

СЕЙСМИЧНОСТЬ И ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ  
ОСЕТИНСКОГО СЕКТОРА БОЛЬШОГО КАВКАЗА. ОБЗОР

Б. В. Дзеранов<sup>\*,1,2</sup>, А. Д. Гвишиани<sup>1,3</sup>, Б. А. Дзэбоев<sup>1,2,3</sup>, В. Б. Заалишвили<sup>1,2</sup>,  
А. А. Саяпина<sup>4</sup>, Д. А. Мельков<sup>2</sup>, А. Ф. Габараев<sup>2</sup> и Н. А. Фоменко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Геофизический центр Российской академии наук, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук,  
г. Владикавказ, Россия

<sup>3</sup>Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, г. Москва, Россия

<sup>4</sup>Северо-Осетинский филиал Единой геофизической службы Российской академии наук,  
г. Владикавказ, Россия

\* **Контакт:** Борис Виталиевич Дзеранов, b.dzeranov@gcras.ru

В статье рассмотрен Осетинский сектор Большого Кавказа с точки зрения изучения его сейсмичности и анализа оценок сейсмической опасности, построенных ранее на всех уровнях сейсмического районирования (общего сейсмического районирования (ОСР), детального сейсмического районирования (ДСР) и сейсмического микрорайонирования (СМР)). Обсуждены места возможного возникновения сильных землетрясений, идентифицированные методами распознавания образов. Результаты проведенного анализа подчеркнули высокий уровень сейсмической опасности предгорных и горных территорий региона. Приведено описание сейсмических сетей, осуществляющих непрерывный мониторинг региона. Анализ ранее созданного авторами наиболее представительного каталога землетрясений с унифицированной магнитудной шкалой и пространственных вариаций магнитуды полной регистрации показали, что уровень регистрации сейсмических событий на востоке Осетинского сектора Большого Кавказа все еще хуже, чем в его центральной и западной частях.

**Ключевые слова:** Осетинский сектор Большого Кавказа, сейсмичность, сейсмическая опасность, ОСР, ДСР, СМР, сейсмические сети, каталоги землетрясений, представительность каталога.

**Цитирование:** Дзеранов, Б. В., А. Д. Гвишиани, Б. А. Дзэбоев, В. Б. Заалишвили, А. А. Саяпина, Д. А. Мельков, А. Ф. Габараев и Н. А. Фоменко Сейсмичность и оценки сейсмической опасности Осетинского сектора Большого Кавказа. Обзор // Russian Journal of Earth Sciences. — 2025. — Т. 25. — ES1004. — DOI: 10.2205/2025es000959 — EDN: ORHUOZ

## 1. Введение

В настоящей работе рассматривается Осетинский сектор Большого Кавказа, включающий территорию Республики Северная Осетия – Алания (РСО – Алания), являющуюся основным объектом изучения, и прилегающие к ней районы (рис. 1). РСО – Алания расположена на северных склонах Главного Кавказского хребта и ее территория является частью Центрального сегмента Большого Кавказа, характеризующегося высоким уровнем сейсмической активности. Отметим, что Северный Кавказ в сейсмогеодинамическом отношении является частью Иран–Кавказ–Анатолийского региона, в пределах которого известны разрушительные землетрясения. В статье [Уломов и др., 2007] описываются Кипр–Кавказская и Крым–Копетдагская линейно-амблитные структуры, представляющие сейсмическую опасность для Северного Кавказа и Предкавказья.

<https://elibrary.ru/orhuoz>

Получено: 22 сентября 2024 г.

Принято: 21 ноября 2024 г.

Опубликовано: 21 февраля 2025 г.



© 2025. Коллектив авторов.

Согласно [Рогожин и др., 2004] повторяемость сильных землетрясений в Осетинском секторе составляет 500–1000 лет. В результате палеосейсмологических исследований на основе метода радиоуглеродного датирования сейсмогенных нарушений в горной части РСО – Алания для периода 9 тысяч лет выявлены следы 7 сильных землетрясений с периодом повторяемости от 500 до 3000 лет [Овсюченко и др., 2008].

В рамках реализации Международного проекта «Глобальная программа оценки сейсмической опасности» (Global Seismic Hazard Assessment Program, GSHAP) [Giardini, 1999] для всей территории Кавказа были проведены работы по оценке сейсмической опасности [Balassanian et al., 1999]. Согласно их результатам, в пределах Осетинского сектора возможны сейсмические события с интенсивностью 8–9 баллов.

