заложение. Здесь происходит пересечение тектонических структур кавказского и антикавказского простираения. Сильные очаги этой зоны относятся к нижнекоровым ($h > 25$ км), что несколько умеряет их сейсмическую опасность. Однако для нее характерны и слабые приповерхностные очаги, способные создавать в небольшой эпицентральной зоне сейсмический эффект до 7 баллов”. Прогнозная $M_{\max} = 6.5$.

Зона № 6 – Даттых-Ахловская зона ВОЗ, разделяется Черногорской зоной на два участка: западный – Серноводский (6а) и восточный – Аргунский (6б). Она примыкает к южной части Черногорской зоны и связана с погребенными разломами приблизительно кавказского простираения. Очаги землетрясений этой зоны подразделяются на нижнекоровые и верхнекоровые, причем нижнекоровые характерны только для Серноводского ее участка (6а). Максимальные наблюдаемые магнитуды: на Серноводском

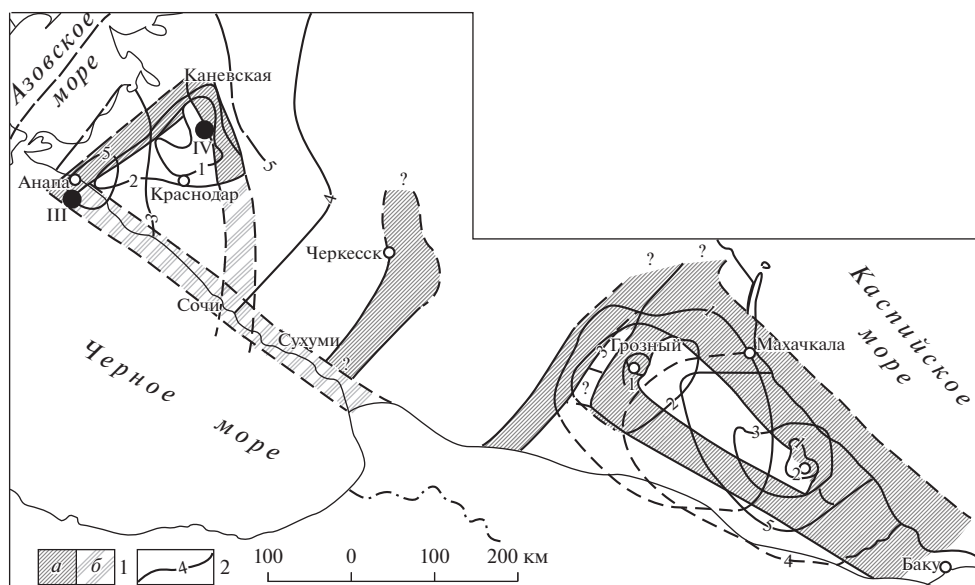


Рис. 3. Схема расположения сейсмогенных зон Большого Кавказа по И.В. Ананьину [3]. 1 – сейсмогенные зоны: *a* – по коэффициентам затухания, *b* – по геофизическим данным; 2 – изосейсты землетрясений.

участке – $M = 5.4$ (1981 г.) на Аргунском участке – $M = 5.2$ (1933 г.). Обоим участкам зоны приписана $M_{\max} = 6.0$.

Таким образом, высказано предположение о глубине возможных очагов в исследуемой зоне, далее при расчетах будут рассмотрены варианты с разной глубиной очага Черногорского землетрясения 1976 г.

УТОЧНЕНИЕ УРАВНЕНИЯ МАКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ЗОНЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расширение зоны калибровки для восточной зоны Северного Кавказа связано также с условием однородности макросейсмического поля. Связь распределения макросейсмических проявлений с геологическим строением была проанализирована И.В. Ананьиним [2], и построена схема расположения сейсмогенных зон Большого Кавказа (рис. 3). Таким образом, довольно большая область Восточного Кавказа может характеризоваться близкими значениями коэффициентов затухания макросейсмического поля. Это следует проверить на новых данных, не учтенных ранее И.В. Ананьиним [3].

Были собраны сведения о макросейсмическом проявлении четырех землетрясений в исследуемой зоне. Карты-схемы их изосейст приведены на рис. 4–7. Таблицы, содержащие названия пунктов и соответствующие им значения баллов, были использованы для построения графика затухания балльности с расстоянием (рис. 8). Предварительно для всех населенных пунктов были

уточнены географические координаты, единообразно рассчитаны эпицентральные и гипоцентральные r расстояния. В работе [22] при оценке параметров уравнения макросейсмического поля применялся метод объединения сведений о макросейсмических проявлениях совокупности близко расположенных сейсмических событий, компенсирующий недостаток землетрясений, которые могут использоваться в качестве опорных. Такой же подход был использован в данной работе. Особое значение имеют точность и однородность инструментального определения магнитуды. В нашем исследовании в качестве магнитуды M использовались магнитуды MLH или M_s .

Следует заметить, что для исследуемой серии землетрясений характерен недостаток данных наблюдений в южной части относительно эпицентральных зон, что объясняется труднопроходимостью горной территории и малым числом населенных пунктов в Черных горах, в пределах Главного и Бокового хребтов Большого Кавказа [7].

Общая черта в положении изосейст этих землетрясений – вытянутость в направлении запад-северо-запад, что совпадает с направлением ориентировки в известных разрывных нарушениях, отмечаемых геологами [26, 39].

На рис. 8 приводится график $I - 1.5M = f(lg r)$, построенный по методу объединения сведений о макросейсмических проявлениях совокупности близко расположенных сейсмических событий [22].

Для построения графика использовались данные 320 объектов в виде пунктов с определенной

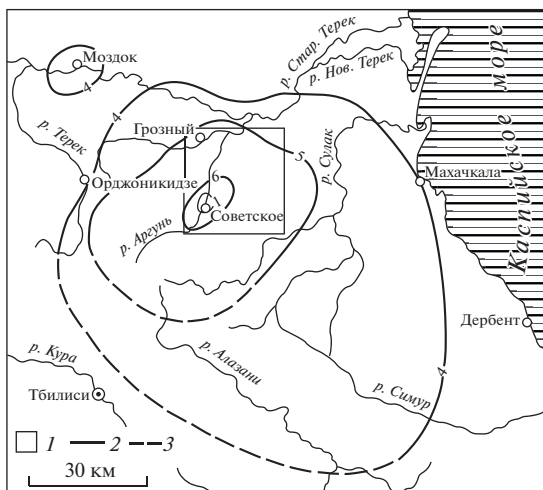


Рис. 4. Схема изосейст Аргунского землетрясения 02.03.1966 г. [2]: 1 – контуры детально рассмотренной области; 2 – изосейсты; 3 – изосейсты предполагаемые.

бальностью, удаленных от эпицентров на расстояния от 2 до 240 км.

В аналитическом виде зависимость интенсивности I от магнитуды и гипоцентрального расстояния r в соответствии с графиком (см. рис. 8) представляется формулой:

$$I = 1.5M - 3.63(\pm 0.11) \lg r + 3.21 (\pm 0.20), \quad (1)$$

$$R = 0.88.$$

Для сравнения приведем формулы:

– Н.В. Шебалина для Дагестана [19, 38]

$$I = 1.5M - 3.6 \lg r + 3.1, \quad (2)$$

– Н.В. Шебалина для Северного Кавказа [19, 38]

$$I = 1.6M - 3.1 \lg r + 2.2, \quad (3)$$

– уточненную для Северного Кавказа [33]

$$I = 1.5M - 3.1 \lg r + 2.23, \quad (4)$$

– полученную ранее в [33] при калибровке в восточной зоне Северного Кавказа

$$I = 1.5M - 3.62(\pm 0.24) \lg r + 3.16(\pm 0.36). \quad (5)$$

Как видно, коэффициенты уравнений (1)–(3) почти идентичны в пределах ошибок определения. Таким образом, результаты проведенных работ позволяют продлить ранее выделенную область калибровки восточной зоны Северного Кавказа западнее и южнее (рис. 9).

ПРОЦЕДУРА КАЛИБРОВКИ МАКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ПОЛЯ

В настоящей статье для калибровки параметров модели макросейсмического поля используется ранее разработанная авторами процедура [31, 33–35], предусматривающая подбор приемлемых, устойчивых для рассматриваемой терри-

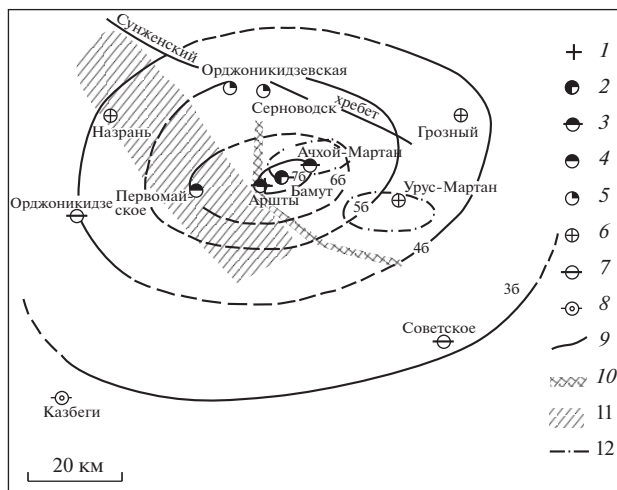


Рис. 5. Схема изосейст Ачхой-Мартановского землетрясения 17.06.1969 г. с элементами сеймотектонической схемы: 1 – эпицентр по макросейсмическим данным; интенсивность в баллах: 2–7, 3–6–7, 4–6, 5–5, 6–4, 7–3–4, 8–2–3; 9 – изосейсты; 10 – гравитационная ступень; 11 – Датыхско-Ахловский древний горст; 12 – вторичные впадины в Сунженской долине [27].

тории значений параметров математической модели затухания сейсмической интенсивности. В качестве таких параметров предложено использовать:

– коэффициенты уравнения b, v, c макросейсмического поля [36, 38]:

$$I = bM - v \lg \sqrt{\Delta^2 + h^2} + c, \quad (6)$$

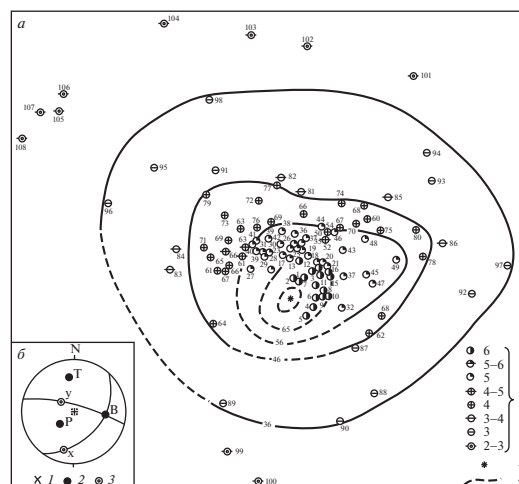


Рис. 6. Схема изосейст главных толчков 4.03.1984 г. (а): 1 – бальность; 2 – макросейсмический эпицентр; 3 – изосейста; б – диаграмма механизма очага: 1 – нодальная плоскость; 2 – оси главных напряжений; 3 – оси подвижек [1].

