ГЕОЭКОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ, 2023, № 4, с. 3–17

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 624.131.1:551.252

ВОЗМОЖНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ СЦЕНАРНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В КАВМИНВОДСКОЙ ЗОНЕ

© 2023 г. Н. И. Фролова[1,*], И. П. Габсатарова[2,], В. И. Ларионов[1,3], С. П. Сущев[3,***], Н. С. Малаева[1], Г. Ю. Донцова[2]**

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

[2]Федеральный исследовательский центр "Единая Геофизическая Служба РАН" (ФИЦ ЕГС РАН), Ленина пр., 189, Обнинск, 249035 Россия

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

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

***E-mail: ira@gsras.ru*

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

Поступила в редакцию 24.04.2023 г.
После доработки 05.05.2023 г.
Принята к публикации 25.05.2023 г.

В статье анализируются возможные последствия сценарных землетрясений в зонах повышенной сейсмической опасности с целью обоснования мероприятий по обеспечению безопасности населения. В качестве примера рассматривается юг Ставропольского края. За последнее двадцатилетие территория Центрального Предкавказья характеризуется активизацией сейсмической активности по данным сети ФИЦ ЕГС РАН на Северном Кавказе по регистрации сейсмических событий широкого спектра магнитуд с $M \geq 1$. Одно из последних ощутимых событий mb = 4.4 произошло в рассматриваемом районе 1.04.2023 г. и проявилось интенсивностью от 3 до 4 баллов по шкале MSK-64 в крупных курортных городах Ставропольского края. Для выбора параметров сценарных событий используются результаты работ Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), полученные в ходе работ по детальному сейсмическому районированию (ДСР) и общему сейсмическому районированию (ОСР-2016). Для расчета последствий в курортных населенных пунктах, расположенных в южной части Ставропольского края, применена система "Экстремум". Анализируется влияние особенностей распространения сейсмического эффекта и параметров уравнения макросейсмического поля на результаты моделирования последствий сценарийных землетрясений. Особое внимание уделяется исследованию глубин сильных и умеренных событий в рассматриваемом районе Северного Кавказа и ориентации изосейст макросейсмического поля. Рекомендуется выполнение предварительной калибровки моделей системы "Экстремум" для оценки потерь от землетрясений. Приводятся результаты моделирования возможного ущерба при сценарных землетрясениях с $M = 6.0$ и $M = 5.5$ для отдельных крупных городов Кавминводской зоны. Результаты исследований могут быть использованы при разработке как планов превентивных мероприятий, так планов реагирования в случае возможных событий в регионе.

Ключевые слова: *система "Экстремум"*, *зоны ВОЗ*, *последствия землетрясения*, *сценарное событие*, *Ставропольский край*, *Кавминводская зона*

DOI: 10.31857/S0869780923040033, **EDN:** WXXBWW

ВВЕДЕНИЕ

Защита населения от природных катастроф и, в первую очередь, от землетрясений, которые чаще всего приводят к гибели людей и значительным экономическим потерям, – одна из актуальных задач современной науки.

Согласно статистическим данным Центра эпидемиологии катастроф (http://www.emdat.be), в 2022 г. произошло 387 природных катастроф, что немного больше среднего числа событий за период 2002–2021 гг. (370 событий). Число погибших в 2022 г. составило 30 704 человека, что в 3 раза больше, чем в 2021 г., но ниже среднего показателя за 2002–2021 гг. – 60955 человек. Среднее количество землетрясений в 2022 г. (31 событие) было чуть больше среднего за период 2002–2021 гг. Количество погибших от землетрясений в 2022 г. составило 1626 человек, что более чем

в 2 раза меньше средних показателей за 2002–2021 гг. (35124 погибших). В 2022 г. стоит отметить три землетрясения, два из которых вошли в десятку самых смертоносных стихийных бедствий мира в этом году: землетрясения на юго-востоке Афганистана в июне (1036 погибших) и в Индонезии в ноябре (334 погибших). Землетрясение в Японии на Фукусиме в 2022 г. не привело к значительным социальным потерям, но экономический ущерб от этого события составил 8.8 млрд долларов США.

Тенденцию уменьшения числа погибших от землетрясений в 2022 г. нельзя считать выполнением задач, сформулированных в Сендайской рамочной программе ООН по снижению риска бедствий. В настоящее время по-прежнему существует очевидная необходимость в совершенствовании эффективности политики управления рисками и возможными последствиями от ожидаемых событий в будущем. Катастрофические последствия землетрясения 6.02.2023 г. в Турции связаны как с быстрым ростом населения в городских местностях, так и недостатком финансирования мероприятий по усилению существующей застройки на случай сильного землетрясения. Это событие, унесшее жизни более 80000 жителей Турции и Сирии, стало подтверждением необходимости повышения осознания сейсмической опасности и проведения адекватных превентивных мероприятий по сейсмостойкому усилению зданий в сейсмоопасных районах.

В разных районах России в соответствии с данными среднесрочного прогноза землетрясений возможны сильные землетрясения, которые, как правило, приурочены к зонам ВОЗ. Территория Северного Кавказа и, в том числе Ставропольского края (СК), не является исключением. Около 14% территории СК характеризуются значениями индивидуального сейсмического риска [24], требующими уточнения возможных негативных последствий будущих землетрясений на территории края.

Цель настоящего исследования – оценка последствий сценарных событий для наиболее опасных зон ВОЗ на территории СК.

Актуальность такого исследования подчеркивается произошедшим 1.04.2023 г. в исследуемом районе ощутимого до 4 баллов землетрясения, вызвавшего волнения среди населения Кавказских Минеральных Вод и широкий резонанс в средствах массовой информации.

Методически настоящее исследование связано с изучением влияния параметров уравнения макросейсмического поля и глубины очага на результаты компьютерного моделирования последствий от сценарных землетрясений с использованием системы “Экстремум”, разработанной с участием авторов данной статьи. Применяемая методика детально описана в работах [8–10].

Параметры событий выбраны согласно результатам работ ИФЗ РАН, полученных в рамках работ по детальному сейсмическому районированию (ДСР) территории Ставропольского края [1, 11, 19, 21, 22] и общему сейсмическому районированию (ОСР-2016) [16].

ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА И СИЛЬНЫЕ И ОЩУТИМЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ

В тектоническом отношении рассматриваемый район расположен в пределах эпигерцинской Скифской плиты (молодой платформы) с интенсивно дислоцированным герцинским складчатым основанием и мезо-кайнозойским чехлом. На территории Центрального Предкавказья выделяются четыре крупные неотектонические структуры: Восточно-Кубанский прогиб, Ставропольский свод, Минераловодский выступ и Терско-Каспийский прогиб [20, 22].

Наиболее сейсмоактивен район Кавказских Минеральных Вод [14, 15], где по оценкам сейсмического потенциала Кавказа по межрегиональному методу [18] с учетом палеосейсмологических и сейсмотектонических данных был выделен Кисловодский потенциальный очаг с M_{max} = = 6.5–7.8. В этом очаге в XX в. наиболее сильными, 8- и 7-балльными землетрясениями считают: Усть-Джегутинское, Пятигорское, Кисловодское и Кавминводское (табл. 1).

29.06.1921 г. в районе Кавказских Минеральных вод (КМВ) произошло наиболее сильное землетрясение за последние два столетия с магнитудой $M = 5.6$. В [2] сообщалось: “*В Кисловодске – (7 баллов), ощущалось довольно сильное землетрясение с гулом. Отмечено три толчка; первый – наиболее сильный. Падала посуда, двигалась мебель, оконные и дверные переплеты повреждены, отвалилась штукатурка, образовались трещины в домах, в некоторых случаях наблюдалось выпадение простенков в домах. Резко изменился дебит всех минеральных источников. В Железноводске и Пятигорске (6–7 баллов) – довольно сильные толчки; осыпание штукатурки и трещины в стенах*”.

В результате Кавминводского землетрясения 28.02.1978 г. (см. табл. 1) изменился режим минеральных источников и буровых скважин, отмечались световые явления. Очаг этого землетрясения расположен в зоне пересечения глубинных разломов общекавказского простирания – Невинномысского и Черкесского, с поперечным Эльбрусским. Проявления этого землетрясения были изучены Э.А. Казиным, который в период 1965–1991 гг. был заведующим сейсмической станцией

Таблица 1. Сведения о наиболее сильных и ощутимых землетрясениях в Ставропольском крае, рассмотренных в настоящем исследовании

№ пп.	Дата	Координаты		M	Глубина, км	I_0, балл	Название землетрясения
		φ°, N	λ°, E				
1	18.04.1909 г.	–	–	4.6			Усть-Джегутинское
2	04.07.1912 г.	–	–	4.7 ± 0.5		6–7 ± 0.5	Пятигорское
3	29.06.1921 г.	43.9	42.8	5.6 ± 0.3	22 (15–33)	7 ± 0.5	Кисловодское
4	02.10.1971 г.	44.8	42.1	4.5 ± 0.3	2.5 (1–4)	8 ± 0.5	Ставропольское
5	28.02.1978 г.	44.11	42.77	4.5	15 (по инстр. данным), 12 и 5 км – по макросеймическим данным	7–8 ± 0.5	Кавминводское
6	19.10.1999 г	44.70	42.68	3.7	13	6–7	Верхне-Янкульское
7	22.06.2006 г	44.04	42.7	4.1	10	–	Суворовское
8	02.05.2012 г.	44.8	41.66	4.0	7	5	Заветненское
9	15.12.2012 г.	44.4	42.46	3.8	14	4	Воровсколесское

“Пятигорск” и проводил большую работу по сбору макросейсмической информации об ощутимых землетрясениях центральной части Северного Кавказа. Сильнее всего землетрясение ощущалось в совхозе “Кисловодский” – 7–8 баллов (сквозные трещины в наружных стенах, трещины в фундаменте), в ст. Боргустанская – 7 баллов, в ст. Суворовская – 6–7 баллов (в кирпичных домах многочисленные трещины), в Невинномысске – 4–5 балла [7, 17].