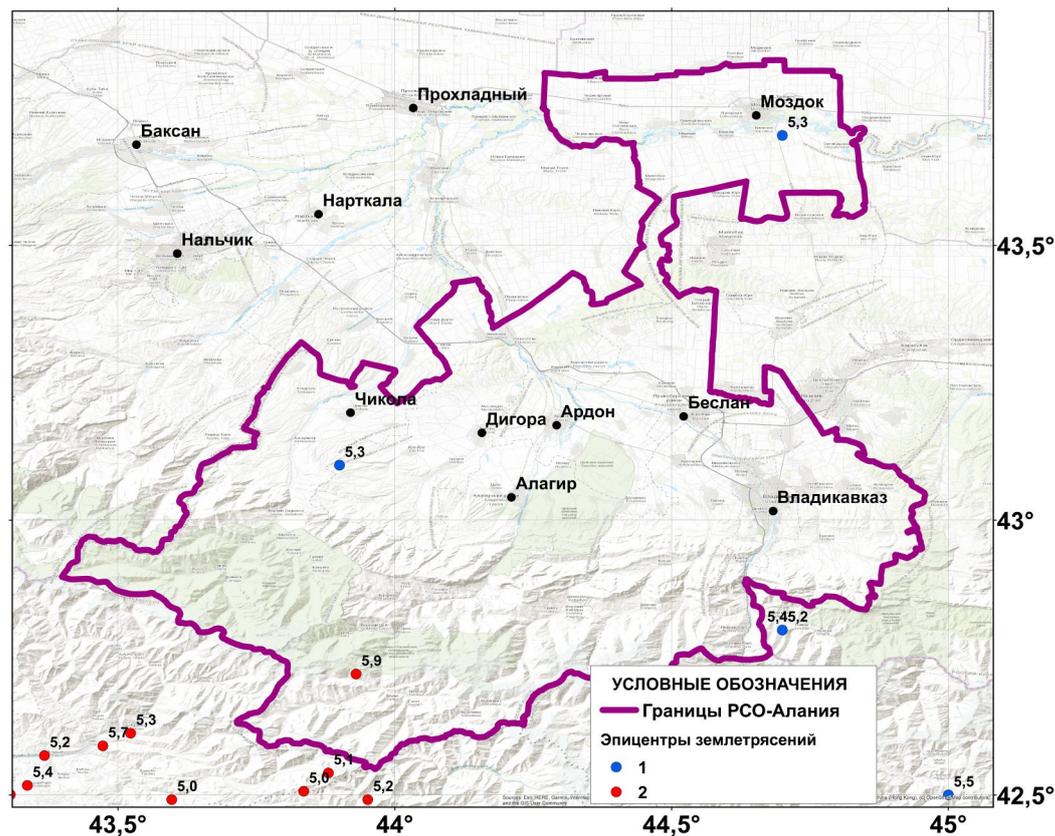


Рис. 1. Осетинский сектор Большого Кавказа и эпицентры землетрясений с  $M \geq 5,0$ : 1 – землетрясения из [Новый..., 1977]; 2 – землетрясения из современных инструментальных каталогов. Цифрами указана магнитуда событий. Черными точками обозначены наиболее крупные города и населенные пункты региона.

Кавказ характеризуется блоковой тектонической структурой с интенсивными вертикальными и горизонтальными движениями и образованием линейных тектонических депрессий, вытянутых вдоль Главного Кавказского хребта. В работах [Татаринов и др., 2024; Kaftan et al., 2024] показана пространственно-временная взаимосвязь подъемов Большого и Малого Кавказа с сильными землетрясениями, очаги которых находятся преимущественно в зонах высоких градиентов скоростей вертикальных движений. С целью детальной идентификации зон градиентов современных движений земной коры Геофизическим центром РАН на территории РСО – Алания в 2023 г. сформирована сеть деформационного ГНСС-мониторинга [Маневич и др., 2024].

Задача адекватной оценки сейсмической опасности РСО – Алания и прилегающих к ней районов заключается в анализе и прогнозе параметров сейсмического воздействия от будущих сильных землетрясений. Настоящая статья посвящена анализу сейсмичности и обзору существующих сегодня оценок сейсмической опасности Осетинского сектора Большого Кавказа.

## 2. Сильные землетрясения

В каталоге [Новый..., 1977] имеется информация о пяти землетрясениях с  $M \geq 5,0$ , произошедших в пределах рассматриваемого нами Осетинского сектора Большого Кавказа (рис. 1). Эпицентры двух событий расположены на территории РСО – Алания – это Терское землетрясение с  $M = 5,3$ , произошедшее в 1688 г. юго-восточнее с. Киевское Моздокского района и Садонское землетрясение 10.02.1929 с  $M = 5,3$ . Эпицентры Дарьяльского землетрясения 14.01.1915 с  $M = 5,4$  и его афтершока 21.01.1915 с  $M = 5,2$  находятся на территории Республики Ингушетия возле села Джейрах. К рассматриваемому нами региону можно отнести и эпицентр Гудамакарского землетрясения 15.08.1947 с  $M = 5,5$  на территории Республики Грузия.

Из инструментально зарегистрированных, начиная с 1962 г., землетрясений с  $M \geq 5,0$  на территории РСО – Алания расположен эпицентр события, произошедшего 29 апреля 1991 г. с  $M = 5,9$  и являющегося афтершоком Рача-Джавского землетрясения [Арефьев и др., 2006]. При этом необходимо отметить, что южнее и юго-западнее РСО – Алания расположены эпицентры нескольких десятков землетрясений с  $M \geq 5,0$ , в большинстве представляющих собой афтершоки Рача-Джавского землетрясения (рис. 1).

Говоря о сильных землетрясениях, произошедших за пределами рассматриваемого (рис. 1) Осетинского сектора, однако оказывающих существенное влияние на его сотрясения, необходимо отметить два события, эпицентры которых расположены на южных склонах Большого Кавказа – само Рача-Джавское землетрясение 1991 г. с  $M = 7,0$ , сопровождавшееся большим количеством афтершоков [Арефьев и др., 2006; Овсяченко и др., 2023; Папалашвили и др., 1997] и Барисакское землетрясение 1992 г. с  $M = 6,4$  [Овсяченко и др., 2023; Gómez et al., 1997]. Заметим, что Рача-Джавское землетрясение является сильнейшим инструментально зарегистрированным сейсмическим событием на территории всего Кавказа [Овсяченко и др., 2023]. В 2009 г. к юго-востоку от границы РСО – Алания произошло Онийское землетрясение с  $M_S = 5,8$ , сопровождавшееся мощным афтершоковым процессом, продолжившимся и в 2010–2011 гг. [Габсатарова и др., 2015]. К востоку от рассматриваемого региона (рис. 1) на территории современной Чеченской Республики в 1976 г. произошло Черногорское землетрясение с  $M = 6,2$  [Керимов и др., 2017] и в 2008 г. Курчалойское землетрясение с  $M_w = 5,8$  [Габсатарова, 2014]. В 1970 г. произошло разрушительное Дагестанское землетрясение с  $M = 6,6$  [Уломов и др., 2007].

## 3. Зоны возникновения очагов землетрясений

В 2006 г. под руководством Е. А. Рогожина была построена детальная карта активных разломов и зон возникновения очагов землетрясений (ВОЗ) для территории РСО – Алания [Рогожин, 2007]. Позже она была обновлена путем сбора новых и уточнения ранее полученных данных о положениях разломов [Рогожин, 2009]. На ней картирован Кармадонский разлом субширотного направления, расположенный южнее г. Владикавказа и имеющий сейсмический потенциал  $M_{\max} = 6,5$ . Кроме этого, уточнено положение западной и восточной ветвей Владикавказского разлома с  $M_{\max} = 6,5$  и  $M_{\max} = 7,1$  соответственно (рис. 2).