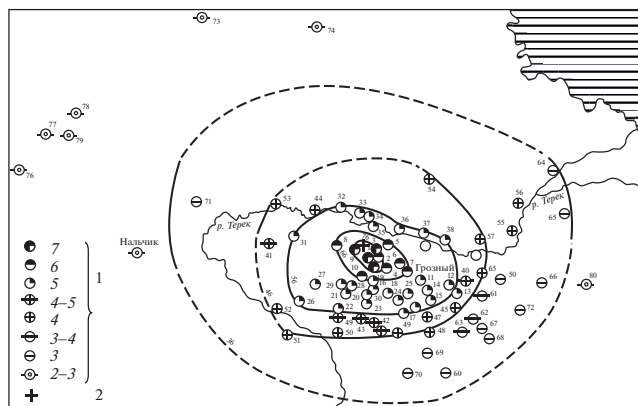


Рис. 7. Схема изосейст землетрясения 3.08.1989 г.: 1 – балльность; 2 – инструментальный эпицентр 03.08.1989 г. [6].

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

– отношение большой и малой осей эллиптических изосейст высших баллов, названное коэффициентом сжатия k ;

– угол, задающий ориентацию макросейсмического поля, в частности, азимут большой оси эллипса вытянутости изосейст.

Ранее авторами были изучены особенности затухания для отдельных зон на территории РФ и сопредельных стран [32–35]. Для территории Кавказа для калибровки использовались сведения об ощутимости 32 сильных землетрясений с $I \geq 6$ баллов по шкале MSK-64 за период 1966–

2012 гг. В процессе калибровки определялись координаты населенных пунктов, рассчитывались удаления пунктов от макросейсмических эпицентров, строились графики затухания. Для каждого землетрясения рассчитаны индивидуальные параметры макросейсмического поля, которые впоследствии использовались для вычисления средних параметров для зоны. При определении ориентации макросейсмического поля и коэффициентов сжатия эллипса k в качестве основы использовалась информация с карты ОСР-97 о доменах и сейсмолинеаментах [10, 29].

В результате исследований были установлены стабильные параметры макросейсмического поля для района, границы которого включают территорию Дагестанского клина с продолжением на северо-запад от 48° до 45.5° E. Для выделенной зоны рекомендован следующий набор стабильных параметров поля: $b = 1.5$, $v = 3.62$, $c = 3.16$, $k = 1.55$; ориентация поля в соответствии с полем разломов.

Выполненные с использованием полученных параметров поля контрольные расчеты для Дагестанского (14.05.1970 г.) и Курчалойского (11.10.2008 г.) землетрясений показали эффективность калибровки моделей системы “Экстремум” [33]. В целом погрешность в определении интенсивности не превысила 0.3–0.5 балла. Значения погрешностей ΔI_{cp} в прогнозировании интенсивности от контрольных землетрясений варьировались от 0.1 на эпицентральных расстояниях меньше 25 км и до 0.3 на расстояниях более 100 км.

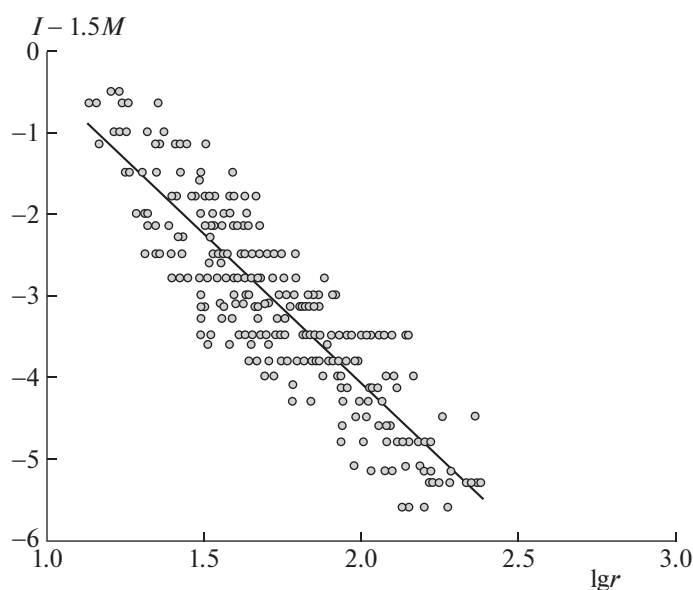


Рис. 8. Объединенный график зависимости разницы $I - 1.5M$ от логарифма гипоцентрального расстояния для землетрясений зоны Черногорского землетрясения 1976 г.

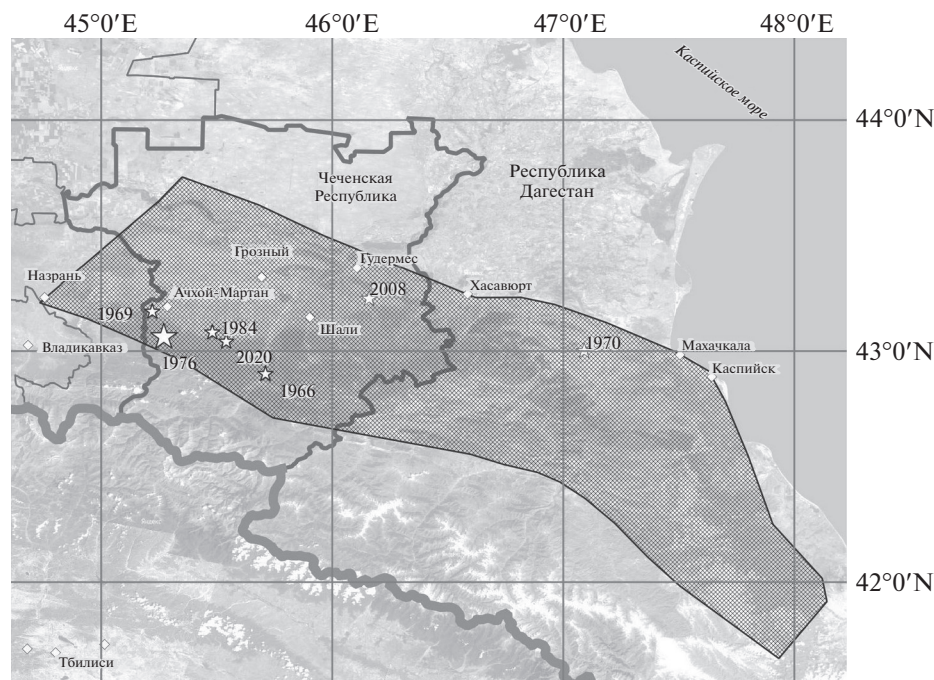


Рис. 9. Зона в восточной части Северного Кавказа с квазиустойчивыми параметрами макросейсмического поля для моделирования последствий в режиме времени, близком к реальному.

РАСЧЕТ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧЕРНОГОРСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 1976 г.

Для исследования применимости описанных выше параметров поля для рассматриваемого

района Кавказа выполнены расчеты последствий Черногорского землетрясения 28.07.1976 г. в ЧР. В табл. 2 приведены варианты исходных данных для расчета последствий землетрясения с помо-

Таблица 2. Варианты исходных данных для расчета последствий землетрясения в восточной зоне Северного Кавказа по данным Черногорского землетрясения 1976 г.

№	Параметры события	Уравнение макросейсмического поля	Ориентация поля ζ и коэффициент сжатия k
1	43.0° N; 45.2° E; $M = 6.4$; $h = 16$ км макросейсмический эпицентр по [14]	ф. (3)	Вдоль разлома; $k = 1.5$
2	—”—	ф. (2)	—”—
3	—”—	ф. (1)	—”—
4	—”—	ф. (5)	$\zeta = 115^\circ$; $k = 1.55$
5	—”—	ф. (4)	Вдоль разлома; $k = 1.5$
6	—”—	ф. (1)	$\zeta = 107^\circ$; $k = 1.5$
7	43° N; 45.27° E; $M = 6.4$; $h = 25$ км [21]	Та же	Вдоль ближайшего разлома; $k = 1.5$
7a	43.06° N; 45.27° E; $M = 7.1$; $h = 25$ км	—”—	—”—
8	43.06° N; 45.27° E; $M = 6.4$; $h = 25$ км [21]	—”—	Вдоль разлома; $k = 1.5$
9	—”—	ф. (5)	$\zeta = 115^\circ$; $k = 1.55$
10	42.95° N; 45.56° E; $M = 6.4$; $h = 16$ км (макросейсмический эпицентр – авторов)	ф. (2)	Вдоль разлома; $k = 1.5$
11	—”—	ф. (1)	$\zeta = 115^\circ$; $k = 1.55$
12	—”—	ф. (5)	—”—
13	—”—	ф. (4)	Вдоль разлома; $k = 1.5$
14	—”—	ф. (1)	Вдоль ближайшего разлома; $k = 1.5$
14a	42.95° N; 45.56° E; $M = 7.1$; $h = 16$ км (макросейсмический эпицентр – авторов)	Та же	—”—

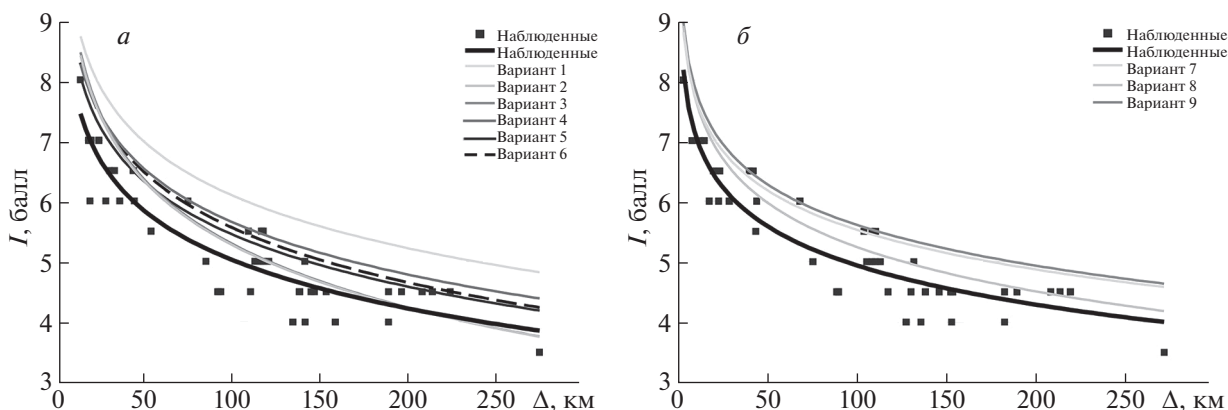


Рис. 10. Сравнение расчетной и наблюдаемой интенсивностей: а – варианты 1–6; б – варианты 7–9 (см. табл. 2).

стью системы “Экстремум”. Расчеты выполнялись для макросейсмических параметров очага события [14] и параметров события по Дагестанскому каталогу [21]. В качестве коэффициента сжатия k использовались значения 1.5 и 1.55. Рассматривались разные ориентации: вдоль ближайшего разлома, под углом 115° в соответствии с ранее установленной ориентацией для откалиброванной зоны на Кавказе [33] и под углом 107° в соответствии с решением механизма очага [40]. Расчетные значения интенсивности сравнивались с наблюдаемыми значениями, опубликованными в работе [14].

На рис. 10а приведены результаты расчета интенсивности сотрясений I для параметров макросейсмического очага по данным [14], на рис. 10б – для параметров события по [21].