В области КМВ в 1999, 2006 и 2012 г. произошли ощутимые события умеренной силы, которые проявились интенсивностью 4–5 и 6–7 баллов по шкале MSK-64.

19.10.1999 г. в центральной части Ставропольской возвышенности на территории Северного Кавказа произошло ощутимое Верхне-Янкульское землетрясение. Параметры уточненного очага: φ = 44.73°N, λ = 42.65°E, h = 7 км, M_S = 4.4. Максимальная интенсивность сотрясений (6–7 баллов) отмечена в с. Верхний Янкуль. Перед землетрясением и во время него был слышен сильный гул. Землетрясение началось резким толчком снизу, через 2–3 с последовали сильные горизонтальные колебания в направлении с запада на восток. В результате землетрясения на всех домах произошло полное обрушение труб. Слетала черепица с крыш, рамы выпадали из стен, в некоторых домах образовались сквозные трещины в стенах, раскалывалась и частично обваливалась штукатурка. Основной толчок ощущался на большей части СК. В Ставрополе (расстояние от эпицентра 47 км) землетрясение ощущалось силой 3–4 балла [23].

22.06.2006 г. на юге СК произошло ощутимое Суворовское землетрясение с расчетной магнитудой 4.1 (см. табл. 1). Проявления с интенсивностью сотрясений 5 баллов известны только в станице Суворовская, удаленной на 4 км от макросейсмического эпицентра. Очаг землетрясения находился в 10 км к северо-западу от эпицентра Кавминводского землетрясения [4].

02.05.2012 г. и 15.12.2012 г. в Эльбрусско-Минераловодской области Северного Кавказа произошли два землетрясения (см. табл. 1): Заветненское с эпицентром вблизи с. Заветное и Воровсколесское вблизи станицы Воровсколесская. Оба они ощущались в населенных пунктах от 2 до 4 баллов. Эпицентр Заветненского землетрясения находился в пределах диагональной Армавиро-Ессентукской разломной зоны. Оно ощущалось на территории СК, а также восточной части Краснодарского края и северной части Карачаево-Черкесской Республики. Наиболее сильно землетрясение ощущалось в селах Заветное и Балахоновское – 4 балла. Многие жители слышали гул, громкий треск, похожий на взрыв, ощутили два толчка (первый резкий, второй колебательный), сотрясание домов продолжительностью ~7–15 с. В Ставрополе (в 35 км от очага) землетрясение ощущалось силой 3 балла. Некоторые люди слышали гул, как при движении тяжело нагруженной машины, хлопок, ощущали слабые толчки. Воровсколесское-II землетрясение ощущалось с интенсивностью 4 балла, как на территории СК, так и на территории Карачаево-Черкессии [5].

По данным сети ФИЦ ЕГС РАН, на Северном Кавказе по регистрации сейсмических событий широкого спектра магнитуд с M ≥ 1 территория СК является частью умеренно сейсмоактивного Центрального Предкавказья, которая за последнее двадцатилетие характеризуется современной активизацией сейсмической активности.

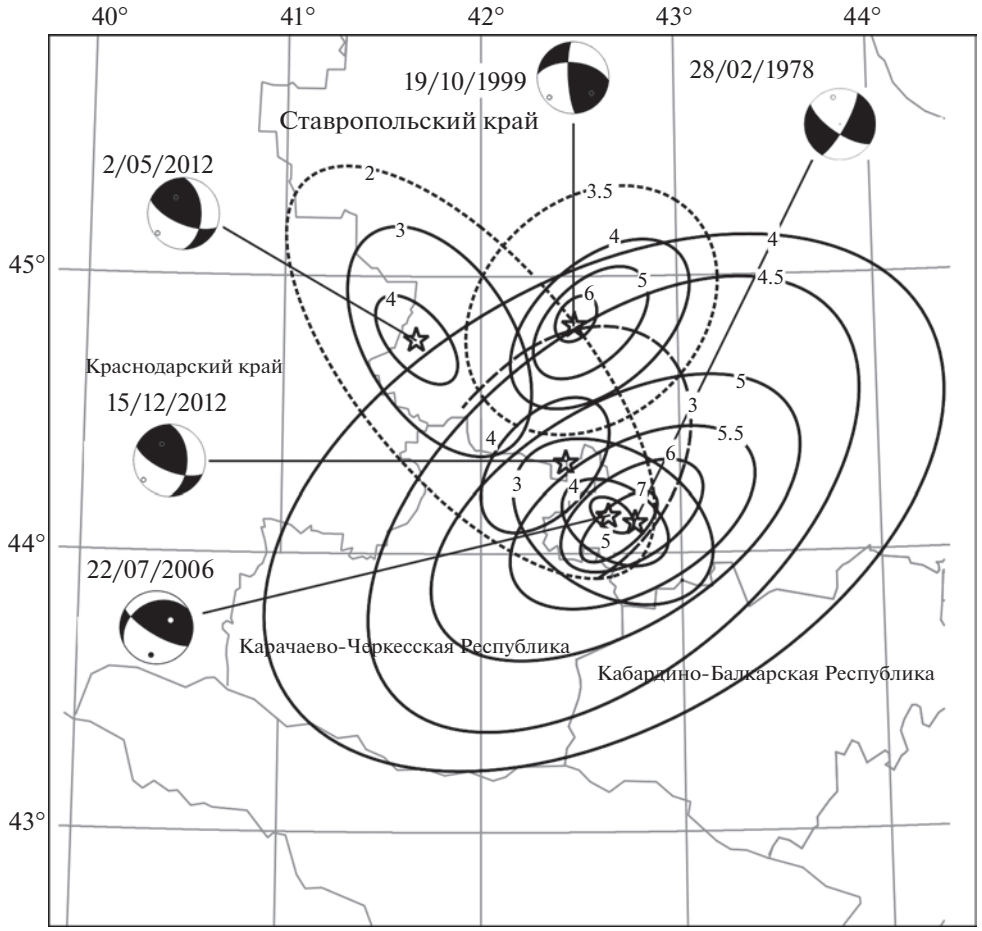

Рис. 1. Сводная карта изосейст землетрясений в СК.

Рассмотрены разные варианты развития событий в регионе с учетом существующих пространственно-временных моделей фаз подготовки сильного землетрясения и аналогичных прецедентов в других регионах и на Кавказе. Для более опасного варианта, который представляется вполне вероятным, по характеристикам области активизации и затишья внутри нее и с учетом динамики, сделаны оценки позиции возможного очага, его магнитуды и интервала возможного времени возникновения. По этим данным ситуация признается тревожной и требующей пристального слежения.

По мнению А.А. Никонова [14], вариантов развития сейсмического процесса в исследуемом районе может быть два. Один – это вспарывание разрыва СЗ простирания, при котором очаг может располагаться на глубине 6–15 км. Другой, более опасный и не менее возможный вариант, но, вероятно, несколько более отдаленный по времени, – возникновение более заглубленного (20–30 км) землетрясения в зоне разлома СВ простирания.

На рис. 1 приведены изосейсты наиболее сильных ощутимых землетрясений на юге СК 19.10.1999 (Ms = 3.7 и I_0 = 6–7 баллов), 22.07.2006 (Ms = 4.1 и I_0 = 5 баллов), 2.05.2012 (M = 4.0 и I_0 = = 5 баллов) и 15.12.2012 (M = 3.8 и I_0 = 4 балла); а также изосейсты сильнейшего Кавминводского (28.02.1978) с M = 4.5 и I_0 = 7–8 баллов. Построено единое макросейсмическое поле, которое показывает, что выделяются два квазиперпендикулярных направления, по которым вытянуты эллипсы изосейст: СЗ направления – вдоль Армавиро-Невинномысского глубинного разлома, и СВ направления, согласующегося с Транскавказким поперечным поднятием.

Полученные по знакам первого движения в P-волне типы механизмов очагов названных сильных землетрясений хорошо согласуются с макросейсмическими полями и кинематикой разломных зон по схеме Е.Е. Милановского [13]: очаги землетрясений в пределах СЗ направления – взбросо-сдвиги, имеющие общее простирание с одной из нодальных плоскостей вдоль Армавиро-Ессентукского разлома, в отличие от

Таблица 2. Параметры возможных наиболее опасных сценарных событий в соответствии с экспертной оценкой Е.А. Рогожина и для доменов по карте ОСР-2016

Номер события, по рис. 2	Координаты эпицентра		Глубина очага, км	M_{max}	Глубина очага, км	M_{max}
	φ°, N	λ°, E	по данным Е.А. Рогожина		по доменам ОСР-2016	
№ 1	43.75	43.08	20	7	3–13.5	5.5
№ 2	43.92	42.49	15	6	3–13.5	5.5
№ 3	43.98	43.22	15	6	3–13.5	5.5
№ 4	43.71	42.44	20	7	3–13.5	5.5
№ 5	44.98	41.97	10	5	3–13.5	5.5

Кавминводского землетрясения – сбросо-сдвиг с очагом в Эльбрусско-Минераловодской зоне сбросо-сдвиговых нарушений.