Отметим, что при построении карт использовались данные, полученные в 2006–2008 гг. при проведении полевых палеосейсмогеологических работ. Они позволили выявить очевидные следы древних сейсмических катастроф – палеосейсмодислокации. Последние представлены, прежде всего, грандиозными обвалами, оползнями и древними сейсмическими разрывами, структурно приуроченными к зонам разломов, демонстрирующих признаки молодой геологической активности. Сейсмические сотрясения в прошлом были локализованы в достаточно узких зонах на активизированных участках известных разломов, образующих Владикавказскую и Кармадонскую зоны ВОЗ. Датирование сейсмогенных нарушений рельефа радиоуглеродным методом позволило восстановить возраст древних сейсмических катастроф [Рогожин, 2009].

Перечень выделенных зон ВОЗ, их глубина и кинематика приведены в табл. 1 [Рогожин, 2009]. Максимальная магнитуда ожидаемых землетрясений (сейсмический потенциал,  $M_{max}$ ) оценивалась на основе внерегионального сейсмотектонического метода оценки сейсмической опасности, предложенного Г. И. Рейснером [Рейснер и Иогансон, 1997; Рогожин и др., 2001]. Заметим, что для выделенных зон ВОЗ наблюдается общее увеличение сейсмического потенциала с севера на юг. Здесь необходимо особо подчеркнуть, что наибольшую опасность для урбанизированных территорий РСО – Алания представляют Владикавказская, Терская, Сунженская и Моздокская зоны ВОЗ (рис. 2, табл. 1).

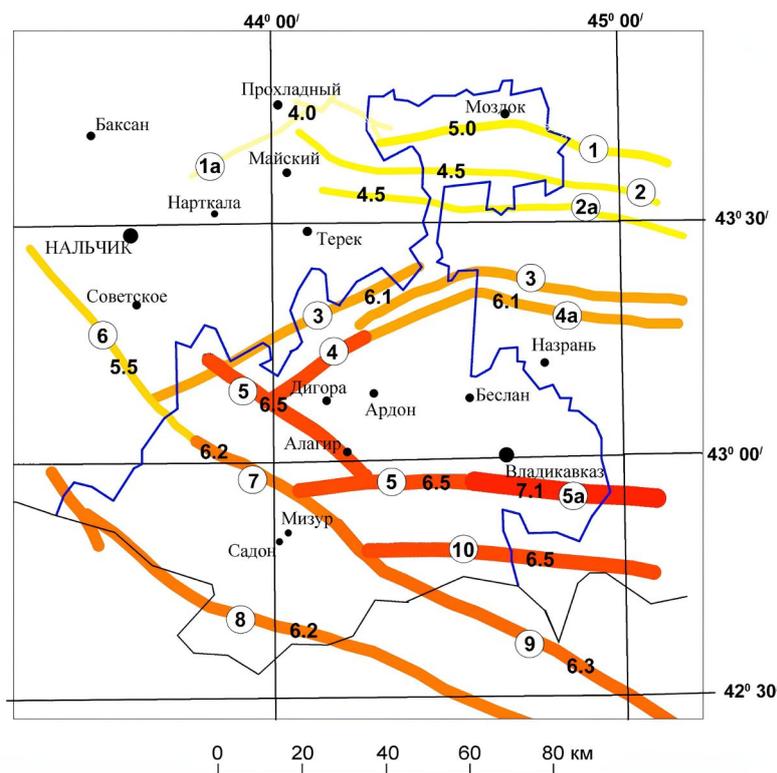


Рис. 2. Карта зон возникновения очагов землетрясений по [Рогожин, 2009].

Таблица 1. Зоны ВОЗ по [Рогожин, 2009]

№	Зона ВОЗ	$M_{max}$	$H$ , км	Кинематика
1	Моздокская восточная	5,0	10	взброс
1а	Моздокская западная	4,0	5	сдвиг
2	Терская северная	4,5	5	взброс
2а	Терская южная	4,5	5	взброс
3	Сунженская северная	6,1	15	взброс
4	Сунженская южная (западная ветвь)	6,5	15	сдвиг
4а	Сунженская южная (восточная ветвь)	6,1	15	взброс
5	Владикавказская (западная ветвь)	6,5	15	взброс
5а	Владикавказская (восточная ветвь)	7,1	20	взброс
6	Нальчикская	5,5	10	сдвиг
7	Мизурская	6,2	15	сдвиг
8	Главного хребта	6,2	15	взброс
9	Бокового хребта	6,3	15	взброс
10	Кармадонская	6,5	15	взброс

#### 4. Общее сейсмическое районирование

Карты Общего сейсмического районирования (ОСР) территории Российской Федерации являются базовой основой градостроительной деятельности в нашей стране [СИ 14.13330.2018, 2018]. Современные карты ОСР (ОСР-97, ОСР-2012, ОСР-2014, ОСР-2015, ОСР-2016) построены на основе вероятностной методики PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Assessment) [Cornell, 1968; Ulomov, 1999]. Отметим, что комплекты карт ОСР-97, ОСР-2015 и ОСР-2016 в разные периоды были приняты в качестве нормативных. В работе [Шебалин и др., 2022] показано, что карты ОСР-2015 и ОСР-2016 в значительной мере повторяют ОСР-97 и фактически лишь учитывают те пропуски сильных землетрясений, которые допущены в ОСР-97. При этом, в процессе развития карт ОСР, несмотря на снижение балльности отдельных территорий, в целом площади зон соответствующей балльности менялись незначительно.