Расчетные значения интенсивности при использовании коэффициентов уравнения макросейсмического поля для Северного Кавказа [36, 37] значительно превышают наблюдаемые значения на эпицентральных расстояниях больше

100 км $\Delta I > 1$ балла (см. вариант 1, табл. 2). По вариантам 2–6 (см. табл. 2) получены незначительно завышенные оценки расчетных интенсивностей ($\Delta I < 0.3$ балла) в ближней зоне до 50–60 км. На расстояниях свыше 60 км наименьшая разница $\Delta I < 0.1$ –0.2 балла получена для варианта 2 и 3 при использовании уточненных параметров поля для Северного Кавказа [33] и уравнения, полученного авторами в настоящей работе. На эпицентральных расстояниях 110–240 км расчетные и наблюдаемые значения по вариантам 2 и 3 практически совпадают с наблюдаемыми. При этом за пределами 250 км для варианта 2 наблюдается незначительное занижение расчетных значений интенсивности.

При использовании в расчетах параметров очага в соответствии с Дагестанским каталогом [21] наилучшая сходимость расчетных и наблюдаемых интенсивностей ΔI в диапазоне 0.2–0.3 балла получена для уравнения (3) (см. рис. 10б).

На рис. 11 приводится сравнение расчетных и наблюдаемых интенсивностей при использовании параметров макросейсмического очага, определенного по изосейсте 6 баллов. Расчетные значения интенсивности для коэффициентов макросейсмического поля по уравнениям (3) и (2) при ориентации поля вдоль разломов по-прежнему дают лучшую сходимость. Сходимость увеличивается за счет учета погрешностей в определении коэффициентов в (3), и ΔI составляет 0.1–0.2 балла (см. вариант 14, табл. 2).

Анализ результатов показывает, что полученные авторами в настоящей работе коэффициенты макросейсмического поля (1) и устойчивые параметры в уравнении (5) [33], а также уравнение (2) дают близкие оценки расчетной интенсивности, что позволяет уточнить границы зоны с квазистабильными параметрами поля на Восточном Кавказе [33] за счет ее расширения (см. рис. 9). Уточнение границ зоны с квазистабильными параметрами макросейсмического поля хорошо

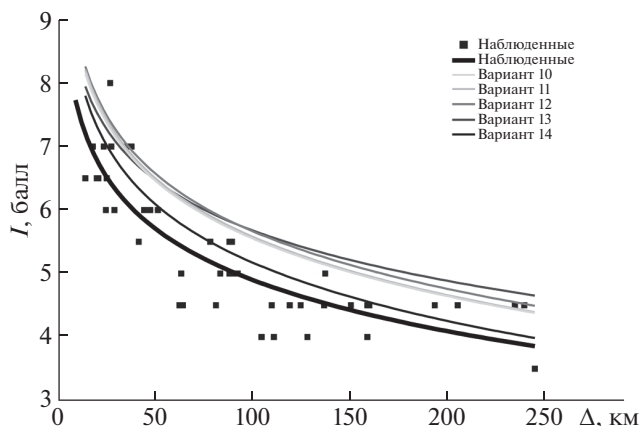


Рис. 11. Сравнение расчетной и наблюдаемой интенсивностей, варианты 10–14 (см. табл. 2).

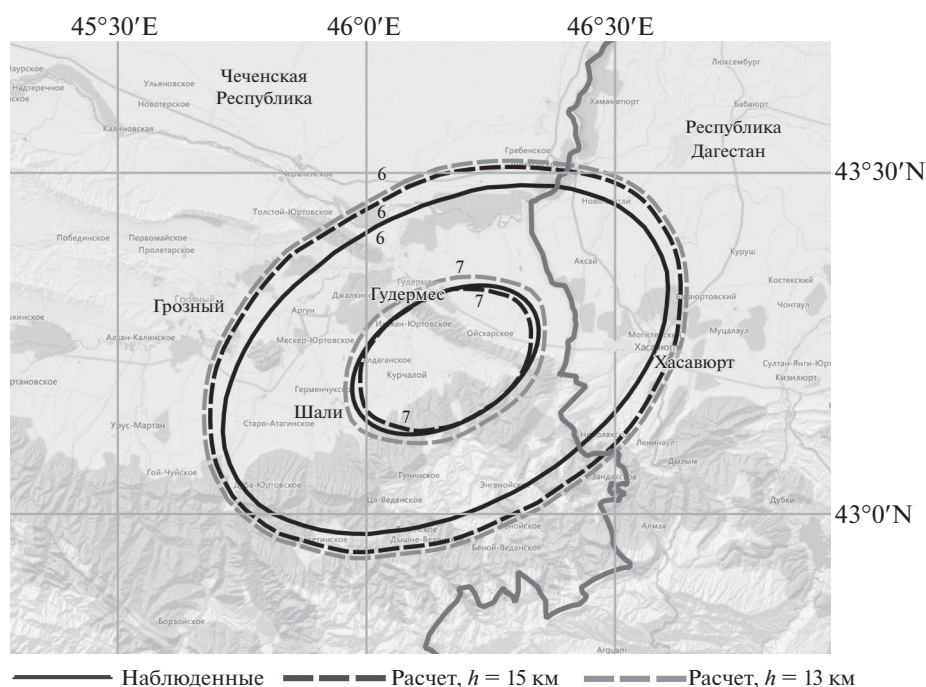


Рис. 12. Сравнение расчетных и наблюдаемых изосейст землетрясения 11.10.2008 г.

согласуется с границами зон ВОЗ [15, 16, 26] и результатами И.В. Ананьина по выделению сейсмогенных зон на Кавказе по коэффициентам затухания (см. рис. 3) [2].

В целом можно отметить, что откалиброванные коэффициенты уравнения макросейсмического поля для восточной зоны Северного Кавказа и коэффициенты, предложенные Н.В. Шебалиным для Дагестана, а также полученные в настоящем исследовании новые коэффициенты для южной территории ЧР (см. табл. 2, варианты 2, 3, 8, 14), могут успешно применяться для оперативной оценки последствий землетрясений на территории ЧР и Республики Дагестан (см. рис. 9).

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ВОСТОЧНОЙ ЗОНЕ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА

Эффективность использования откалиброванных параметров поля может быть продемонстрирована сравнением расчетных и наблюда-

емых изосейст 6 и 7 баллов на примере Курчалойского землетрясения 11.10.2008 г. с $M_s = 5.6$ (рис. 12). Наблюдаемое поле областей, охваченных 6- и 7-балльными изосейстами, имеет более сложную конфигурацию, чем расчетное, однако населенные пункты с наибольшей численностью населения в том и другом случае находятся в зонах одинаковой балльности.

Погрешности в определении расчетных интенсивностей с помощью системы “Экстремум” для Курчалойского землетрясения, вычисленные как процентное отношение разности площадей к общей площади участков, ограниченных изосейстами 6 и 7 баллов при разных глубинах очага $h = 13$ и $h = 15$ км, варьируют от 9 до 29% [13].

Анализ табл. 3 и полученные оценки погрешностей в определении интенсивности показывают достаточно хорошую сходимость наблюдаемого эффекта и результатов моделирования последствий землетрясения. Что позволяет сделать вывод об эффективности калибровки моделей макросейсмического поля системы “Экстремум”. Это дает уверенность в получении своевременной

Таблица 3. Площади расчетных и наблюдаемых изосейст 6 и 7 баллов

	I , балл	Площадь, км ²	ΔS , %	I , балл	Площадь, км ²	ΔS , %
$\varphi = 43.20^\circ$; $\lambda = 46.14^\circ$; $M_s = 5.6$; $h = 13$ км	7	677.9	26.6	6	3843.7	28.6
$\varphi = 43.20^\circ$; $\lambda = 46.14^\circ$; $M_s = 5.6$; $h = 15$ км		488.0	8.9		3620.7	21.1
Наблюдаемые		535.4			2989.9	

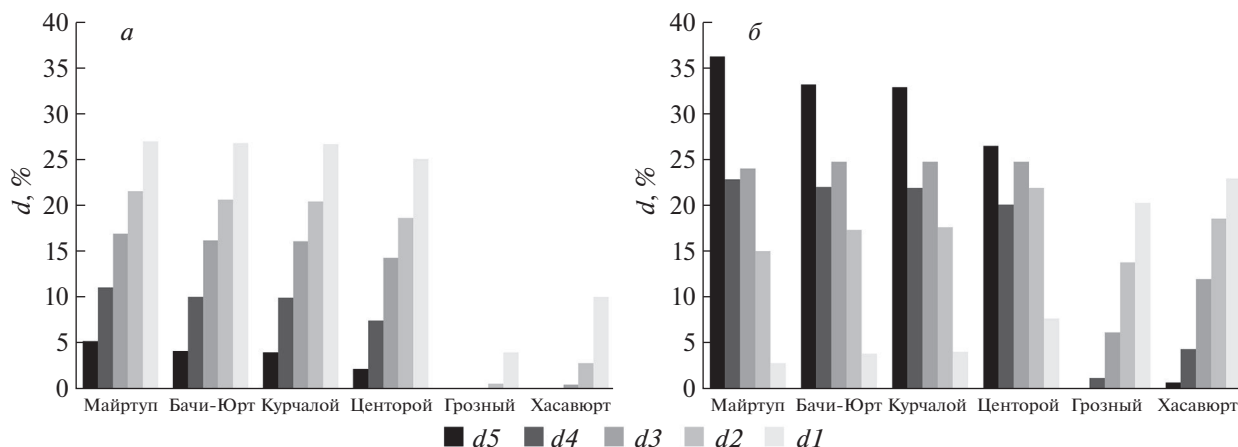


Рис. 13. Распределение степеней повреждений застройки в случае землетрясения с $M_s = 5.6$, $h = 13$ км (а) и $M_s = 6.3$, $h = 13$ км (б).

правильной оперативной оценки последствий, что сократит время принятия решения о реагировании и оказании помощи, а в случае заблаговременных оценок потерь от возможных опасных событий подготовить план превентивных мероприятий для минимизации негативных последствий.

С учетом уточненных оценок Е.А. Рогожина [25] о M_{\max} для зоны, где произошло Курчалойское землетрясение (11 октября 2008 г.), возможны события с магнитудой $M_s = 6.3$, соответствующей максимальной магнитуде в рассматриваемой зоне ВОЗ. Сравнительные расчеты последствий, выполненные с помощью системы “Экстремум” для землетрясений с координатами Курчалойского землетрясения и магнитудами $M_s = 5.6$ и $M_s = 6.3$, показывают увеличение числа населенных пунктов с сильными повреждениями и обрушениями в случае возможного события с $M_s = 6.3$. Большое количество населенных пунктов может получить тяжелую среднюю степень повреждения застройки (d_4) и полное обрушение (d_5). В населенных пунктах Майртуп, Бачи Юрт, Курчалой, Центрой процент зданий, которые могут

быть полностью разрушены (d_5), увеличивается с 2 до 35% (рис. 13).

Эффективность использования откалиброванных квазистабильных параметров макросейсмического поля подтверждается и ретроспективными расчетами последствий с помощью системы “Экстремум” для Дагестанского землетрясения 14.05.1970 г. с $M_s = 6.6$. Площади расчетных изосейст достаточно хорошо согласуются с оценками наблюдаемого эффекта по публикациям [8, 9, 37] (табл. 4).