Установленный характер вытянутости эпицентральных зон рассмотренных землетрясений соотносится с зонами разломов, соответственно, СЗ и СВ простирания, которые в этих условиях естественно считать сейсмогенерирующими и потенциально опасными. Далее в расчетах последствий сценарных землетрясений в Кавминводской зоне это будет учтено, будут использованы направления в ζ = 40° и ζ = 320°.

Совсем недавнее оживление сейсмической активности в рассматриваемом районе произошло 1.04.2023 г., когда в 14 час 03 мин было зарегистрировано землетрясение с mb = 4.4, ощущавшееся до 4 баллов жителями из населенных пунктов: пос. Иноземцево, городов Пятигорск, Железноводск, Георгиевск, Минеральные Воды, Ессентуки, Кисловодск, Новопавловск Советского округа, станиц Ессентукская Предгорного округа и Лысогорская Георгиевского округа, с. Краснокумское Георгиевского округа. Координаты гипоцентра: N = 44.043°, λ° E = 43.295°, h = 10 км довольно близки к сценарному событию № 3, которое будет описано в следующем разделе (табл. 2, рис. 2).

СЕЙСМИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ ТЕРРИТОРИИ СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ И ПАРАМЕТРЫ СЦЕНАРНЫХ СОБЫТИЙ

Последние годы в результате детальных исследований по оценке сейсмической опасности Се-

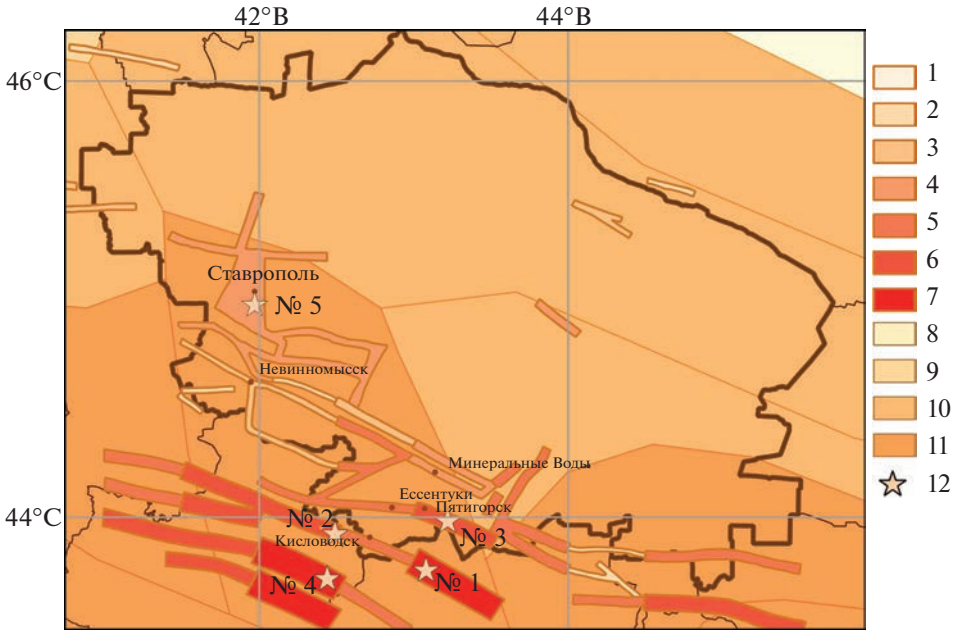

Рис. 2. Зоны ВОЗ для территории СК по ОСР-2016 [16] и ДСР [21]: 1–7 – M_{max} для зон ВОЗ по ДСР: 1–4.0, 2–4.5, 3–5.0, 4–5.5, 5–6.0, 6–7.0; 6–11 – M_{max} для доменов ОСР-2016: 7–3.5, 8–4.0, 9–4.5, 10–5.0, 11–5.5; 12 – эпицентры сценарных землетрясений.

Таблица 3. Параметры сценарных событий для расчета последствий землетрясений в Кавминводской зоне

№	Параметры сценарного события	k	ζ
2а	43.92° N; 42.49° E; $M = 6$; $h = 15$ км	$k = 2$	40°
2б	–“–	–“–	320°
2в	43.92° N; 42.49° E; $M = 5.5$; $h = 3$ км	–“–	40°
2г	43.92° N; 42.49° E; $M = 5.5$; $h = 13.5$ км	–“–	–“–
3а	43.98° N; 43.22° E; $M = 6$; $h = 15$ км	–“–	–“–
3б	–“–	–“–	320°
3в	43.98° N; 43.22° E; $M = 5.5$; $h = 3$ км	–“–	40°
3г	43.98° N; 43.22° E; $M = 5.5$; $h = 13.5$ км	–“–	–“–

Таблица 4. Средние степени повреждения $d_{ср}$ в отдельных городах КМВ зоны при сценарных событиях 2а, 2б, 3а и 3б

Название населенного пункта	Событие		Δ, км	$\Delta d_{ср}$, %	Событие		Δ, км	$\Delta d_{ср}$, %
	2а	2б			3а	3б		
Пятигорск	2.1	1.6	48	23	3.2	3.6	14	14
Кисловодск	3.1	3.1	18	0	2.2	1.9	40	12
Ессентуки	2.8	2.1	32	24	2.4	2.7	30	14
Минеральные Воды	2.0	1.2	60	41	2.7	3.1	26	14
Георгиевск	1.3	0.9	81	34	3.2	2.4	27	25

верного Кавказа и, в частности западной части СК [1, 11, 16, 19, 21, 22], были разработаны карты зон ВОЗ рассматриваемого региона.

По детальным оценкам [22], некоторая часть территории СК относится к зонам ВОЗ (M_{max} = = 6–7), центральная ее часть – к (M_{max} = 5.0–5.5), а с юга и востока территории соседствуют зоны с $M_{max} = 7$. На рис. 2 совместно представлены вариант карты зон ВОЗ, подготовленный коллективом ИФЗ РАН под руководством Е.А. Рогожина, и карта доменов согласно актуализированной линеаментно-доменно-фокальной модели (ЛДФ модели) зон ВОЗ для СК, подготовленная в рамках работ по созданию комплекта карт ОСР-2016 [16]. На карте также показаны эпицентры возможных сценарных событий для наиболее опасных зон ВОЗ в соответствии с экспертным заключением Е.А. Рогожина, их параметры приведены в табл. 2.

Для исследования влияния коэффициентов макросейсмического поля и глубины очага и расчета последствий сценарных событий были выбраны второй и третий очаги (см. табл. 2, рис. 2) как наиболее вероятные, по мнению авторов, события и их характеристики. Расчеты последствий были выполнены для $M = 6$ в соответствии с оценками Е.А. Рогожина и для $M = 5.5$ в соответствии с оценками для доменов по карте ОСР-2016 (табл. 3).

Расчеты последствий сценарных событий были выполнены с применением методов имитационного компьютерного моделирования с использованием системы “Экстремум”, разработанной с участием авторов данной статьи [7–9].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПОСЛЕДСТВИЙ СЦЕНАРНЫХ СОБЫТИЙ

На рис. 3 показаны результаты расчета последствий сценарных землетрясений 3а и 3б (см. табл. 3, рис. 2), очаг которого расположен ближе всего к г. Пятигорск. Расчет выполнен с использованием уравнения затухания интенсивности (1), полученного ранее авторами в результате калибровки модели макросейсмического поля для юга СК [24] для величины сжатия эллипса затухания интенсивности, характеризуемой отношением большой и малой осей эллиптических изосейст высших баллов $k = 2$, и ориентации макросейсмического поля под углами ζ = 40° и ζ = 320°.

$$I = 1.6M - 2.12 \pm 0.17\log(r) + 1.28 \pm 0.48. \quad (1)$$

На картах значками разного размера показаны города с разной численностью населения, цвет значка – средняя степень повреждения застройки города.

В табл. 4 приведены расчетные значения средних степеней повреждения застройки для сценарных событий 2а, 2б, 3а, 3б (см. табл. 3).