На рис. 3 показаны фрагменты карт ОСР-97А, ОСР-2015А и ОСР-2016А, предназначенных для массового строительства, в Осетинском секторе Кавказа. Изучаемый регион расположен в 8–9-балльных зонах. При этом на картах ОСР-97А и ОСР-2015А вся горная и предгорная части отнесены к 9 баллам. В свою очередь, на карте ОСР-2016А 9-балльная зона сокращается примерно вдвое, и южная оконечность РСО – Алания становится 8-балльной. Подчеркнем, что наиболее крупные населенные пункты и города расположены в пределах 8-балльных зон. Важно отметить, что столица РСО – Алания г. Владикавказ на картах ОСР-97А и ОСР-2015А расположен в непосредственной близости от 9-балльной зоны.

Отметим, что на картах ОСР-97В, ОСР-2015В и ОСР-2016В регион также относится к 8–9-балльным зонам, но уже с существенным преобладанием 9-балльных (в меньшей мере на ОСР-2016В). На картах ОСР-97С, ОСР-2015С и ОСР-2016С рассматриваемый регион Кавказа относится к 9–10-баллам. При этом города Владикавказ и Алагир расположены на границе 9- и 10-балльных зон.

В работе [Шебалин и др., 2022] проведено сравнение площади зон ожидаемой балльности на карте ОСР-97А с площадью изосейст от землетрясений, произошедших после публикации карты. На фоне отмеченного выше значительного сходства комплектов карт ОСР-97, ОСР-2015 и ОСР-2016 было показано, что на Северном Кавказе оценка сейсмической опасности, отраженная на карте ОСР-97А, в среднем завышена как минимум на один порядок.

#### 5. Детальное сейсмическое районирование

В работе [Заалишвили и др., 2011] на основе анализа сейсмологических, геологических и геофизических данных для территории РСО – Алания построен комплект карт детального сейсмического районирования (ДСР). Комплект представляет собой набор вероятностных карт сейсмической опасности, отражающих ожидаемые превышения пиковых горизонтальных ускорений и макросейсмической интенсивности с вероятностью 1%, 2%, 5% и 10% и повторяемостью 50 лет.

При построении карт авторами использовалась методология вероятностной оценки сейсмической опасности, предложенная Корнеллом в 1968 году и опирающаяся на предположение, что сейсмичность подчиняется Пуассоновскому распределению [Cornell, 1968; McGuire, 2004]. Другими словами, используемый каталог землетрясений не должен содержать зависимые (форшоки, афтершоки и рои землетрясений) события [Musson, 1999]. Параметры зон ВОЗ брались из [Рогожин, 2002, 2009]. Использовались данные по значимым землетрясениям Кавказа, а также горизонтальные ускорения и спектры реакции, полученные на основе записей сильных движений (ускорений). При расчетах использовалась компьютерная программа SEISRisk-3 [Bender and Perkins, 1987].

В статье [Заалишвили и др., 2011] обоснована необходимость использования карт 5%-й вероятности для массового (основного строительства), а карт 2%-й вероятности – для строительства объектов повышенной ответственности (рис. 4). Так, согласно им, большая часть территории РСО – Алания расположена в 7 и 8-балльных зонах (рис. 4а). Небольшие 6-балльные области расположены на севере и западе Республики.