На рис. 14 приводится сравнение расчетных (для двух глубин очага 13 и 16 км) и наблюдаемых изосейст 7 и 8 баллов. Наблюдаемое поле областей, оконтуренных 7- и 8-балльными изосейстами, также имеет более сложную конфигурацию, чем расчетное, однако населенные пункты с наибольшей численностью населения, в том и другом случае находятся в зонах одинаковой балльности. Погрешности, вычисленные как процентное отношение разности площадей к общей площади участков, ограниченных изосейстами 7 и 8 баллов при разных глубинах очага 13 и 16 км, и наблюдаемыми, варьируют от 5 до 30%.

Таблица 4. Площади расчетных и наблюдаемых изосейст 8 и 7 баллов

Изосейста	Площадь, км ²
Наблюденная 8 балльная	1005
Расчетная 8 балльная при $h = 13$ км	1055
Расчетная 8 балльная при $h = 16$ км	830
Наблюденная 7 балльная	4000
Расчетная 7 балльная при $h = 13$ км	5200
Расчетная 7 балльная при $h = 16$ км	4700

Результаты ретроспективного моделирования возможных последствий на случай повторения землетрясения 14.05.1970 г. с параметрами очага по [37]: 43.0°N ; 47.09°E ; $M_s = 6.6$; $h = 13$ км и $h = 16$ км, приведены в табл. 5 и на рис. 15. Для наиболее крупных городов и населенных пунктов в эпицентральной области показано распределение вероятностей разных степеней повреждений в случае повторения события с разными глубинами очага.

В случае повторения Черногорского землетрясения 28.07.1976 г. в ЧР расчетные показатели последствий зависят как от используемых коэффициентов уравнения макросейсмического поля,

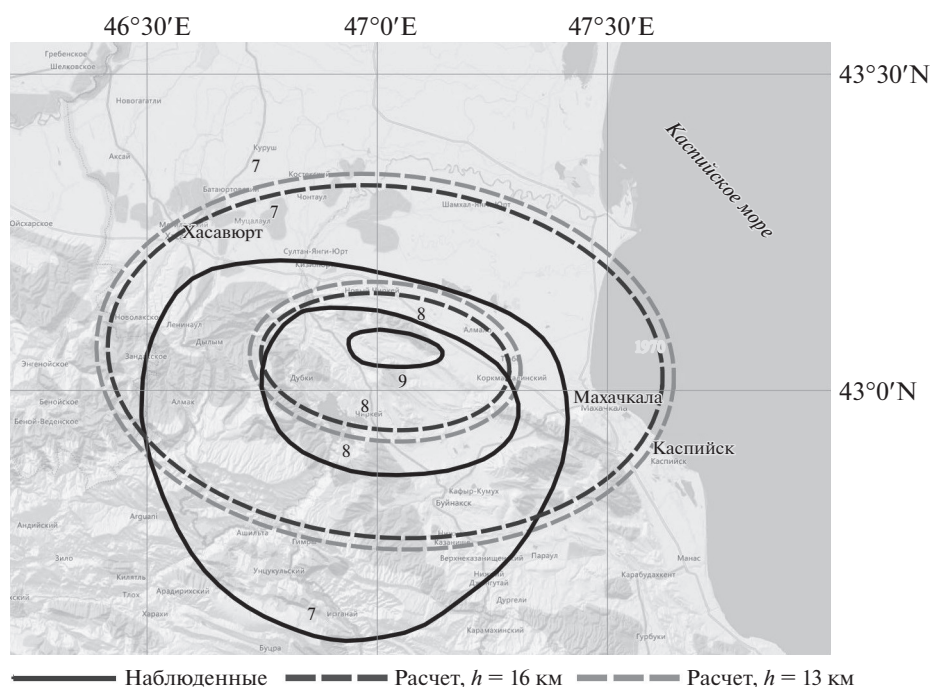


Рис. 14. Сравнение расчетных и наблюдаемых значений сейсмической интенсивности землетрясения 14.05.1970 г. в Республике Дагестан.

так и от параметров события. На рис. 16 приведены результаты последствий землетрясения с $M = 6.4$, рассчитанные с помощью системы “Экстремум” для разных глубин очага и координат эпицентра (см. варианты 7 и 14, табл. 2).

На рис. 17 приведено возможное распределение степеней повреждений застройки в наиболее пострадавших населенных пунктах в случае повторения Черногорского землетрясения 28 июля

1976 г. с $M_s = 6.4$ с разными глубинами очага и координатами эпицентра согласно вариантам 7 и 14 (см. табл. 2).

ДИСКУССИЯ

Основываясь на оценках M_{\max} по внерегиональному сейсмотектоническому методу и близости дизъюнктивного узла с $M_{\max} = 7.1$ к исследуе-

Таблица 5. Расчетная вероятность степеней повреждения застройки на случай повторения землетрясения 14.05.1970 г.

Город	Вероятность степеней повреждения при $h = 16$ и 13 км					$d_{\text{среднее}}$ $h = 16/13$ км
	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	
Махачкала	0.251/0.249	0.216/0.221	0.173/0.181	0.098/0.109	0.034/0.043	1.7/1.9
Буйнакск	0.247/0.240	0.227/0.232	0.189/0.197	0.121/0.134	0.053/0.068	2.0/2.2
Чиркей	0.105/0.047	0.235/0.185	0.237/0.246	0.187/0.211	0.220/0.307	3.0/3.5
Каспийск	0.221/0.224	0.177/0.181	0.108/0.115	0.036/0.004	0.006/0.007	1.0/1.1
Кизилюрт	0.241/0.245	0.201/0.206	0.145/0.156	0.067/0.077	0.016/0.021	1.4/1.5
Хасавюрт	0.202/0.204	0.140/0.145	0.066/0.007	0.014/0.015	0/0	0.7/0.8
Новый Чиркей	0.268/0.262	0.218/0.229	0.171/0.180	0.114/0.125	0.056/0.072	2.0/2.1
Дылым	0.241/0.249	0.180/0.186	0.132/0.143	0.066/0.075	0.017/0.023	1.3/1.5
Сулак	0.173/0.175	0.121/0.124	0.056/0.006	0.012/0.013	0/0	0.6/0.7

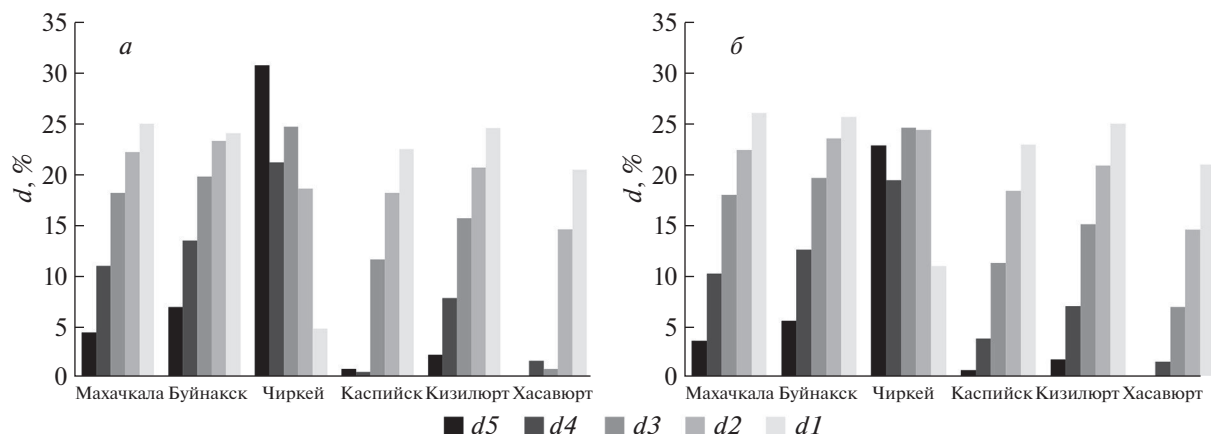


Рис. 15. Распределение степеней повреждений в случае повторения события 14.05.1970 г. с $h = 13$ км (а) и $h = 16$ км (б).

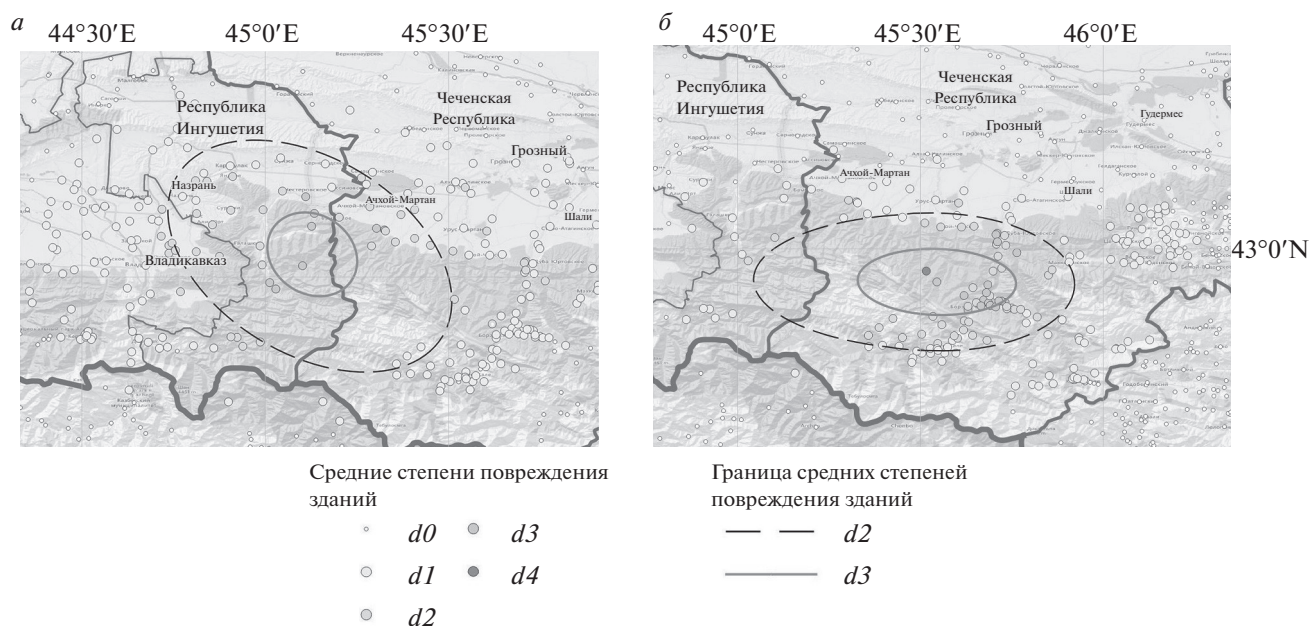


Рис. 16. Результаты моделирования последствий на случай повторения Черногорского землетрясения 28.07.1976 г. в Чеченской Республике: а – $h = 25$ км (вариант 7, табл. 2); б – $h = 16$ км (вариант 14, табл. 2).

мой зоне Черногорского землетрясения 28.07.1976 г. [39], а также на предположении, что характер реализации сейсмичности в последующие годы в близлежащем блоке не характеризовал предельно возможную магнитуду в очаге Черногорского землетрясения, как это было отмечено для Дагестанского землетрясения 14.05.1970 г. [4], проведем расчеты последствий при допущении, что такая магнитуда может реализоваться в этом дизъюнктивном узле. Заметим, что очаг может равновероятно иметь глубину 25 или 16 км. Задавая положение очага в двух вариантах: опубликованном в [21] и в виде макросейсмического

очага, полученного авторами по центру наиболее уверенно построенной 6-балльной изосейсты, получим следующие результаты (рис. 18, 19).