Сравнение расчетных средних степеней повреждения $d_{ср}$ застройки крупных населенных

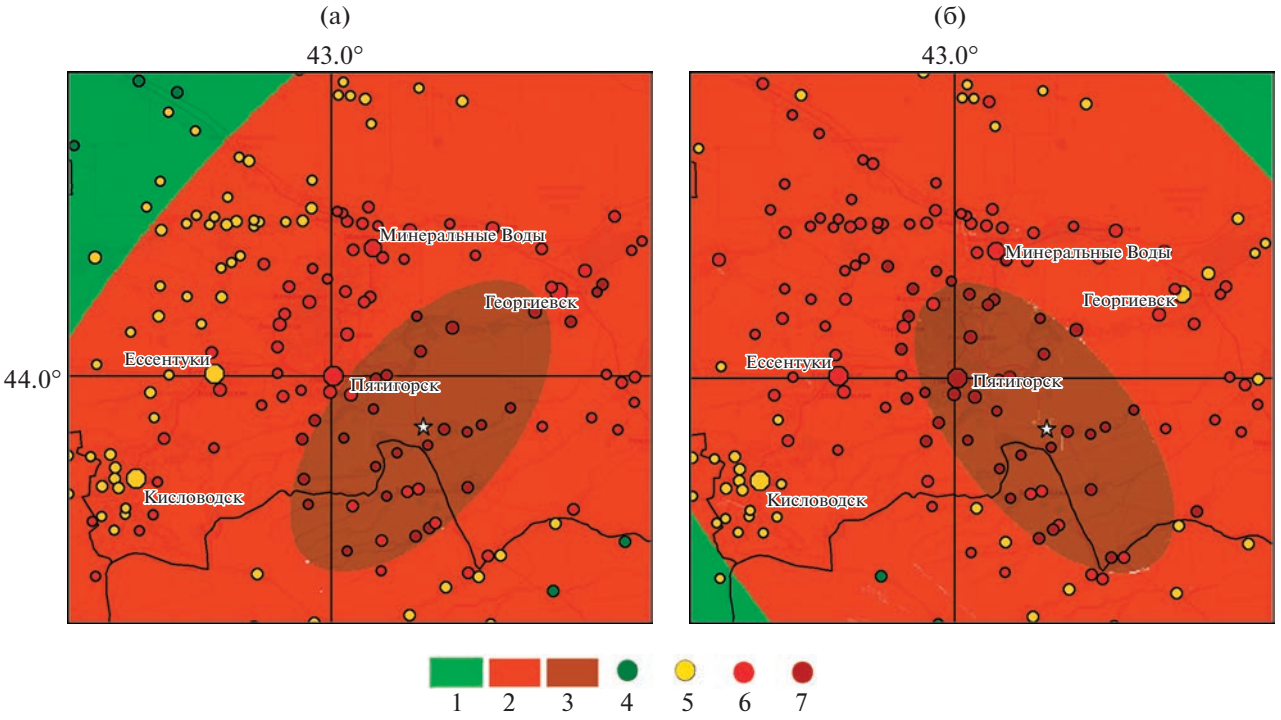

Рис. 3. Возможные последствия сценарных событий (см. рис. 2; табл. 3): а – 3а; б – 3б.
1–3 – интенсивность (*I*) в баллах MSK-64: 1–6–7, 2–7–8, 3–8–9; 4–7 – средние степени повреждения в населенных пунктах: 4 – легкие и умеренные (*d*1 и *d*2), 5 – тяжелые (*d*3), 6 – частичные разрушения (*d*4), 7 – обвалы (*d*5); звезды – эпицентры событий 3а и 3б.

пунктов при разных ориентациях макросейсмического поля под углами 40° и 320° показывает, что при эпицентральном расстоянии $\Delta < 30$ км влияние ориентации незначительно (12–25%). Однако с увеличением эпицентрального расстояния при $\Delta > 60$ км эта разница может составить 41%.

Учитывая близость очагов сценарных событий к населенным пунктам, высокую плотность населения в Кавминводской агломерации СК (~50 чел./м^2), а также индекс наклона ЛДФ-модели зоны ВОЗ, равный 90°, расчеты последствий сценарных событий 2в, 2г, 3в, 3г (см. табл. 3) были выполнены для одной ориентации эллипса макросейсмического поля – $\zeta = 40°$.

Влияние глубины очага *h* сценарных событий на эффект от землетрясений в рассматриваемом районе Северного Кавказа изучено на примере сценарных событий 2в и 2г, 3в и 3г. На рис. 4 показаны результаты моделирования последствий событий 3в и 3г.

При моделировании последствий события 3в на рис. 4а появляются изосейсты 7 и 8 баллов. Возможный эффект проявления $I = 8$ баллов приурочен к эпицентральной зоне, что свидетельствуют о влиянии глубины очага *h* в ближней зоне. Влияние глубины очага *h* сценарного события на средние степени повреждения застройки $d_{ср}$ проявляется на расстояниях до $\Delta \le 30$ км. На расстояниях $\Delta \ge 40$ км оно незначительно, а на расстояниях $\Delta \ge 60$ км средние расчетные степени повреждений застройки совпадают (рис. 5).

На рис. 6 показаны результаты расчета $d_{ср}$ для отдельных курортных городов СК в случае сценарных событий 2а, 2в, 2г, 3а, 3в, 3г (см. табл. 3, рис. 2).

В случае сценарного события 2а с магнитудой $M = 6$ наивысшие средние степени повреждения застройки $d_{ср} = 3$ получены для г. Кисловодск (см. рис. 6а).

Для сценарного события 3а, наибольшие значения средних степеней повреждения $d_{ср} > 3$ получены для Пятигорска и Георгиевска (см. рис. 6б). Эпицентр этого события расположен ближе к городам Кавминводской агломерации, поэтому оценки $d_{ср}$ для этих населенных пунктов выше, чем в случае сценарного события 2а.

В целом для сценарных событий 2а и 3а получены более высокие значения средних степеней повреждения зданий $d_{ср}$ в курортных городах Кавминводской зоны (см. рис. 6) по сравнению с событиями 2в, г и 3в, г (табл. 3, рис. 2) с $M = 5.5$.

При оценках средних степеней повреждения $d_{ср}$ застройки в населенном пункте нужно также учитывать вероятность получения зданиями разных степеней повреждения. Для событий 2а и 3а

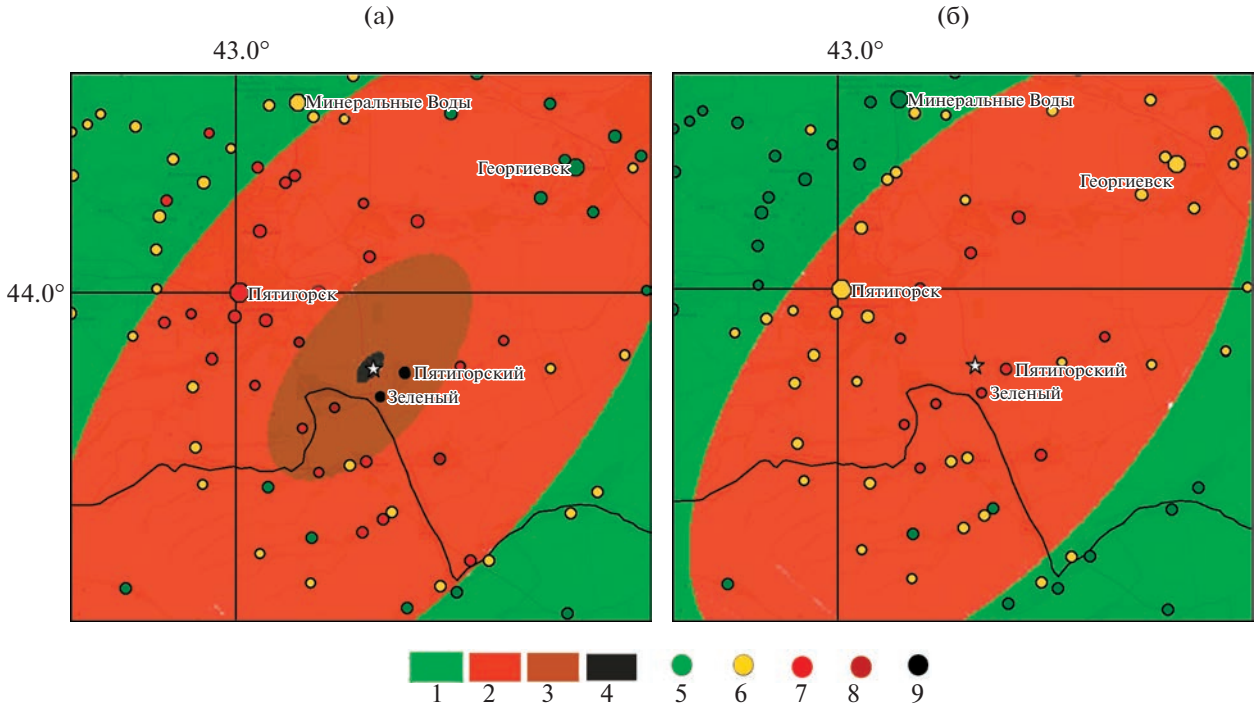

Рис. 4. Возможные последствия сценарных событий (см. рис. 2, табл. 3): а – 3в; б –3г.
1–4 – интенсивность (I) в баллах MSK-64: 1–6–7, 2–7–8, 3–8–9, 4–9–10; 5–7 – средние степени повреждения в населенных пунктах: 5 – легкие ($d1$), 6 – умеренные ($d2$), 7 – тяжелые ($d3$), 8 – частичные разрушения ($d4$), 9 – обвалы ($d5$); звезды – эпицентры событий 3в и 3г.

такие расчетные вероятности или процент зданий, которые могут получить разные степени повреждения в отдельных курортных городах, приведены в табл. 5.

Несмотря на тот факт, что расчетная средняя степень повреждения зданий в городах курортной зоны не превышает $d_{ср} = 3.2$ (см. табл. 5), отдельные здания могут получить более высокие степени $d4$ (частичное разрушение) и даже $d5$ (обвалы). При реализации события 3а в Пятигорске и Георгиевске до 20% зданий могут получить степень повреждения $d5$. При реализации события 2а в Кисловодске при расчетной средней степени повреждения $d_{ср} = 3.1$ более 40% зданий могут получить степени повреждений $d4$ и $d5$.