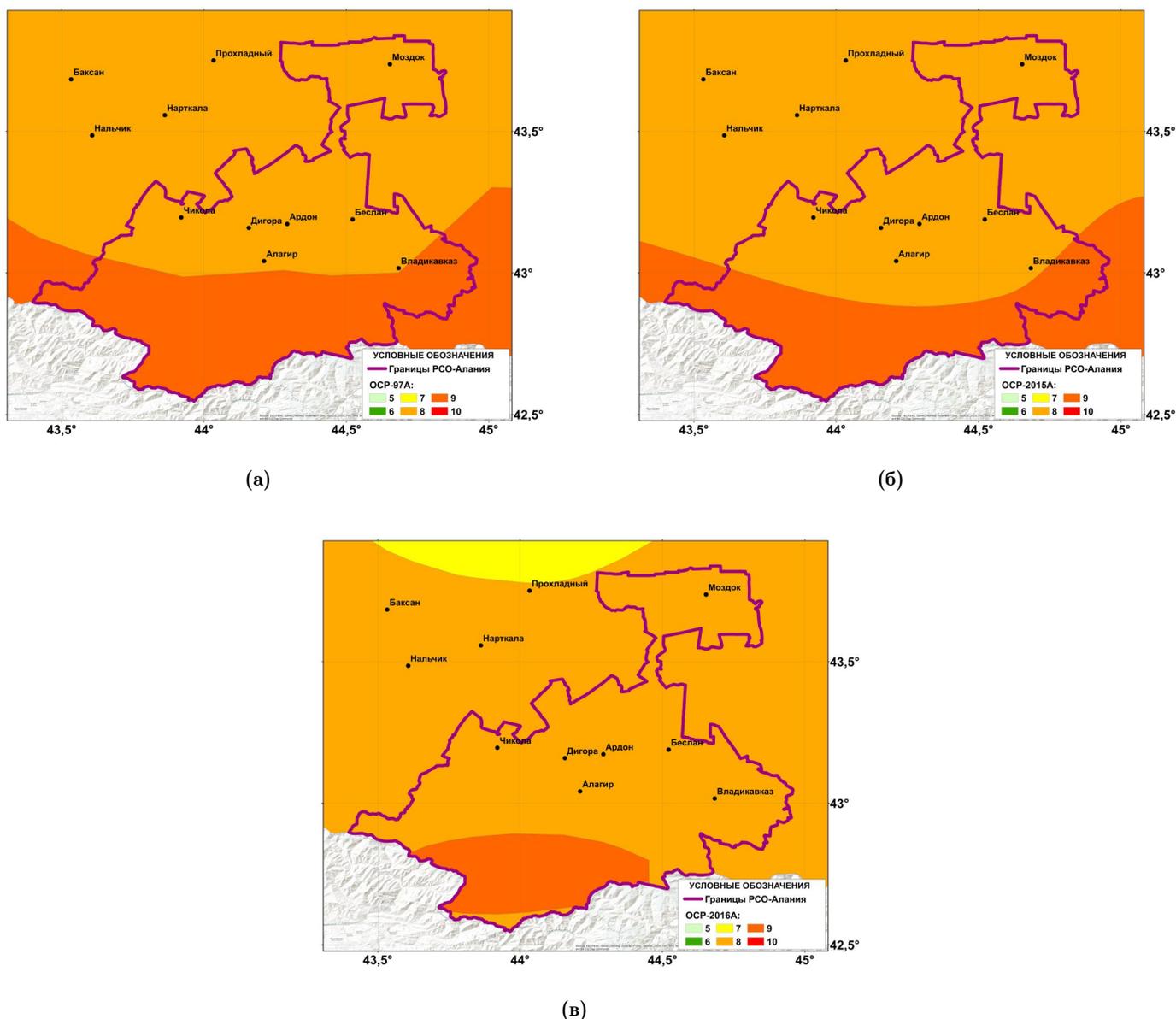


Рис. 3. Карты Общего сейсмического районирования: а) ОСП-97А; б) ОСП-2015А; в) ОСП-2016А.

Южнее г. Владикавказа имеются две 9-балльные зоны, приуроченные к восточной ветви Владикавказской зоны ВОЗ и Бокового хребта.

В работе [Рогожин и др., 2013] для территории всего Северного Кавказа построен комплект карт ДСР (А – 10%, В – 5%, С – 1%) в единицах макросейсмической интенсивности с шагом 0,5 балла. На карте ДСР-А более половины территории РСО – Алания расположено в пределах зон интенсивностью 7,5–8,0 баллов (рис. 5а). При этом почти все города и наиболее крупные населенные пункты всего рассматриваемого сектора Большого Кавказа расположены в зонах 8,0–8,5-балльности или в непосредственной близости от них.

На карте ДСР-В (рис. 5б) почти вся территория РСО – Алания представлена зоной 8,0–8,5 баллов. Здесь необходимо особо отметить, что при существующих различиях с 5%-й картой из [Заамлишвили и др., 2011] (рис. 4а) г. Владикавказ в обоих случаях был отнесен к зоне, где возможно проявление сейсмических событий интенсивностью более 8 баллов. На карте ДСР-С (рис. 5в) почти весь рассматриваемый регион отнесен к зоне с ожидаемой интенсивностью 8,5–9,0 баллов.

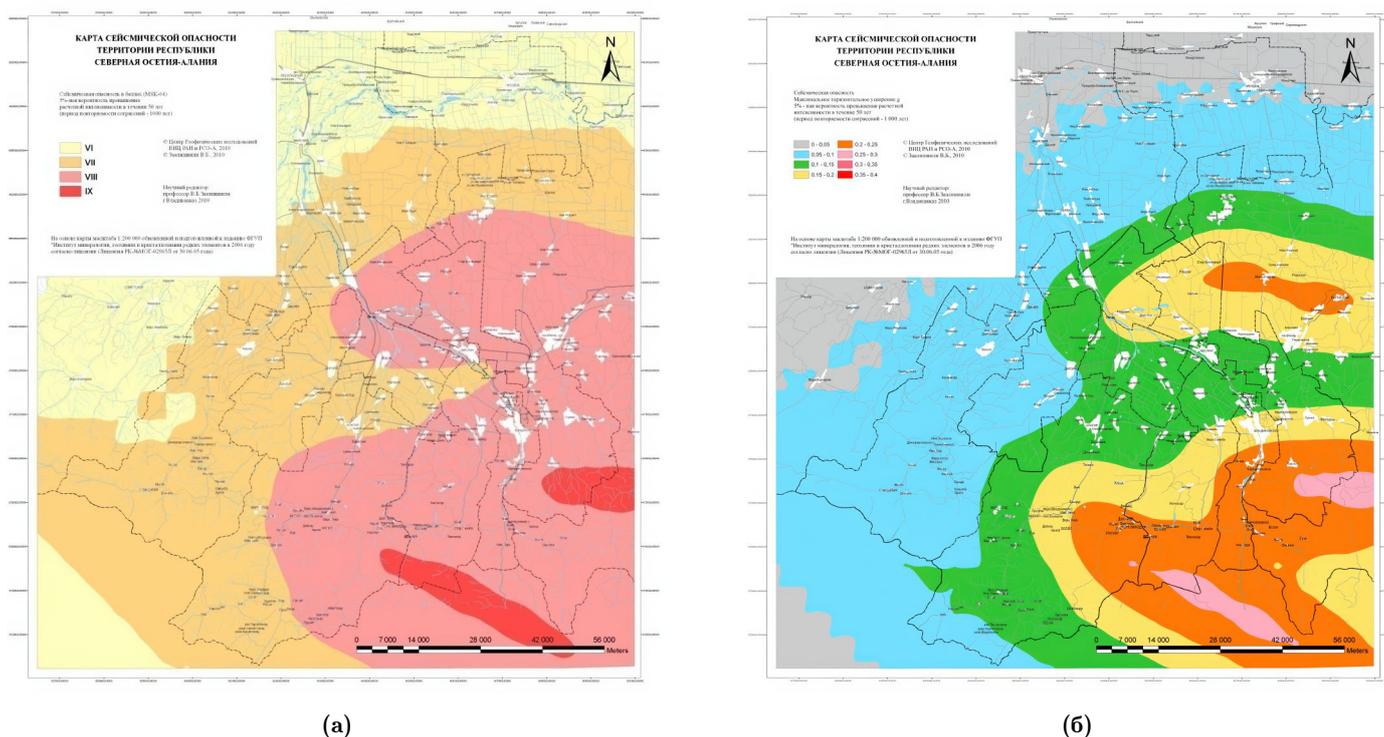


Рис. 4. Карты ДСР территории РСО – Алания с 5% вероятностью превышения: а) в единицах макросейсмической интенсивности; б) в единицах пиковых горизонтальных ускорений.

Некоторые оценки сейсмической опасности уровня ДСР для территории Кавказа можно найти и в работах В. И. Уломова, в которых рассматриваемый нами Осетинский сектор отнесен к зонам с возможностью проявления сейсмических событий интенсивностью 8–9 баллов [Уломов и др., 2007].