Негативный эффект от возможного события с $M = 7.1$ зависит как от глубины очага, так и от его местоположения, так как при расчетах макросейсмическое поле ориентируется вдоль ближайшего разлома. В случае реализации события с координатами по Дагестанскому каталогу и при глубине $h = 25$ км интенсивность в эпицентральной зоне может варьировать от 8 до 9 баллов (см. рис. 18а), в случае макросейсмического эпицентра по 6-й изосейсте и при глубине 16 км интен-

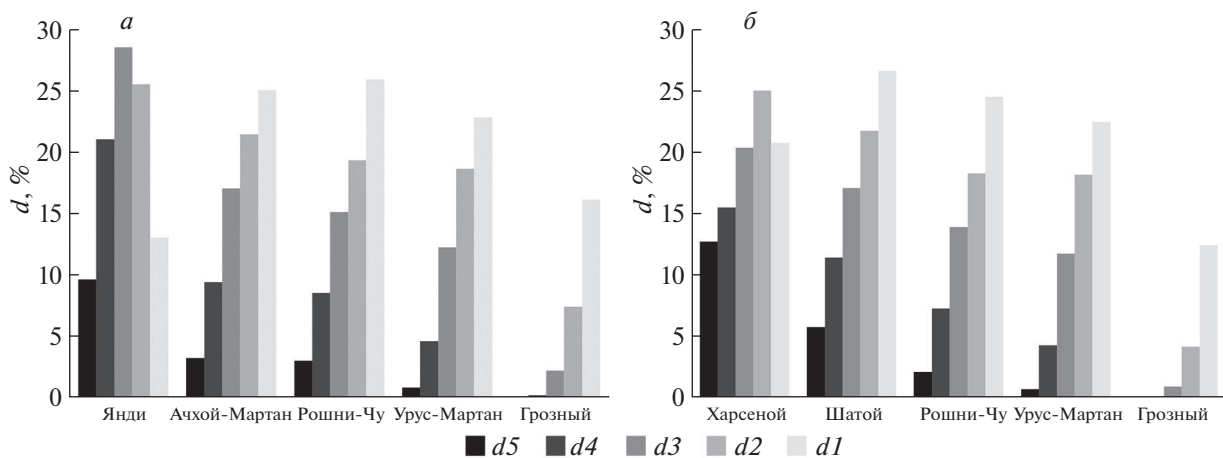


Рис. 17. Распределение степеней повреждений застройки в случае повторения Черногорского землетрясения 28.07.1976 г.: а – вариант 7, табл. 2; б – вариант 14, табл. 2.

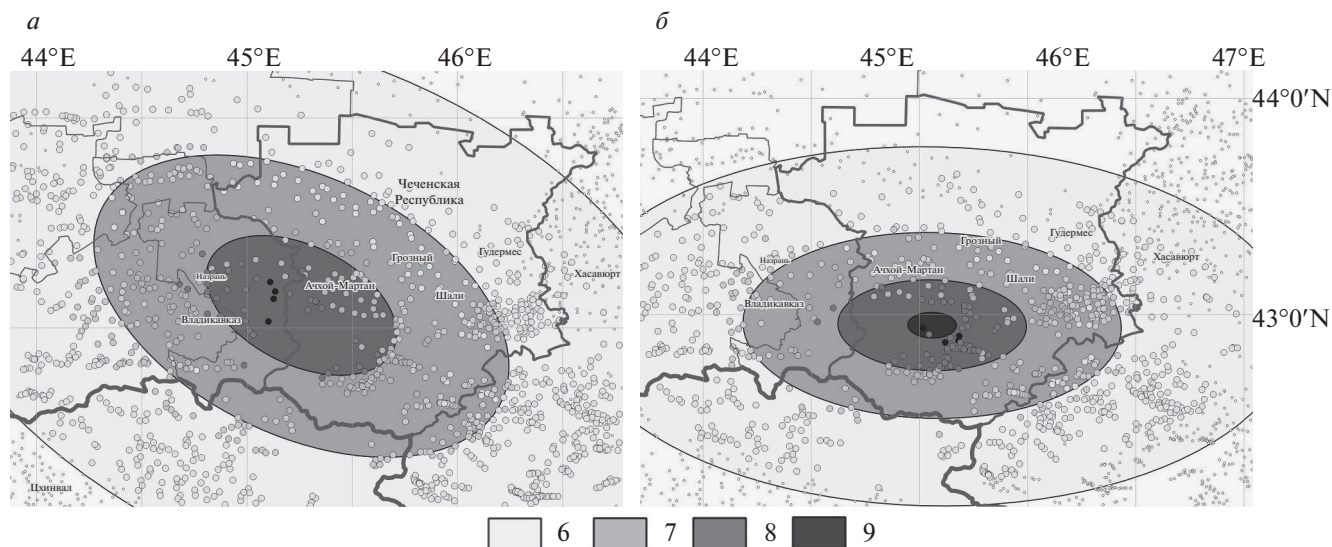


Рис. 18. Расчетные изосейсты сценарийных событий с магнитудой $M=7.1$: а – вариант 7а; б – вариант 14а (см. табл. 2).

сивность в эпицентральной зоне может превышать 9 баллов (см. рис. 18б).

Наиболее тяжелые повреждения ($d3$ и $d4$) вплоть до полного обрушения ($d5$) может получить застройка населенных пунктов Янди, Чожи-Чу, Бамут, Шалажи, Ачхой-Мартан в случае сценарийного землетрясения с координатами по варианту 7а и с $M=7.1$ (табл. 6). В случае события с координатами по варианту 14а и с той же магнитудой наибольшие повреждения возможны в населенных пунктах Харсеной, Ушкалой, Шатой, Янди (см. табл. 6).

Наглядное представление повреждений строений третьей степени в леспромхозе Чожи-Чу, где отмечались 8 (8–9) балльные сотрясения от Чер-

ногорского землетрясения 1976 г., дается в статье [14]. Отмечается, что в момент землетрясения “кирпичные дома в поселке были сравнительно новые, на хорошем фундаменте с кирпичным цоколем. Из наружных разрушений наиболее существенными были: отход на 5–6 см капитальной стены, сквозные трещины в несущей конструкции, вывал карниза с обеих сторон здания, развал труб и др. Внутри зданий отмечено обрушение кирпичных перегородок, развал печей, сквозные и несквозные трещины. В деревянных (каркасных) строениях отмечены такие повреждения: перекося каркаса здания и провал потолка, сквозные вертикальные трещины по центру здания вдоль сочленения конструкций, разрушение кирпичных печей, сдвигание их основания, провал печных труб. Характерная особенность проявления

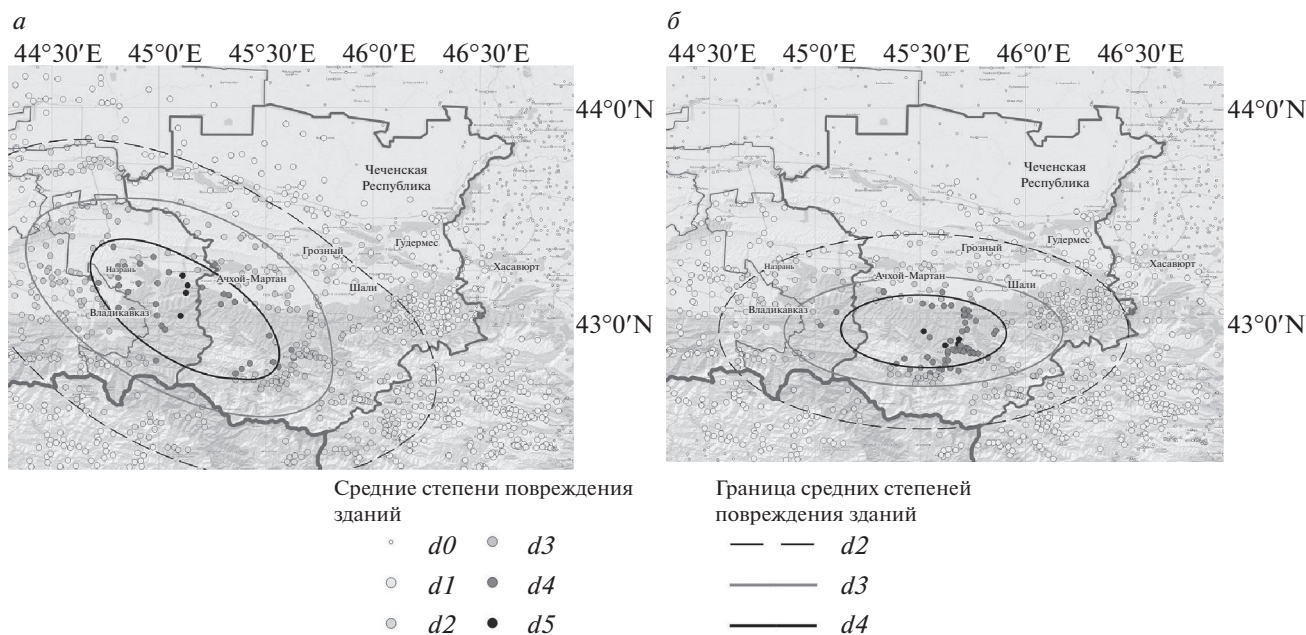


Рис. 19. Распределение ущерба от сценарийных событий магнитудой $M = 7.1$: а – вариант 7а; б – вариант 14а (см. табл. 2).

землетрясения в п. Чожи-Чу и других близлежащих населенных пунктах – повсеместное скручивание и изгиб телевизионных антенн с отрывом растяжек”.