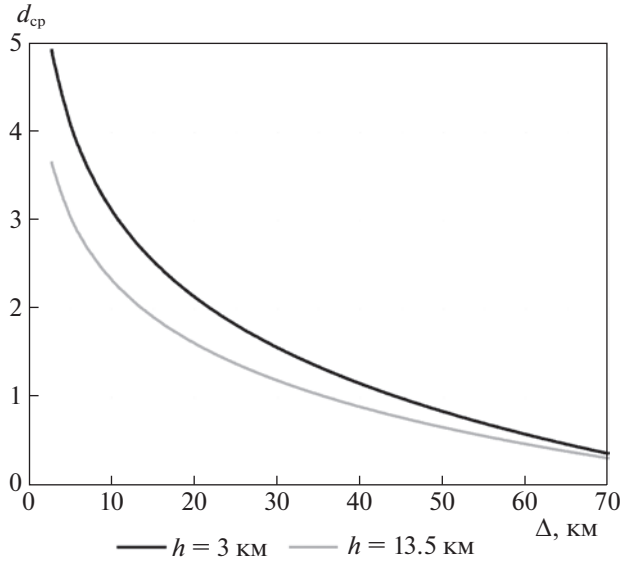

Рис. 5. Влияние глубины очага сценарного события на средние степени повреждения застройки $d_{ср}$.

РАСЧЕТ УЩЕРБА ДЛЯ ЗДАНИЙ РАЗНОГО ТИПА

На рис. 7 показано расчетное распределение повреждений зданий разного типа по шкале MMSK-86 [25] в Пятигорске, Ессентуках и Кисловодске при реализации сценарного события 3а.

Наиболее сильным повреждениям вплоть до полного обрушения ($d5$) подвергнутся здания типа А. В Пятигорске доля таких зданий может составить 44% (рис. 7а), в Ессентуках – 12% (рис. 7б), в Кисловодске – 10% (рис. 7в). Процент повреждения зданий типа Б значительно ниже. Степень повреждения $d5$ могут получить от 1% зданий в Кисловодске (рис. 7в) и до 12% в Пятигорске (рис. 7а).

Для получения более надежных оценок последствий сценарных землетрясений на город-

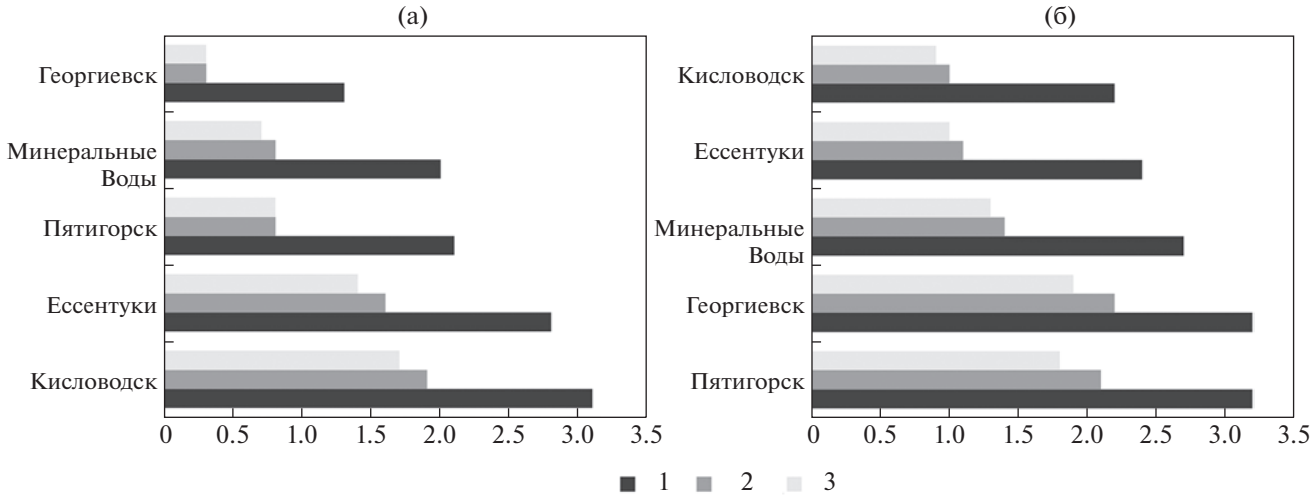

Рис. 6. Средние степени повреждения застройки $d_{ср}$: а – сценарные события 2а, 2в, 2г; б – сценарные события 3а, 3в, 3г. События: 1 – 2а и 3а, 2 – 2в и 3в, 3 – 2г и 3г. Населенные пункты расположены снизу вверх в зависимости от удаления от эпицентра.

ском уровне в настоящем исследовании выполнена актуализация распределения зданий разного типа по шкале MMSK-86 [25] для г. Ессентуки. Была проанализирована информация с сайта "Реформа ЖКХ" (https://www.reformagkh.ru) о материале несущих стен и перекрытий в многоквартирных домах, количестве этажей, квартир и подъездов в доме и численности жителей.

Дополнительно совместно обрабатывались космические снимки и "фото панорамы" сервиса компании Яндекс.

Уточненная информация о поквартальной застройке г. Ессентуки, включающая поквартальный процент зданий разного типа по шкале MMSK-86 и их средние высоты, была использована для расчета последствий сценарных событий 2а и 2в (табл. 3, рис. 2). На рис. 8 показаны результаты расчета средних степеней повреждений $d_{ср}$ для кварталов города.

По наиболее опасному сценарию 2а тяжелые повреждения может получить одно-двухэтажная застройка из кирпича и оштукатуренного дерева (тип А, Б по шкале MMSK-86) в юго-западной части города (рис. 8а). Здания типа В по шкале MMSK-86, расположенные в микрорайоне "Курортная зона", могут получить умеренные повреждения. В этом микрорайоне расположены основные санаторно-курортные комплексы с высоким процентом зданий с открытым пространством на нижних этажах. Такие конструкции характеризуются высокой уязвимостью к сейсмическим воздействиям. На территории микрорайонов 1–4, застроенных современными многоэтажными домами (тип С7, С8 по шкале MMSK-86), расчетная

Таблица 5. Распределение степеней повреждения застройки для отдельных городов СК для сценарных событий 2а и 3а (см. табл. 3, рис. 2)

Показатель	Пятигорск		Кисловодск		Ессентуки		Минеральные воды		Георгиевск	
	2а	3а	2а	3а	2а	3а	2а	3а	2а	3а
Δ, км	48	14	18	40	32	30	60	26	81	27
*d*0*	0.15	0.02	0.03	0.12	0.06	0.10	0.15	0.08	0.3	0.03
*d*1	0.19	0.09	0.1	0.17	0.12	0.16	0.2	0.23	0.29	0.09
*d*2	0.29	0.17	0.18	0.28	0.22	0.27	0.29	0.13	0.25	0.16
*d*3	0.24	0.26	0.27	0.26	0.28	0.27	0.24	0.28	0.13	0.25
*d*4	0.11	0.27	0.26	0.13	0.22	0.15	0.1	0.20	0.03	0.27
*d*5	0.02	0.19	0.16	0.04	0.1	0.05	0.02	0.08	–	0.20
$d_{ср}$	2.0	3.2	3.1	2.2	2.8	2.3	2.0	2.6	1.3	3.2

*d0 – нет повреждений.

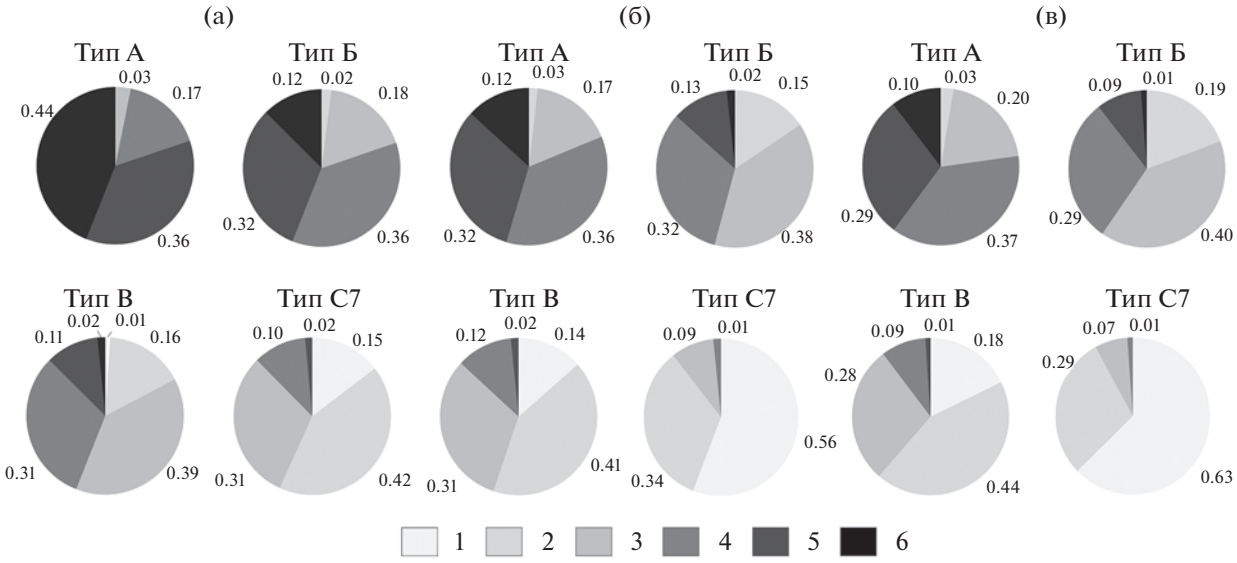

Рис. 7. Распределение степеней повреждения зданий разного типа по шкале MMSK-86 [25] в городах: а – Пятигорск, б – Ессентуки, в – Кисловодск. 1–6 – степени повреждения: 1 – *d*0, 2 – *d*1, 3 – *d*2, 4 – *d*3, 5 – *d*4, 6 – *d*5.