### 6. Сейсмическое микрорайонирование

В работах сотрудников Геофизического института Владикавказского научного центра Российской академии наук (ГФИ ВНИЦ РАН) созданы карты сейсмического микрорайонирования (СМР) [Алешин, 2010; Заалишвили, 2000; Salsabili et al., 2021; Yamín et al., 2018] территорий городов и наиболее крупных населенных пунктов РСО – Алания [Заалишвили и др., 2012]. При расчете ожидаемой интенсивности сотрясений учитывались инженерно-геологические, гидрогеологические и геоморфологические условия. При этом для целей уточнения параметров грунтовой толщи был проведен комплекс полевых работ, включающий сейсморазведочные [Вертаховская и Пилипенко, 2018; Гамбурцев, 1959; Шнеерсон, 2019], электроразведочные и георадарные исследования [Замятин, 2006]. Отметим, что комплекс исследований по построению карт сейсмической опасности населенных пунктов РСО – Алания базировался на использовании инструментального и инструментально-расчетного методов СМР [Заалишвили, 2009].

Карты СМР городов и населенных пунктов построены в масштабе 1:10 000. Отметим, что центральная часть столицы РСО – Алания города Владикавказ расположена в пределах зон, отнесенных к 7 и 8-балльной интенсивности (рис. 6а). При этом вдоль западной и восточной окраин города выделены 9-балльные зоны. В пределах последних картированы границы распространения глинистых грунтов текучей консистенции, которые могут быть подвержены просадочности при сильных сейсмических воздействиях.

Территории городов Алагир (рис. 6б) и Беслан (рис. 6в) представлены зонами с интенсивностью 7, 8 и 9 баллов, а г. Дигора 8–9 баллов (рис. 6г). Вся территория г. Моздок отнесена к 9-балльной зоне.

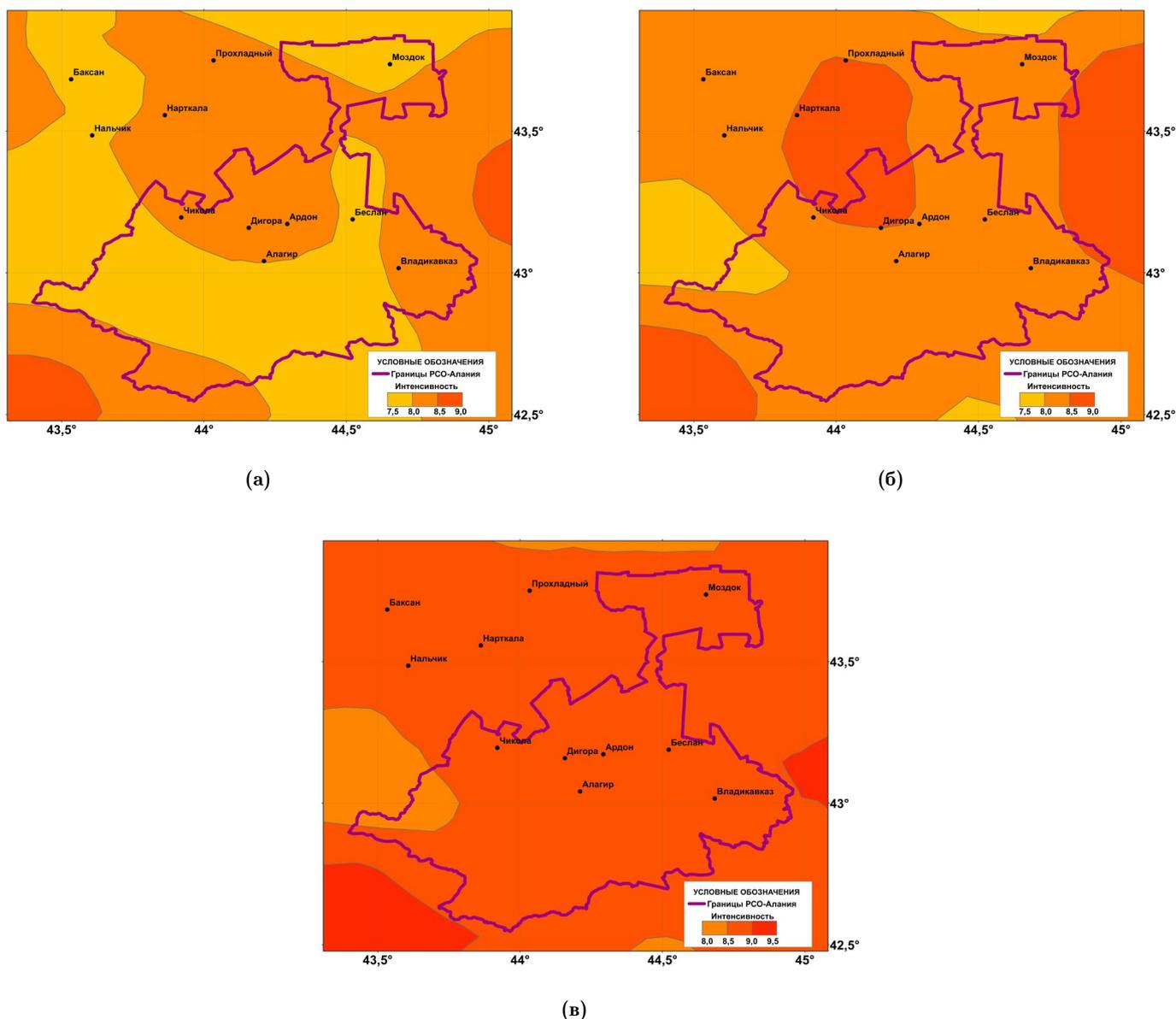


Рис. 5. Карты ДСР Северного Кавказа [Рогожин и др., 2013]: а) 10%, б) 5%, в) 1%.