Анализ результатов моделирования показывает, что при более сильном возможном событии в восточной зоне Северного Кавказа с $M = 7.1$ значительно ухудшается картина с разрушениями и

Таблица 6. Расчетная вероятность степеней повреждения застройки на случай сценарийного землетрясения с координатами Черногорского землетрясения 28.07.1976 г. по вариантам 7а и 14а (см. табл. 2) с $M = 7.1$

Город	Вероятность степеней повреждения при сценарийных событиях по вариантам 7а/14а с $M = 7.1$					$d_{\text{среднее}}$, вариант 7а/вариант 14а
	d1	d2	d3	d4	d4	
Янди	0.0/0.0	0.0/0.2	0.1/0.3	0.2/0.3	0.6/0.3	4.4/3.6
Чожи-Чу	0.0/0.2	0.1/0.3	0.2/0.2	0.2/0.2	0.4/0.2	3.8/2.9
Бамут	0.0/0.2	0.1/0.2	0.2/0.2	0.2/0.1	0.4/0.1	3.8/2.1
Шалажи	0.0/0.1	0.2/0.2	0.2/0.2	0.2/0.2	0.3/0.2	3.7/3.0
Ачхой-Мартан	0.1/0.2	0.2/0.2	0.2/0.2	0.2/0.1	0.3/0.1	3.6/2.1
Рошни-Чу	0.1/0.1	0.2/0.2	0.2/0.2	0.2/0.2	0.3/0.3	3.4/3.3
Ушкалой	0.1/0	0.2/0.1	0.3/0.2	0.3/0.3	0.2/0.4	3.4/3.9
Орджоникидзевская	0.1/0.3	0.2/0.2	0.3/0.1	0.3/0.0	0.2/0.0	3.2/1.2
Харсеной	0.1/0.0	0.2/0.1	0.2/0.2	0.2/0.2	0.2/0.5	3.1/4.2
Урус-Мартан	0.1/0.1	0.2/0.2	0.2/0.2	0.2/0.2	0.2/0.2	3.0/3.0
Гехи	0.1/0.2	0.2/0.2	0.2/0.2	0.2/0.2	0.2/0.1	3.0/2.5
Владикавказ	0.1/0.3	0.3/0.3	0.3/0.2	0.2/0.1	0.1/0.0	2.8/1.8
Назрань	0.1/0.3	0.2/0.2	0.3/0.1	0.2/0.0	0.1/0.0	2.8/1.1
Шатой	0.2/0.0	0.3/0.1	0.2/0.2	0.2/0.2	0.1/0.4	2.5/3.8
Грозный	0.3/0.2	0.2/0.2	0.2/0.1	0.1/0.1	0.0/0.0	1.7/1.3

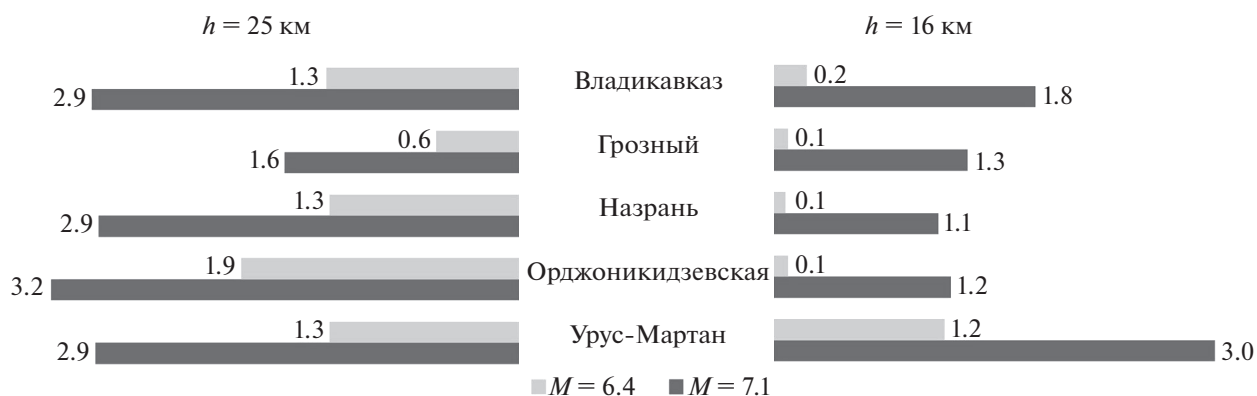


Рис. 20. Средние степени повреждения зданий для наиболее крупных городов региона в случае сценарийных событий по вариантам 7, 14 с $M = 6.4$ и 7а, 14а с $M = 7.1$ (см. табл. 2).

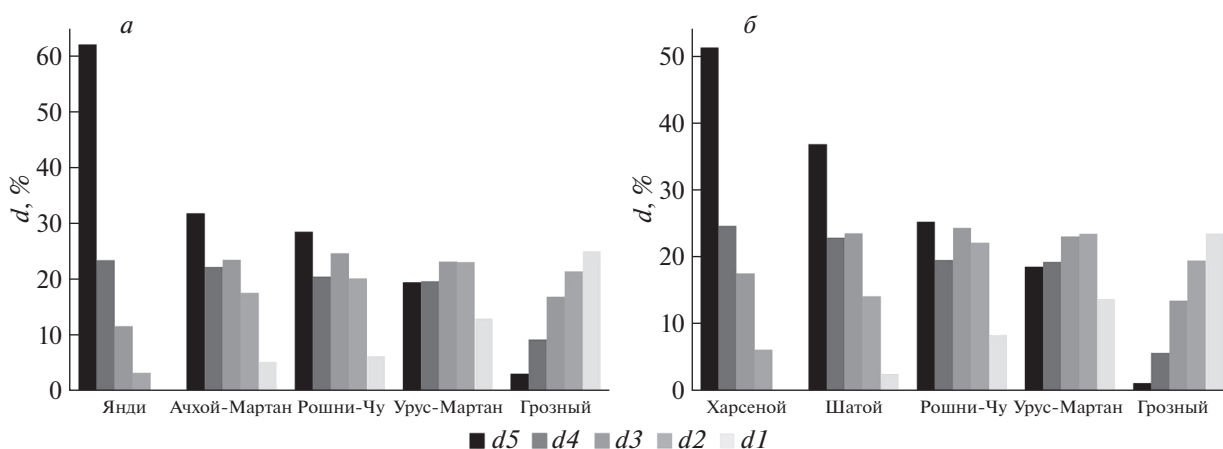


Рис. 21. Распределение степеней повреждений застройки в случае сценарийного события с $M = 7.1$ и координатами Черногорского землетрясения 28.07.1976 г.: а – вариант 7а, б – вариант 14а (см. табл. 2).

повреждениями (см. рис. 19) по сравнению с событием с $M = 6.4$ (см. рис. 16). Во время события с $M = 7.1$ и координатами по варианту 7а (см. табл. 2) в среднем застройка в крупных городах Владикавказ, Назрань, Орджоникидзевская, Урус-Мартан может получить тяжелые повреждения $d3$ (рис. 20).

При этом в отдельных населенных пунктах в ближней зоне возможного землетрясения с $M = 7.1$ до 50% застройки могут быть полностью разрушены (рис. 21).

ВЫВОДЫ

В статье подтверждены целесообразность и эффективность калибровки моделей системы “Экстремум” для оперативной и заблаговременной оценки потерь от землетрясений.

Проведенные дополнительные исследования сеймотектонической обстановки рассматриваемого региона и анализ наблюдаемых и расчетных

значений сейсмической интенсивности, полученных с помощью системы “Экстремум”, позволили расширить границы выделенной в 2019 г. зоны с квазистабильными параметрами макросейсмического поля в восточной зоне Северного Кавказа. При исследовании производилось сравнение наборов основных параметров землетрясений и параметров макросейсмического поля, полученных различными центрами и авторами ранее, производились учет направленности излучения и выбор действующего сейсмогенного разлома земной коры.

Приведены примеры успешного использования результатов калибровки макросейсмического поля для восточной зоны Северного Кавказа. Даны описание ретроспективной оценки последствий Дагестанского землетрясения 14.05.1970 г., Черногорского землетрясения 28.07.1976 г. и Курчалойского землетрясения 11.10.2008 г., а также прогноз последствий в случае более сильных событий в этих эпицентральных зонах.

Погрешности моделирования сейсмической интенсивности, оцененные как отношение площадей, ограниченных расчетными и наблюдаемыми изосейстами одинаковой балльности, не превышают 30%. Этот показатель является приемлемой характеристикой погрешности, обеспечивающей качественную работу при оперативном планировании спасательных операций и планировании превентивных мероприятий на случай сильного события.

Полученные результаты калибровки дополнили Базу данных, используемую для эффективной оперативной оценки последствий землетрясений, и будут применяться системой “Экстремум” при возникновении разрушительных землетрясений в районе востока Северного Кавказа, включающего территории Чеченской Республики и Республики Дагестан.

БЛАГОДАРНОСТИ

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”, государственного задания ФИЦ ЕГС РАН № 075-01471-22.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абелев Е.Г., Антонов В.В., Габсатарова И.П., Захарова А.И., и др.* Землетрясение 4 марта на Северном Кавказе // Землетрясения в СССР в 1984 году. М.: Наука, 1987. С. 35–44.
2. *Ананьин И.В.* Аргунское землетрясение 2 марта 1966 г. // Землетрясения в СССР в 1966 году. М.: Наука, 1970. С. 35–43.
3. *Ананьин И.В.* Сейсмичность Северного Кавказа. М.: Наука, 1977. 149 с.
4. *Асманов О.А., Гамидова А.М., Мусалаева З.А., Алисултанова Г.С.* Каталог афтершоков Черногорского землетрясения 28 июля 1976 года в Чечено-Ингушетии // Геодинамика и сейсмичность территории Дагестана / Отв. ред. Г.И. Дейнега. Махачкала: Даг. фил. АН СССР, Ин-т геологии, 1979. № 3 (21). С. 56–62.
5. *Арефьев С.С.* Эпицентральные сейсмологические исследования. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2003. С. 47, 49, 349.
6. *Богачкин Б.М., Габсатарова И.П., Захарова А.И., Лякумович Б.Я., и др.* Землетрясение 3 августа 1989 года на Северном Кавказе // Землетрясения в СССР в 1989 году. М.: Наука, 1993. С. 32–44.
7. *Борисов Б.А., Рейснер Г.И.* О геологической обстановке Чечено-Ингушского землетрясения 1976 г. // Бюл. МОИП. Отд. Геол, 1977. (4), 78.
8. *Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г.* Сейсмология, геология, геофизика. М.: Наука, 1980. 220 с.
9. *Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г.* Разрушительные последствия, инженерная сейсмология, вопросы сейсмостойкого строительства. М.: Наука, 1981. 256 с.
10. *Кондорская Н.В., Горбунова И.В., Киреев И.А., Вандышева Н.В.* Унифицированный каталог землетрясений Северной Евразии с древнейших времен до 1995 г. URL: <http://www.scgis.ru> System of data bases. IJPE RAS, 1996.
11. *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.
12. *Ларионов В.И., Фролова Н.И.* Общая методология оценки рисков // Энциклопедия безопасности: строительство, промышленность, экология: в 3 т. Т. 1: Аварийный риск. Взрывные и ударные воздействия / [Котляревский В.А., Ларионов В.И., Суцев С.П.]. М.: Наука, 2005. С. 2–34.
13. *Ларионов В.И., Фролова Н.И., Угаров А.Н., Габсатарова И.П. и др.* Повышение надежности оперативных оценок потерь от землетрясений на территории Чеченской Республики // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Т. X. Часть 2 / Науч. ред. А.О. Глико, И.А. Керимов. М.: ИИЕТ РАН, 2020. С. 145–155.
14. *Левкович Р.А., Крамынин П.И., Дейнега А.Г., Арефьев С.С.* Некоторые результаты эпицентральных наблюдений Черногорского землетрясения 28 июля 1976 года // Геодинамика и сейсмичность территории Дагестана / Отв. ред. Г.И. Дейнега. Махачкала: Даг. фил. АН СССР, Ин-т геологии, 1979. № 3 (21). С. 63–86.
15. *Несмеянов С.А., Лутиков А.И., Аверьянова В.Н., Габсатарова И.П. и др.* Макросейсмическое поле, основные зоны ВОЗ и сейсмическая сотрясаемость // Комплексная оценка сейсмической опасности территории г. Грозного. М.: Минстрой России, 1996. С. 48–56.
16. *Несмеянов С.А., Воейкова О.А., Никитин М.Ю., Рогожин Е.А., Серебрякова Л.И.* Тектонические условия региона г. Грозного // Комплексная оценка сейсмической опасности территории г. Грозного. М.: Минстрой России, 1996. С. 5–22.
17. *Никонов А.А.* Сильнейшие землетрясения Восточного Кавказа с точки зрения геодинамики // Геодинамика Кавказа: сб. науч. тр. / Отв. ред. АА Белов, М.А. Сатиан. М.: Наука, 1989. С. 148–156.