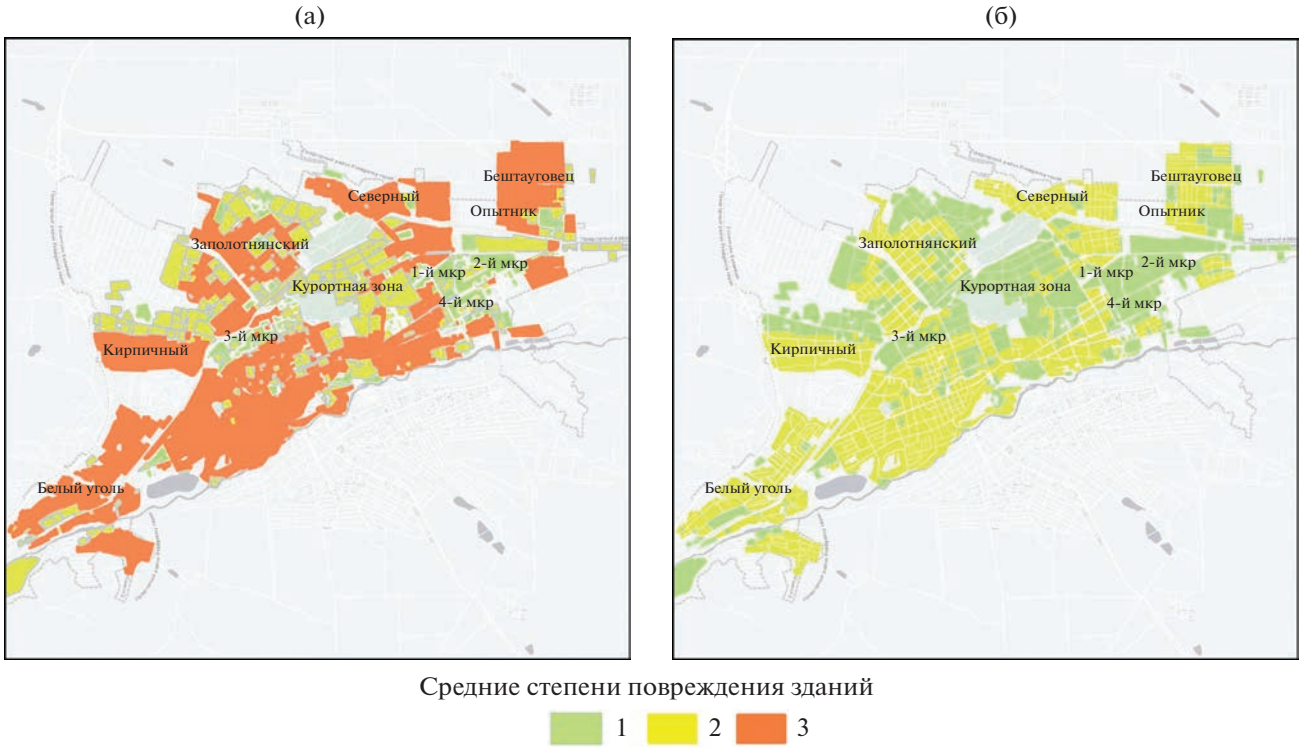

Рис. 8. Распределение расчетных средних степеней повреждения $d_{ср}$ типовой застройки г. Ессентуки: а – сценарное событие 2а; б – сценарное событие 2в. 1–3 – степени повреждения: 1 – нет повреждений или легкие повреждения (*d*0 и *d*1), 2 – умеренные (*d*2), 3 – тяжелые (*d*3).

степень повреждения *d*1 – легкие повреждения. К северу и югу от этих микрорайонов расположена зона малоэтажной застройки (тип А, Б по шкале MMSK-86), расчетные степени ее повреждения достигают значений *d*3.

По наиболее вероятному сценарию 2в (табл. 3, рис. 2) умеренные повреждения может получить малоэтажная застройка (рис. 8б). Остальная часть зданий не получит повреждений или получит легкие повреждения.

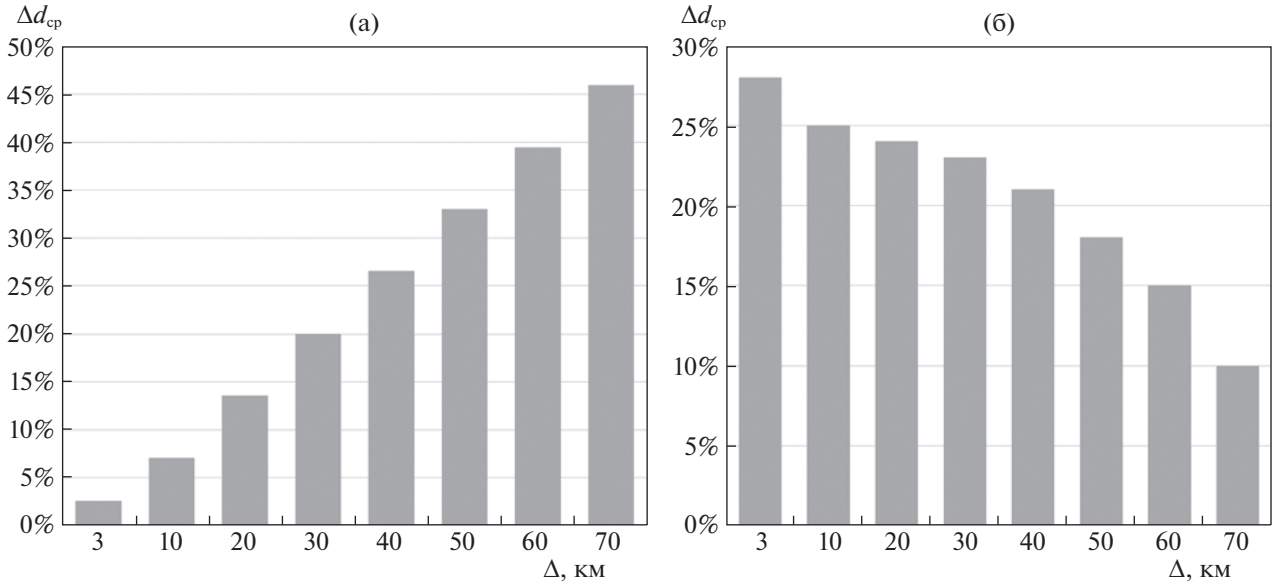

Рис. 9. Расхождение расчетных средних степеней повреждений $d_{ср}$ при разной ориентации эллипса макросейсмического поля (а) и разной глубине очага сценарного землетрясения (б).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ПОСЛЕДСТВИЙ СЦЕНАРНЫХ СОБЫТИЙ

На рис. 9а показано влияние ориентации эллипса макросейсмического поля на значения расчетных средних степеней повреждения $d_{ср}$ застройки в населенном пункте. Расхождение расчетных $d_{ср}$ для разных ориентаций ($\zeta = 40°$ и $\zeta = 320°$) на эпицентральных расстояниях $\Delta \le 10$ км составляет 3–6%; при $\Delta > 70$ км оно может достигать 45%.

На рис. 9б показано влияние глубины очага h на расчетные средние степени повреждения $d_{ср}$ зданий. В зависимости от глубины очага сценарного события разница в оценках степеней повреждений может достигать 27% на расстояниях $\Delta \le 3$ км.

Совместный анализ табличных и визуальных данных (см. рис. 4, 6), полученных с помощью системы “Экстремум”, показывает, что для сценарных событий 2в и 3в (см. табл. 3) максимально возможные, близкие к 10 баллам значения интенсивности в эпицентральной зоне I_0, возможны при $M = 5.5$ и глубине очага $h = 3$ км. При этом вероятны средние степени повреждения $d_{ср} = 4$ (частичные разрушения) и $d_{ср} = 5$ (обвалы).

При реализации событий 2г и 3г с глубиной очага $h = 13.5$ км (см. табл. 3) максимальные значения интенсивности I_0 могут составить 7–8 баллов по шкале MSK-64. Расчетная средняя степень повреждения зданий $d_{ср}$ в населенных пунктах в этом случае может достигать $d3$ (тяжелые повреждения).

При увеличении магнитуды сценарного события с $M = 5.5$ до $M = 6.0$ расчетные средние степени повреждения зданий в курортных городах Кавминводской зоны изменяются с $d_{ср} = 2$ до $d_{ср} = 3$ (см. рис. 6). При $d_{ср} = 3$ (см. табл. 6) отдельные здания в городах курортной зоны могут получить более высокие степени повреждения вплоть до частичного разрушения и даже обвалов.

При реализации события 3а (см. табл. 3) в Пятигорске и Георгиевске до 20% зданий могут получить степень повреждения $d5$. При реализации события 2а в Кисловодске более 40% зданий могут получить степени повреждений $d4$ и $d5$ (см. табл. 6) При этом от 2 до 12% зданий в курортных городах при сценарных событиях 2а и 3а останутся неповрежденными.

Здания типа А в курортной зоне (см. рис. 7) могут получить сильные повреждения вплоть до полного обрушения.