### 7. Места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6,0$

Одной из основополагающих компонент сейсмического районирования является определение районов, в пределах которых могут возникать сильные землетрясения. Начиная с 1970-х эффективным инструментом их идентификации являются методы распознавания образов [Гвишиани и др., 2020; Гельфанд и др., 1972, 1973; Dzeboev et al., 2020]. В работах академиков СССР И. М. Гельфанда и В. И. Кейлис-Борока, академика РАН А. Д. Гвишиани и чл.-корр. РАН А. А. Соловьева создан и развит подход, получивший название ЕРА (Earthquake-Prone Areas) [Гвишиани и др., 1988, 2020; Gorshkov and Soloviev, 2021]. Он позволяет, используя в качестве объектов распознавания морфоструктурные узлы или пересечения осей морфоструктурных линейментов [Алексеевская и др., 1977; Гвишиани и др., 1986; Горшков, 2010; Alekseevskaya et al., 1977], определять места возможного возникновения сильных ( $M \geq M_0$ ) землетрясений. История более полувекового применения ЕРА в целом ряде горных стран мира показала его высокую эффективность. Около 90% эпицентров сильных землетрясений, произошедших после выполнения распознавания, расположены в районах, идентифицированных ЕРА как высокосейсмичные [Соловьев и др., 2014; Gorshkov and Novikova, 2018].

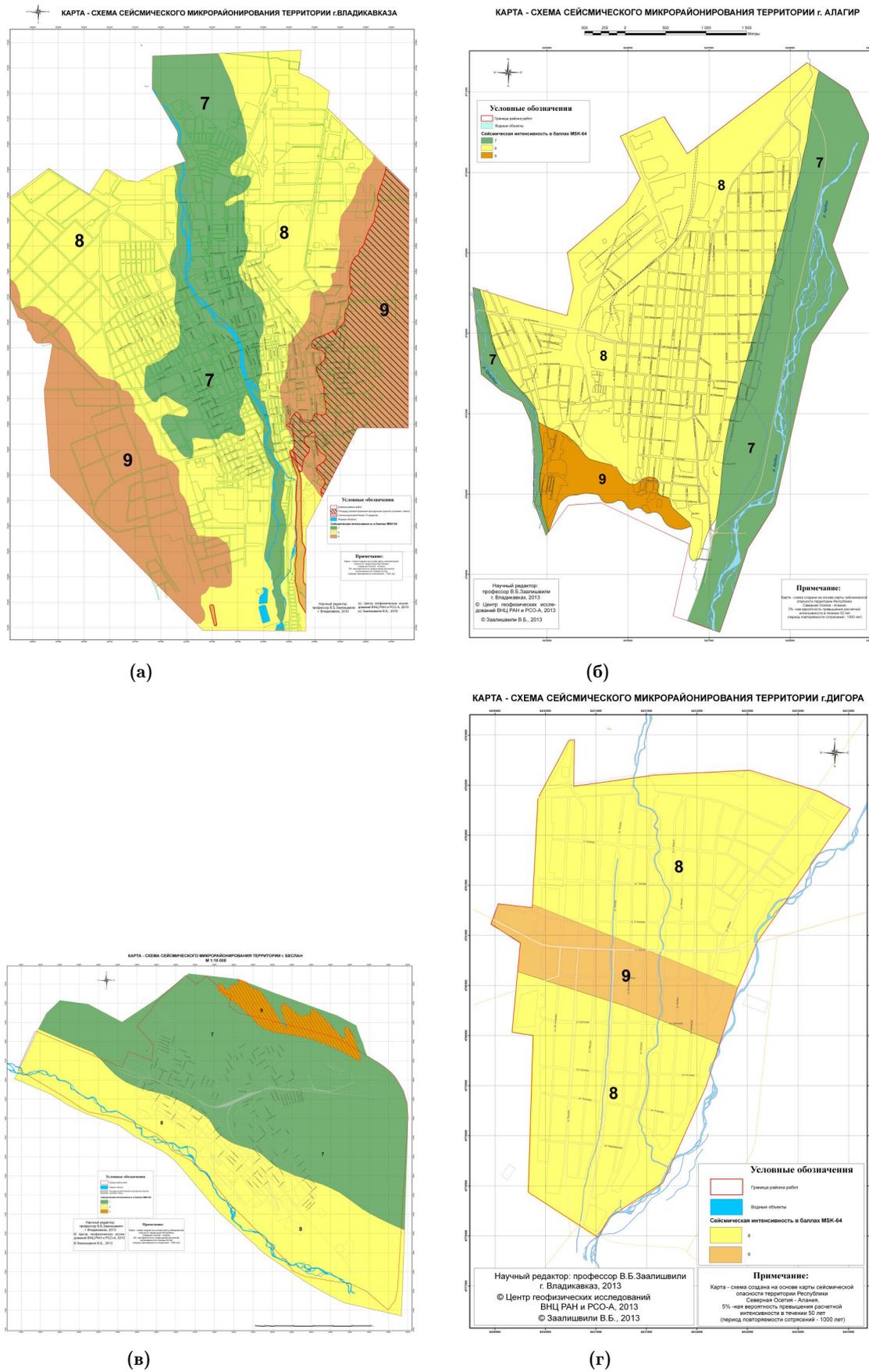


Рис. 6. Карты СМР: а) г. Владикавказ; б) г. Алагир; в) г. Беслан; г) г. Дигора [Заалишвили и др., 2012].

В ЕРА для классификации объектов распознавания на те, в окрестности которых могут или не могут возникать сильные землетрясения, в подавляющем большинстве случаев используется алгоритм «Кора-3». В его основе лежит формирование двух обучающих выборок – высоко- и низкосейсмичного классов. Результатом работы алгоритма «Кора-3» является разбиение множества объектов распознавания на два непересекающихся класса и решающее правило, на основании которого это разбиение реализовано [Гвишиани и др., 1988, 2020].

В середине 2010-х в работах академика РАН А. Д. Гвишиани, С. М. Агаяна и Б. А. Дзержанова с целью повышения достоверности результатов распознавания мест возможного возникновения землетрясений предложен принципиально новый алгоритм «Барьер-3». Обучение в последнем осуществляется по единственному высокосейсмичному классу, что позволяет избежать асимметричности обучения, связанного с потенциальными ошибками в обучающей выборке низкосейсмичного класса [Dzheboev et al., 2021]. Сегодня «Барьер-3» может эффективно использоваться в ЕРА [Гвишиани и др., 2017; Дзержанов и др., 2019].