18. *Никонов А.А.* Определение диспозиции и масштабно-сти очаговых разломов сильнейших землетрясений Восточного Кавказа с VIII в.н.э. по характеристикам высшей изосейсты макросейсмического поля // Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ: тез. докл. Врос. сов. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2021. С. 199–200.
19. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Под ред. Н.В. Кондорской, Н.В. Шебалина. М.: Наука, 1977. 506 с.
20. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации ОСР-2016. Пояснительная записка к комплекту карт ОСР-2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных зонах // Инженерные изыскания. 2016. № 7. С. 49–121.
21. Общий каталог землетрясений на территории Дагестана. Макросейсмические и инструментальные данные о землетрясениях за период с VII в.н.э. до 2005 года. Махачкала: Эпоха, 2007. 394 с.
22. *Петрова Н.В., Дягилев Р.А., Габсатарова И.П.* Особенности затухания сейсмического эффекта землетрясений Русской платформы и Урала // Вопросы инженерной сейсмологии. 2020. Т. 47. № 4. С. 5–25.
23. *Рейснер Г.И., Иогансон Л.И., Рейснер М.Г., Баранов Ю.Е.* Типизация земной коры и современные геологические процессы. М.: ИФЗ РАН, 1993. 208 с.
24. *Рогожин Е.А.* Современная геодинамика и потенциальные очаги землетрясений Кавказского региона // Современные математические и геологические модели природной среды. М.: ОИФЗ РАН, 2002. С. 244–254.
25. *Рогожин Е.А., Лутиков А.И., Овсяченко А.Н.* Оценка сейсмической опасности Северного Кавказа в детальном масштабе // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2013. № 5. С. 14–19.
26. *Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Лутиков А.И., Собищев А.Л., и др.* Эндогенные опасности Большого Кавказа. М.: ИФЗ РАН, 2014. 256 с.
27. *Смирнова М.И., Рустанович Д.Н., Санаев О.А.* Ачхой-Мартановское землетрясение 17 (18) июня 1969 г. // Землетрясения СССР в 1969 году. М. Наука, 1973. С. 29–32.
28. Специализированный каталог землетрясений для задач общего сейсмического районирования территории Российской Федерации / Отв. ред. В.И. Уломов, URL: <http://seismos-u.ifz.ru/documents/Eartquake-Catalog.pdf>.
29. *Уломов В.И., Шумилиа Л.С.* Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1:8000000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ РАН, 1999. 57 с.
30. *Уломов В.И., Богданов М.И., Пустовитенко Б.Г., Перетокин С.А. и др.* Анализ сейсмической опасности Крыма и Северного Кавказа и адаптация полученных оценок к комплекту карт ОСР-2014 // Инженерные изыскания. 2015. № 13. С. 12–27.
31. *Фролова Н.И., Угаров А.Н.* База знаний о сильных землетрясениях как инструмент повышения надежности оперативных оценок потерь // Геоэкология. 2018. № 6. С. 1–18. <https://doi.org/10.1134/S0869780318060017>
32. *Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Угаров А.Н., Малаева Н.С.* Использование макросейсмических данных для повышения надежности оперативных оценок потерь на примере землетрясений стран СНГ // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: матер. XIII Междунар. сейсмол. школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. С. 292–297.
33. *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. <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019523-37>
34. *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. <https://doi.org/10.31857/S0869780920050033>
35. *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>
36. *Шебалин Н.В.* Методы использования инженерно-сейсмологических данных при сейсмическом районировании // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 95–121.
37. *Шебалин Н.В., Крестников В.Н., Рустанович Д.Н., Штейнберг В.В., и др.* Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г. // Землетрясения в СССР в 1970 году. М: Наука, 1974. С. 28–49.
38. *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.
39. *Шолто В.Н., Рейснер Г.И., Рогожин Е.А.* Идеи академика Гамбурцева в сеймотектонике // Физика Земли. 2004. № 5. С. 68–79.
40. Global CMT Catalog <https://www.globalcmt.org>

CALIBRATING THE “EXTREMUM” SYSTEM MODEL FOR EARTHQUAKE LOSS ASSESSMENT IN THE EASTERN ZONE OF THE NORTHERN CAUCASUS

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

^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, Lenina av., 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: ira@gsras.ru*

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

This research is aimed at the calibration of the “Extremum” system models used to simulate possible loss due to strong earthquakes. The parameters of the macroseismic field in the eastern zone of the Northern Caucasus are investigated based on the data set of earthquakes which have occurred there since the early 20th century. The study area is located around the northern structures of the Greater Caucasus and the Terek-Caspian trough. It is an area of high seismicity, part of the Chechen Republic and the Republic of Dagestan. It is known to have produced earthquakes of $M = 6.2-6.4$ in 1976 and of $M = 5.0-5.3$ in 1966, 1969 and 1984. The present study made it possible to expand the boundaries of the zone with “quasi-stable” parameters of the macroseismic field identified in 2019 in the eastern Caucasus. The zone mostly covered the source zone of the 1970 Dagestan earthquake and its immediate surroundings, and was afterwards extended to include the epicentral zone of the 2008 Kurchaloy earthquake. We compared the sets of basic earthquake parameters determined by different seismological agencies and coefficients of the macroseismic field equation obtained earlier by various authors, taking into account the direction of felt-effect propagation and the location of the active seismogenic faults in the crust. The observed values of seismic intensity and those computed using the “Extremum” system were compared. The calibration results complemented many sets of calibration data used for effective near real time earthquake loss assessment. They are recommended to be used in the “Extremum” system for assessing the parameters of emergency situations in the zones affected by destructive earthquakes in the republics of the North Caucasus (Chechen and Dagestan).

Keywords: *near real time earthquake loss estimates, macroseismic-field model calibration, Vladikavkaz fault, earthquake source zones, quasi-stable parameters, the “Extremum” system*

REFERENCES

1. Abelev E.G., Antonov V.V., Gabsatarova I.P., Zakharova, A.I. et al. *Zemletryasenie 4 marta na Severnom Kavkaze* [March 4 earthquake in the North Caucasus]. *Zemletryaseniya v SSSR v 1984 godu* [Earthquakes in the USSR in 1984]. Moscow, Nauka Publ., 1987, pp. 35–44. (in Russian)
2. Anan'in I.V. *Argunskoe zemletryasenie 2 marta 1966 g.* [Argun earthquake on March 2, 1966]. *Zemletryaseniya v SSSR v 1966 godu* [Earthquakes in the USSR in 1966]. Moscow, Nauka Publ., 1970, pp. 35–43. (in Russian)
3. Anan'in I.V. *Seismichnost' Severnogo Kavkaza* [Seismicity of the Northern Caucasus]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 149 p. (in Russian)
4. Asmanov O.A., Gamidova A.M., Musalaeva Z.A., Alisultanova G.S. *Katalog aftershokov Chernogorskogo zemletryaseniya 28 iyulya 1976 goda v Checheno-Ingushetii* [Catalog of aftershocks of the Chernogorsk earthquake on July 28, 1976 in Checheno-Ingushetia]. *Geodinamika i seismichnost' territorii Dagestana* [Geodynamics and seismicity of the territory of Dagestan]. G.I. Deinega, Ed., Makhachkala, Dag. FAN USSR, Institute of Geology Publ., 1979, no. 3 (21), pp. 56–62. (in Russian)
5. Aref'ev S.S. *Epitsentral'nye seismologicheskie issledovaniya*. [Epicentral seismological studies]. Moscow, ICC “Akademkniga” Publ., 2003, pp. 47, 49, 349. (in Russian)
6. Bogachkin B.M., Gabsatarova I.P., Zakharova A.I., Lyakumovich B.Ya. et al. *Zemletryasenie 3 avgusta 1989 goda na Severnom Kavkaze*. [Earthquake on August 3, 1989 in the North Caucasus]. *Zemletryaseniya v SSSR v 1989 godu* [Earthquakes in the USSR in 1989]. Moscow, Nauka Publ., 1993, pp. 32–44. (in Russian)
7. Borisov B.A., Reisner G.I. On the geological setting of the Chechen-Ingush earthquake of 1976. *Bul. MOIP, otd. Geol.*, 1977, no. 4, p. 78. (in Russian)
8. *Dagestanskoe zemletryasenie 14 maya 1970 g. Seismologiya, geologiya, geofizika* [Dagestan earthquake on May 14, 1970. Seismology, Geology, Geophysics]. Moscow, Nauka Publ., 1980, 220 p. (in Russian)
9. *Dagestanskoe zemletryasenie 14 maya 1970 g. Razrushitel'nye posledstviya, inzhenernaya seismologiya, voprosy seismostoitkogo stroitel'stva* [Dagestan earthquake on May 14, 1970. Destructive consequences, engineering seismology. Question of Engineering Seismology]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 256 p. (in Russian)
10. Kondorskaya N.V., Gorbunova I.V., Kireev I.A., Vandyшева N.V. *Unifitsirovannyi katalog zemletryaseni Severnoi Evrazii s drevneishikh vremen do 1995 g.* [Unified catalog of earthquakes in Northern Eurasia from ancient times to 1995]. JIPE RAS Publ., 1996. (in Russian)