Расчеты последствий сценарных событий с $M = 5.5$ и $M = 6$, выполненные для г. Ессентуки, показывают аналогичное поведение зданий типа А и Б по шкале MMSK-86.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным сети ФИЦ ЕГС РАН на Северном Кавказе по регистрации сейсмических событий широкого спектра магнитуд с $M \ge 1$, территория Ставропольского края является частью умеренно сейсмоактивного Центрального Предкавказья, которая за последнее двадцатилетие характеризуется современной активизацией сейсмической активности. В изучаемом районе известны силь-

ные и ощутимые землетрясения. Землетрясение 1 апреля 2023 г. с магнитудой mb = 4.4 в этом районе проявилось интенсивностью до 4 баллов и вызвало волнения среди населения Кавказских Минеральных Вод и широкий резонанс в средствах массовой информации.

На территории Центрального Предкавказья выделяются четыре крупные неотектонические структуры: Восточно-Кубанский прогиб, Ставропольский свод, Минераловодский выступ и Терско-Каспийский прогиб [20, 22]. Наиболее сейсмоактивным является район Кавказских Минеральных Вод [14, 15].

Последние годы в результате детальных исследований по оценке сейсмической опасности Северного Кавказа, в частности западной части Ставропольского края [1, 11, 16, 19, 21, 22], были разработаны карты зон ВОЗ рассматриваемого региона. По детальным оценкам [22] некоторая часть территории края относится к зонам ВОЗ (M_{max} = 6–7), центральная ее часть к (M_{max} = 5.0–5.5), а с юга и востока территории соседствуют зоны с M_{max} = 7.

При выборе параметров сценарных событий, наиболее опасных для курортных городов Кавминводской зоны, были использованы карта зон ВОЗ, подготовленная коллективом ИФЗ РАН вод руководством Е.А. Рогожина, и карта доменов согласно актуализированной линеаментно-доменно-фокальной модели зон возникновения очагов землетрясений для Ставропольского края, подготовленная в рамках работ по созданию комплекта карт ОСР-2016 [16].

Расчеты последствий сценарных событий с M = = 6 и M = 5.5 выполнены с применением системы “Экстремум” на региональном уровне и уровне города.

В случае сценарных событий с M = 6 расчетные значения средних степеней повреждения застройки $d_{ср}$ в курортных городах могут варьировать от 2.8 до 3.6. Наиболее тяжелые повреждения вплоть до полного обрушения могут получить здания типа А, в курортных городах их процент изменяется от 10 до 44%. Здания типа Б могут получить тяжелые повреждении вплоть до полного обрушения, процент таких зданий значительно ниже: от 1 до 12%.

Актуализированная в настоящем исследовании поквартальная застройка г. Ессентуки позволила смоделировать возможные степени повреждения застройки в случае сценарных событий с M = 6 при h = 15 км и M = 5.5 при h = 3 км для отдельных кварталов города. В случае события с M = 6 в микрорайоне “Курортная зона”, где расположены основные санаторно-курортные комплексы, здания могут получить умеренные повреждения. В микрорайонах 1–4 расчетная степень повреждения соответствует легким повреждениям, а к северу и югу от этих микрорайонов застройка может получить тяжелые повреждения. В случае события с M = 5.5 застройка г. Ессентуки может получить легкие и умеренные повреждения.

Результаты настоящего исследования свидетельствуют о целесообразности продолжения работ по калибровке системы “Экстремум” и необходимости проведения превентивных мероприятий для обеспечения сейсмобезопасности населения, в первую очередь, усиления зданий от сейсмических воздействий.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИФЗ РАН А.Д. Завьялову и С.А. Перетокину за предоставление цифровой информации по оценке сейсмической опасности в соответствии с картами ОСР-2016 на изучаемую территорию; а также признательность коллективу Центра исследований экстремальных ситуаций за их вклад в развитие системы “Экстремум” и коллегам из ФИЦ ЕГС РАН за плодотворное сотрудничество.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акимов В.А., Зайцев В.А., Ларьков А.С., Лутиков А.И. и др.* Карты сейсмической опасности Северо-Западного и Центрального Кавказа в детальном масштабе // Вопросы инженерной сейсмологии. 2019. Т. 46. № 4. С. 57–74.
2. *Ананьин И.В.* Сейсмичность Северного Кавказа. М.: Наука, 1977. 148 с.
3. *Бабаян Т.О., Кулиев Ф.Т., Папалашвили В.Г., Шебалин Н.В., Вандышева Н.В.* II б. Кавказ [50–1974 гг., M ≥ 4.0, I0 ≥ 5] // Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М.: Наука, 1977. С. 69–170.
4. *Габсатарова И.П., Девяткина Л.В., Иванова Л.Е. и др.* Суворовское землетрясение 22 июля 2006 г. с K_P = = 11.3, I_0^P =5–6 (Ставропольский край) // Землетрясения Северной Евразии 2006 год. Обнинск: ФГБУН ГС РАН, 2012. С. 340–350.
5. *Габсатарова И.П., Королецки Л.Н., Иванова Л.Е. и др.* Землетрясение Заветненское 2 мая 2012 г. с Kp = = 11.2, $Mw_{рег}$ = 4.3, I_0^P = 5 и Воровсколесское-II 15 декабря 2012 г. с Kp = 10.8, $Mw_{рег}$ = 4.2, I_0^P = 4 (Ставропольский край) // Землетрясения Северной Евразии 2012. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. С. 79–94.
6. *Зарайский М.П., Добрыченко А.В., Казин Э.А. Новицкая Н.А.* Ставропольское землетрясение 2 октября 1971 г.// Землетрясения в СССР в 1971 году. М.: Наука, 1975. С. 32–35.

7. *Казин Э.А.* Кавминводское землетрясение 28 февраля 1978 г. // Сейсмологический бюллетень Кавказа. 1979. Тбилиси: Мецниереба, 1982. С. 215–226.
8. *Ларионов В.И., Фролова Н.И.* Особенности оценки уязвимости для сейсмических воздействий // Природные опасности России: монография. Т. 6: Оценка и управление природными рисками / Под ред. А.Л. Рагозина. М.: Изд. фирма "КРУК", 2003. С. 120–130.
9. *Ларионов В.И., Сущев С.П., Угаров А.Н., Фролова Н.И.* Оценка сейсмического риска с применением ГИС-технологий // Природные опасности России: монография. Т. 6: Оценка и управление природными рисками / Под ред. А.Л. Рагозина. М.: Изд. Фирма "КРУК", 2003. С. 209–231.
10. *Ларионов В.И., Фролова Н.И., Угаров А.Н., Сущев С.П. и др.* Оценка сейсмического риска // Геоэкология. 2017. № 2. С. 11–26.
11. *Лутиков А.И., Рогожин Е.А., Овсюченко А.Н.* Методика оценки сейсмической опасности на стадии уточнения исходной сейсмичности // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: матер. Третьей Междунар. сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2008. С. 81–86.
12. *Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В.* Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. М.: МГК АН СССР, 1965. 11 с.
13. *Милановский Е.Е., Расцветаев Л.М., Кухмазов С.У., Бирман А.С. и др.* Новейшая геодинамика Эльбрусско-Минераловодской области Северного Кавказа // Геодинамика Кавказа. М.: Наука, 1989. С. 99–105.
14. *Никонов А.А.* Значительные землетрясения и сейсмический потенциал района Кавказских минеральных вод (по макросейсмическим данным) // Физика Земли. 1994. № 2. С. 10–19.
15. *Никонов А.А., Рейснер Г.И.* Оценка сейсмического потенциала Кавказа с учетом палеосейсмологических и сейсмотектонических данных // Катастрофические процессы и их влияние на природную среду. Т. 2. Сейсмичность. М.: Регион. обществ. орг. ученых по проблемам прикладной геофизики, 2002. С. 381–400.
16. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации. Пояснительная записка к комплекту карт ОСР-2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных зонах // Инженерные изыскания. 7/2016. С. 49–121.
17. *Папалашвили В.Г., Баграмян А.Х., Гоцадзе О.В.* Землетрясения Кавказа // Землетрясения в СССР в 1978 году. М.: Наука, 1982. С. 11–19.
18. *Рейснер Г.И., Иогансон Л.И., Рейснер М.Г., Баранов Ю.Е.* Типизация земной коры и современные геологические процессы. М.: ИФЗ, 1993. 207 с.
19. *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.
20. *Рогожин Е.А., Нечаев Ю.В., Солодилов Л.Н., Исмаил-заде Т.А.* Тенденция развития сейсмичности Кавказа и сейсмогенерирующие зоны Ставрополья // Разведка и охрана недр. 1998. № 2. С. 23–27.
21. *Рогожин Е.А., Лутиков А.И., Овсюченко А.Н. и др.* Оценка сейсмической опасности Северного Кавказа в детальном масштабе // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2013. № 5. С. 14–19.
22. *Рогожин Е.А., Овсюченко А.Н., Лутиков А.И., Собисевич А.Л. и др.* Эндогенные опасности Большого Кавказа. М.: ИФЗ РАН, 2014. 256 с.
23. *Фабрициус В.З., Фабрициус З.Е., Шавкань П.В. и др.* Верхнее-Янкульское землетрясение 19 октября 1999 года с Ms = 4.4, Io = 6–7 (Северный Кавказ) // Землетрясения Северной Евразии в 1999 году. Обнинск: ФОП, 2005. С. 311–322.
24. *Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Лутиков А.И., Сущев С.П., Малаева Н.С.* Оценка сейсмического риска на территории Ставропольского края // Геофизические процессы и биосфера. 2022. Т. 21. № 3. С. 111–136.
25. *Шебалин Н.В., Ершов И.А., Шестоперов Г.С., Гехман А.С.* Улучшенный вариант шкалы сейсмической интенсивности (MMSK-86) на базе шкал MSK-64 и МСССС-73 (заключительный отчет). М.: МСССС, ИФЗ, 1986. 61 с.