- sian) Available at: <http://www.scgis.ru> System of data bases.
11. Larionov V.I., Sushchev S.P., Ugarov A.N., Frolova N.I. *Otsenka seismicheskogo riska s primeneniem GIS-tehnologii* [Seismic risk assessment using GIS technologies]. *Prirodnye opasnosti Rossii. T. 6: Otsenka i upravlenie prirodnyimi riskami*. [Natural hazards in Russia. Vol. 6: Assessment and management of natural risks]. A.L. Ragozin, Ed. Moscow, "KRUK" Publ., 2003. pp. 209–231. (in Russian)
 12. Larionov V.I., Frolova N.I. *Obshchaya metodologiya otsenki riskov* [General methodology for risk assessment]. *Entsiklopediya bezopasnosti: stroitel'stvo, promyshlennost', ekologiya. T. 1: Avariyniy risk. Vzryvnye i udarnye vozdeistviya* [Encyclopedia of safety: construction, industry, ecology: Vol. 1: Accident risk. Explosive and shock effects]. V.A. Kotlyarevsky, V.I. Larionov, S.P. Sushchev, Eds. Moscow, Nauka Publ., 2005. pp. 2–34. (in Russian)
 13. Larionov V.I., Frolova N.I., Ugarov A.N., Gabsatarova I.P. et al. *Povyshenie nadezhnosti operativnykh otsenok poter' ot zemletryaseniya na territorii Chechenskoi Respubliki*. [Increasing the reliability of near real time estimates of losses from earthquakes on the territory of the Chechen Republic]. *Sovremennyye problemy geologii, geofiziki i geoekologii Severnogo Kavkaza* [Modern problems of geology, geophysics and geocology of the North Caucasus. V.X. Part 2] A.O. Gliko, I.A. Kerimov, Eds. Moscow, IJET RAN Publ., 2020, pp. 145–155. (in Russian)
 14. Levkovich R.A., Kramynin P.I., Deinega A.G., Arefiev S.S. *Nekotorye rezul'taty epitsentral'nykh nablyudenii Chernogorskogo zemletryaseniya 28 iyulya 1976 goda* [Some results of epicentral observations of the Chernogorskoe earthquake on July 28, 1976]. *Geodinamika i seismichnost' territorii Dagestana*. G.I. Deinega Ed. Makhachkala, Dag. FAN USSR, Institute of Geology Publ., 1979, no. 3 (21), pp. 63–86. (in Russian)
 15. Nesmeyanov S.A., Lutikov A.I., Averyanova V.N., Gabsatarova I.P. et al. *Makroseismicheskoe pole, osnovnyye zony VOZ i seismicheskaya sotryasaemost'* [Macro-seismic field, main zones VOZ and seismic shaking]. *Kompleksnaya otsenka seismicheskoi opasnosti territorii g. Groznogo* [Complex assessment of the seismic hazard of the territory of Grozny City]. Moscow, Minstroj Rossii, 1996, pp. 48–56. (in Russian)
 16. Nesmeyanov S.A., Voeikova O.A., Nikitin M.Yu., Rogozhin E.A., Serebryakova, L.I. *Tektonicheskie usloviya regiona g. Groznogo* [Tectonic conditions of the Grozny City region]. *Kompleksnaya otsenka seismicheskoi opasnosti territorii g. Groznogo* [Complex assessment of the seismic hazard of the territory of Grozny City]. Moscow, Minstroj of Russia, 1996, pp. 5–22. (in Russian)
 17. Nikonov A.A. *Sil'neishie zemletryaseniya Vostochnogo Kavkaza s tochki zreniya geodinamiki* [The strongest earthquakes of the Eastern Caucasus from the point of view of geodynamics]. *Geodinamika Kavkaza* [Geodynamics of the Caucasus]. A.A. Belov, M.A. Satian, Eds. Moscow, Nauka Publ., 1989, pp. 148–156. (in Russian)
 18. Nikonov A.A. *Opredelenie dispozitsii i masshtabnosti ochagovykh razlomov sil'neishikh zemletryaseniya Vostochnogo Kavkaza s VIII v n.e. po kharakteristikam vysshei izoseisty makroseismicheskogo polya* [Determination of the disposition and scale of focal faults of the strongest earthquakes in the Eastern Caucasus since the 8th century AD according to the characteristics of the higher isoseism of the macroseismic field]. *Vros. sov. Irkutsk "Razlomoobrazovanie v litosfere i soputstvuyushchie processy: tektonofizicheskii analiz"* [Proc. of All-Russian conf. Irkutsk "Faulting in the lithosphere and related processes: tectonophysical analysis"]. IGU Publ., 2021, pp. 199–200. (in Russian)
 19. *Novyi katalog sil'nyh zemletryaseniya na territorii SSSR s drevneishih vremen do 1975 g.* [New Catalog of Strong Earthquakes in the USSR from ancient times till 1975]. N.V. Kondorskaya, N.V. Shebalin Eds. Moscow, Nauka Publ., 1977. 506 p. (in Russian)
 20. General seismic zoning of the territory of the Russian Federation OSR-2016. Explanatory note to the set of OSR-2016 maps and a list of settlements located in seismically active zones. *Inzhenernyye izyskaniya*, 2016, no. 7, pp. 49–121. (in Russian)
 21. *Obshchii katalog zemletryaseniya na territorii Dagestana. Makroseismicheskie i instrumental'nye dannyye o zemletryasenyah za period s VII v.n.e. do 2005 goda* [General catalog of earthquakes in the territory of Dagestan. Macro-seismic and instrumental data on earthquakes for the period from the 7th c. until 2005]. Makhachkala, Epokha Publ., 2007, 394 p. (in Russian)
 22. Petrova N.V., Dyagilev R.A., Gabsatarova I.P. *Osobennosti zatukhaniya seismicheskogo effekta zemletryaseniya Russkoi platformy i Urala* [Peculiarities of attenuation of the seismic effect of earthquakes in the Russian Platform and the Urals]. *Voprosy inzhenernoi seismologii*, 2020, vol. 47, no. 4, pp. 5–25. (in Russian)
 23. Reisner G.I., Ioganson L.I., Reisner M.G., Baranov Yu.E. *Tipizatsiya zemnoi kory i sovremennyye geologicheskie protsessy* [Typification of the Earth's crust and modern geological processes]. Moscow, IFZ RAN Publ., 1993, 208 pp. (in Russian)
 24. Rogozhin E.A. *Sovremennaya geodinamika i potencial'nye ochagi zemletryaseniya Kavkazskogo regiona* [Modern geodynamics and potential sources of earthquakes in the Caucasus region]. *Sovremennyye matematicheskie i geologicheskie modeli prirodnoi sredy*. [Modern mathematical and geological models of the natural environment]. Moscow, OIFZ RAN Publ., 2002, pp. 244–254. (in Russian)
 25. Rogozhin E.A., Lutikov A.I., Ovsyuchenko A.N. *Otsenka seismicheskoi opasnosti Severnogo Kavkaza v detal'nom masshtabe* [Assessment of the seismic hazard of the North Caucasus on a detailed scale]. *Seismostoi-koe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*, 2013, no. 5, pp. 14–19. (in Russian)
 26. Rogozhin E.A., Ovsyuchenko A.N., Lutikov A.I., Sobisevich A.L. et al. *Endogennyye opasnosti Bol'shogo Kavkaza* [Endogenous hazards of the Greater Caucasus]. Moscow, IFZ RAN Publ., 2014, 256 p. (in Russian)
 27. Smirnova M.I., Rustanovich D.N., Sanaev O.A. *Achkhoi-Martanovskoe zemletryasenie 17 (18) iyunya 1969 g.* [Achkhoi-Martan earthquake on June 17 (18), 1969]. *Zemletryaseniya SSSR v 1969 godu* [Earthquakes of the USSR in 1969]. Moscow, Nauka Publ., 1973, pp. 29–32. (in Russian)
 28. *Spetsializirovannyi katalog zemletryaseniya dlya zadach obshchego seismicheskogo raionirovaniya territorii Rossi-*

- iskoi Federatsii* [Specialized catalog of earthquakes for the tasks of general seismic zoning of the territory of the Russian Federation]. V.I. Ulomov, Ed. (in Russian). Available at: <http://seismos-u.ifz.ru/documents/Eartquake-Catalog.pdf>.
29. Ulomov V.I., Shumilina L.S. *Komplekt kart obshchego seismicheskogo raionirovaniya territorii Rossiiskoi Federatsii – OSR-97. Masshtab 1:8 000 000. Ob'yasnitel'naya zapiska i spisok gorodov i naselennykh punktov, raspolozhennykh v seismoopasnykh raionakh* [A set of maps of the general seismic zoning of the territory of the Russian Federation – OSR-97. Scale 1:8000000. Explanatory note and list of cities and towns located in earthquake-prone areas]. Moscow, OIFZ RAN Publ., 1999, 57 p. (in Russian)
 30. Ulomov V.I., Bogdanov M.I., Pustovitenko B.G., Peretokin S.A. et al. *Analiz seismicheskoi opasnosti Kryma i Severnogo Kavkaza i adaptatsiya poluchennykh otsenok k komplektu kart OSR-2014* [Seismic hazard analysis of the Crimea and the North Caucasus and adaptation of the obtained estimates to the set of OSR-2014 maps]. *Inzhenernye izyskaniya*, 2015, no. 13, pp. 12–27. (in Russian).
 31. Frolova N.I., Ugarov A.N. *Baza znaniy o sil'nykh zemletryasenyakh kak instrument povysheniya nadezhnosti operativnykh otsenok poter'* [Knowledge base about past earthquakes consequences as a tool to increase the reliability of near real time loss estimation]. *Geokologiya*, 2018, no. 6, pp. 1–18. DOI: 10.1134/S0869780318060017. (in Russian)
 32. Frolova N.I., Gabsatarova I.P., Ugarov A.N., Malaeva N.S. *Ispol'zovanie makroseismicheskikh dannykh dlya povysheniya nadezhnosti operativnykh otsenok poter' na primere zemletryaseni stran SNG* [Using macroseismic data to improve the reliability of near real time loss estimates on the example of earthquakes in the CIS countries]. *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh: mater. XIII Mezhdunar. seismol. shkoly* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data: Proc. XIII Intern. Seismol. Workshop]. A.A. Malovichko, Ed. Obninsk, FITs EGS RAN Publ., 2018, pp. 292–297. (in Russian)
 33. Frolova N.I., Gabsatarova I.P., Petrova N.V., Ugarov A.N., Malaeva N.S. *Vliyanie osobennostei zatukhaniya seismicheskoi intensivnosti na nadezhnost' operativnykh otsenok poter' ot zemletryaseni* [Influence of shaking intensity attenuation peculiarities on reliability of earthquake loss estimation in emergency mode]. *Geokologiya*, 2019, no. 5, pp. 23–37. <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019523-37> (in Russian)
 34. Frolova N.I., Gabsatarova I.P., Ugarov A.N., Malaeva N.S. *Kalibrovka modeli zatukhaniya seismicheskoi intensivnosti na primere zemletryaseni v Albanii* [Calibration of the attenuation model of seismic intensity on the example of earthquakes in Albania]. *Geokologiya*, 2020, no. 5, pp. 62–77. <https://doi.org/10.31857/S0869780920050033> (in Russian)
 35. Frolova N.I., Gabsatarova I.P., Sushchev S.P., Ugarov A.N., Malaeva N.S. *Kalibrovka modeli zatukhaniya seismicheskoi intensivnosti na Balkanakh (zemletryaseniya v Khorvatii 2020 g.)* [Calibration of seismic intensity attenuation model for the Balkan region (the 2020 earthquakes in Croatia)]. *Geokologiya*, 2021, no. 5, pp. 3–21. <https://doi.org/10.31857/S0869780921050040> (in Russian)
 36. Shebalin N.V. *Metody ispol'zovaniya inzhenerno-seismologicheskikh dannykh pri seismicheskoi raionirovani* [Methods of using engineering seismological data in seismic zoning]. *Seismicheskoe raionirovanie SSSR* [Seismic zoning of the USSR]. Moscow, Nauka Publ., 1968, pp. 95–121. (in Russian)
 37. Shebalin N.V., Krestnikov V.N., Rustanovich D.N., Shteinberg V.V. et al. *Dagestanskoe zemletryasenie 14 maya 1970 g.* [Dagestan earthquake on May 14, 1970]. *Zemletryaseniya v SSSR v 1970 godu* [Earthquakes in the USSR in 1970]. Moscow, Nauka Publ., 1974, pp. 28–49. (in Russian)
 38. Shebalin N.V. *Opornye zemletryaseniya i uravneniya makroseismicheskogo polya* [Reference earthquakes and macroseismic field equations]. *Novyi Katalog sil'nykh zemletryaseni na territorii SSSR (s drevneishikh vremen do 1975 g.)* [New Catalog of strong earthquakes in the USSR (from ancient times to 1975)]. Moscow, Nauka Publ., 1977, pp. 20–30.
 39. Sholpo V.N., Reisner G.I., Rogozhin E.A. *Idei akademika Gamburtseva v seismotektonike* [Academician Gamburtsev's ideas in seismotectonics]. *Fizika Zemli*, 2004, no. 5, pp. 68–79. (in Russian)
 40. Global CMT Catalog. Available at: <https://www.globalcmt.org>.