A POSSIBLE IMPACT OF SCENARIO EARTHQUAKES IN THE CAUCASIAN MINERAL WATERS ZONE

N. I. Frolova[a,#], I. P. Gabsatarova[b,##], V. I. Larionov[a,c], S. P. Suchshev[c,###], N. S. Malaeva[a], and G. Yu. Dontsova[b]

[a] *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

[b] *Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, pr. Lenina, 189, Obninsk, 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 paper analyzes a possible impact of scenario earthquakes in the zones of high seismic hazard in order to justify measures for ensuring population safety by the example of the southern Stavropol krai area. Over the

past twenty years, the Central CisCaucasus region shows elevated seismicity based on the data recorded by the Geophysical Survey RAS network, reporting the occurrence of seismic events within a wide range of magnitudes, $M \geq 1$. One of the last felt events with mb = 4.4 occurred in the studied area on April 1, 2023, producing shaking intensity of 3 to 4 grades on the MSK-64 scale in large resort cities of the region. The parameters for the scenario events are based on the results of detailed seismic zoning (DSZ) and review seismic zoning (RSZ-2016) obtained by the Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS. The Extremum system was used to assess felt effects in resort centers located in the southern Stavropol krai. We analyzed the influence of seismic intensity propagation and the parameters of macroseismic field equation on the assessed impact of the scenario earthquakes. Special attention was paid to the depths of strong and moderate events in the considered area of the Northern Caucasus and to the orientation of macroseismic isoseismals. Pre-calibration of the Extremum system loss models is recommended. Estimates of possible simulated damage due to scenario earthquakes with M=6.0 and M = 5.0 for individual large resort cities of the Kavminvody zone are given. The results can be used in the development of both preventive measures and response plans in case of possible events in the region.

Keywords: *Extremum system*, *zones of possible earthquake generation*, *earthquake effects*, *scenario events*, *Stavropol krai*, *Caucasian Mineral Waters zone*

REFERENCES

1. Akimov, V.A., Zaitsev, V.A., Lar'kov, A.S., Lutikov, A.I. et al. Maps of seismic hazard of the Northwestern and Central Caucasus on a detailed scale. *Voprosy inzhenernoi seismologii,* 2019, vol. 46, no. 4, pp. 57–74. (in Russian)
2. Anan'in, I.V. Seismicity of the Northern Caucasus. Moscow, Nauka Publ., 1977, p. 148. (in Russian)
3. Babayan, T.O., Kuliev, F.T., Papalashvili,V.G., Shebalin, N.V., Vandysheva N.V. Greater Caucasus (50–1974, M ≥ 4.0, I0 ≥ 5). In: New catalogue of strong earthquakes in the USSR territory from ancient ages to 1975. Moscow, Nauka Publ., 1977, pp. 69–170. (in Russian)
4. Gabsatarova, I.P., Devyatkina, L.V., Ivanova, L.E. et al. Suvorovskoe earthquake on July 22, 2006 with KP = = 11.3, I_0^P = 5–6 (Stavropol krai). In: Earthquakes in the Northern Eurasia, 2006. Obninsk, 2012, pp. 340–350. (in Russian)
5. Gabsatarova, I.P., Koroletski, L.N., Ivanova, L.E. et al. Zavetnenskoe earthquake on May 2, 2012 with Kp = = 11.2, Mw_{reg} = 4.3, I_0^P = 5 and Vorovskolesskoe-II earthquake on December 15, 2012 with Kp = 10.8, Mw_{reg} = 4.2, I_0^P = 4 (Stavropol krai). In: Earthquakes of Northern Eurasia 2012]. Obninsk, 2018, pp. 79–94. (in Russian)
6. Zaraiskii, M.P., Dobrychenko, A.V., Kazin, E.A. Novitskaya, N.A. Stavropol earthquake on October 2, 1971. In: Earthquakes in the USSR, 1971. Moscow, Nauka Publ., 1975, pp. 32–35. (in Russian)
7. Kazin, E.A. Caucasian Mineral Waters earthquake on February 28, 1978. In: Seismological bulletin of the Caucasus, 1979. Tbilisi, Metsniereba Publ., 1982, pp. 215–226. (in Russian)
8. Larionov, V.I., Frolova, N.I. [Peculiarities of vulnerability assessment for seismic impacts. In: Natural Hazards of Russia. Vol. 6: Assessment and management of natural risks. A.L. Ragozin, Ed., Moscow, KRUK Publ., 2003, pp. 120-130. (in Russian)
9. Larionov, V.I., Sushchev, S.P., Ugarov, A.N., Frolova, N.I. Seismic risk assessment using GIS technologies. In: [Natural Hazards of Russia. Vol. 6: Assessment and management of natural risks. A.L. Ragozin, Ed., Moscow, KRUK Publ., 2003, pp. 209–231. (in Russian)
10. Larionov, V.I., Frolova, N.I., Ugarov, A.N., Sushchev, S.P. et al. Seismic risk assessment. *Geoekologiya,* 2017, no. 2, pp. 11–26. (in Russian)
11. Lutikov, A.I., Rogozhin, E.A, Ovsyuchenko, A.N. Seismic hazard assessment method at the initial seismicity refinement stage. In: [Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Proc. the 3rd Intern. seismological school. Obninsk, GS RAN Publ., 2008, pp. 81–86. (in Russian)
12. Medvedev, S.V., Shponkhoier, V., Karnik, V. Seismic intensity scale MSK-64. Moscow, MGC AS USSR Publ., 1965, 11 p. (in Russian)
13. Milanovskii, E.E., Rastsvetaev, L.M., Kukhmazov, S.U., Birman, A.S. et al. The latest geodynamics of the Elbrus – Caucasian Mineral Waters region, the Northern Caucasus. In: The Caucasus geodynamics. Moscow, Nauka Publ., 1989, pp. 99–105. (in Russian)
14. Nikonov, A.A. Significant earthquakes and seismic potential of the Caucasian Mineral Waters region (according to macroseismic data). *Fizika Zemli,* 1994, no. 2, pp. 10–19. (in Russian)
15. Nikonov, A.A., Reisner, G.I. Assessment of the seismic potential in the Caucasus with the account of paleoseismological and seismotectonic data. In: Catastrophic processes and their impact on the natural environment. vol. 2. Seismicity. Moscow, Regional Public Organization of Scientists on Applied Geophysics Problems Publ., 2002, pp. 381–400. (in Russian)
16. General seismic zoning of the Russian Federation territory. Explanatory note to the set of OSR-2016 maps and a list of settlements located in seismically active zones. *Inzhenernye izyskaniya,* 2016, no. 7/2016, pp. 49–121. (in Russian)
17. Papalashvili, V.G., Bagramyan, A.Kh., Gotsadze, O.V. The Caucasus Earthquakes. In: Earthquakes in the USSR in 1978. Moscow, Nauka Publ., 1982, pp. 11-19. (in Russian)
18. Reisner, G.I., Ioganson, L.I., Reisner, M.G., Baranov, Yu.E. Typification of the Earth's crust and mod-

ern geological processes. Moscow, IFZ Publ., 1993, 207 p. (in Russian)

19. Rogozhin, E.A. Modern geodynamics and potential sources of earthquakes in the Caucasus region. *Modern mathematical and geological models of the natural environment*, Moscow, OIFZ RAN Publ., 2002, pp. 244–254. (in Russian)
20. Rogozhin, E.A., Nechaev, Yu.V., Solodilov, L.N., Ismail-zade, T.A. The trend in the development of the seismicity of the Caucasus and the seismogenic zones of the Stavropol Territory. *Razvedka i okhrana nedr,* 1998, no. 2, pp. 23–27. (in Russian)
21. Rogozhin, E.A., Lutikov, A.I., Ovsyuchenko, A.N., et al. Evaluation of the seismic hazard of the Northern Caucasus on a detailed scale. *Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii,* 2013, no. 5, pp. 14–19. (in Russian)
22. Rogozhin, E.A., Ovsyuchenko, A.N., Lutikov, A.I., Sobisevich A.L., et al. Endogenous hazards of the Greater Caucasus. Moscow, IFZ RAN Publ., 2014, 256 p. (in Russian)
23. Fabritsius, V.Z., Fabritsius, Z.E., Shavkan', P.V., et al. Upper-Yankul earthquake on October 19, 1999 with Ms = 4.4, Io = 6-7 (Northern Caucasus. In: Earthquakes of Northern Eurasia in 1999. Obninsk, FOP Publ., 2005, pp. 311–322. (in Russian)
24. Frolova, N.I., Gabsatarova, I.P., Lutikov, A.I., Sushchev, S.P., Malaeva, N.S. Seismic risk assessment in the Stavropol krai. *Geofizicheskie protsessy i biosfera,* 2022, vol. 21, no. 3, pp. 111–136. (in Russian)
25. Shebalin, N.V., Ershov, I.A., Shestoperov, G.S., Gekhman, A.S. [An 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)