На рис. 7 показаны места возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 6,0$  в Осетинском секторе Большого Кавказа, идентифицированные методом ЕРА с использованием в качестве блока распознавания алгоритмов «Кора-3» (эллипсы с красной штриховкой) [Соловьев и др., 2016] и «Барьер-3» (эллипсы с синими границами) [Dzheboev et al., 2019]. Результаты, полученные двумя алгоритмами, почти идентичны. Заметим, что города Владикавказ и Алагир расположены на линеаменте I-го ранга, являющемся границей горной страны.

Восточная (включая г. Владикавказ), юго-восточная, западная и юго-западная части изучаемого региона (почти вся территория, попадающая внутрь схемы морфоструктурного районирования (МСР), за исключением центральной части) расположены в районах, где согласно результатам распознавания могут возникать землетрясения с  $M \geq 6,0$ . За исключением события в районе г. Моздок, произошедшего за пределами схемы МСР, эпицентры всех землетрясений с  $M \geq 5,0$  расположены внутри идентифицированных зон. Отметим, что совокупность распознанных высокосейсмичных зон, расположенных на поперечном линеаменте II-го ранга (западная часть рассматриваемого региона), образует в пределах Транскавказского поперечного поднятия субмеридиональную зону, соединяющую места возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 6,0$  на Большом и Малом Кавказе.

## 8. Сейсмический мониторинг

Сейсмический мониторинг Осетинского сектора Большого Кавказа осуществляют Федеральный исследовательский центр Единая геофизическая служба Российской академии наук (ФИЦ ЕГС РАН) и Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук (ГФИ ВНЦ РАН).

На территории изучаемого региона в настоящее время функционируют 14 пунктов непрерывного сейсмологического мониторинга (рис. 8), находящихся под управлением Северо-Осетинского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СОФ ФИЦ ЕГС РАН). Три из них представляют собой телесеизмические станции, оборудованные высокочувствительными широкополосными велосиметрами, тогда как остальные 11 являются региональными станциями с короткопериодной аппаратурой [Саяпина и др., 2023]. Кроме того, в рассматриваемом Осетинском секторе расположена телесеизмическая станция «Нальчик», находящаяся в ведении Центрального отделения ФИЦ ЕГС РАН.

Все указанные пункты оснащены современными цифровыми системами регистрации и защищены надежными каналами передачи данных в региональный информационно-обрабатывающий центр во Владикавказе. Это позволяет осуществлять сейсмический мониторинг в условиях, приближенных к режиму реального времени. Сейсмическая сеть СОФ ФИЦ ЕГС РАН позволяет регистрировать сейсмические события, происходящие на территории РСО – Алания и в прилегающих районах, а также

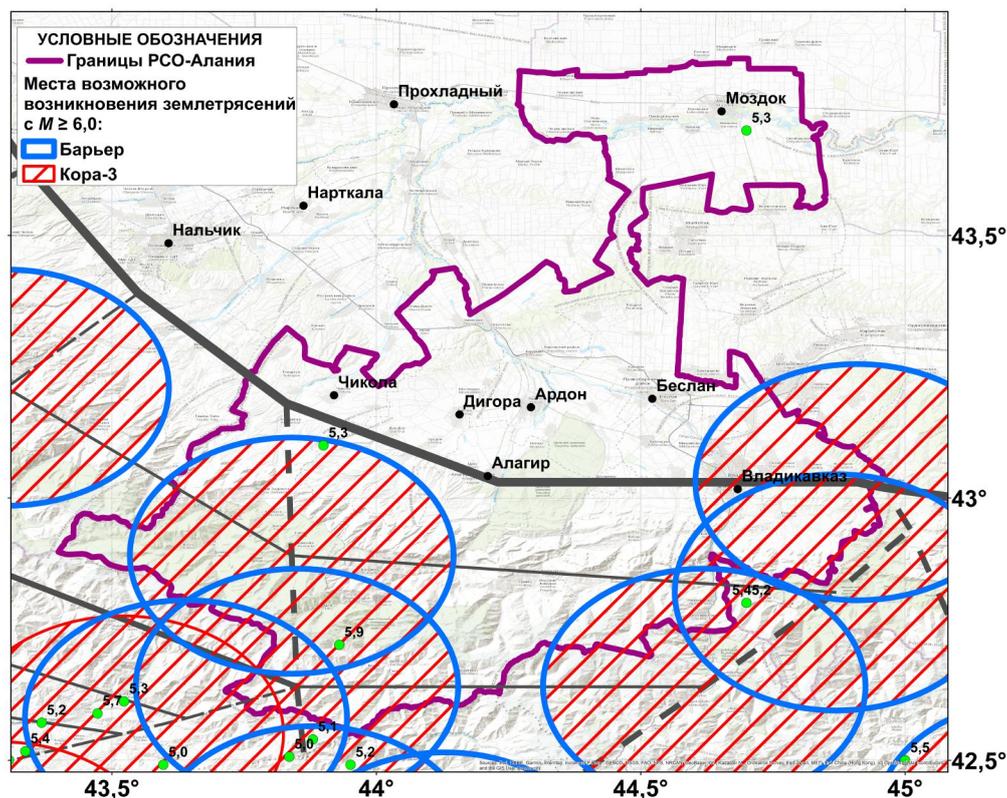


Рис. 7. Схема морфоструктурного районирования [Соловьев и др., 2013] и места возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 6,0$  в Осетинском секторе Большого Кавказа. Темно серые линии – морфоструктурные линеаменты: толстые – I-го ранга, средние – II-го ранга, тонкие – III-го ранга, сплошными линиями показаны продольные линеаменты, пунктирными – поперечные. Зеленые точки – эпицентры землетрясений с  $M \geq 5,0$  [Новый..., 1977; Vorobieva et al., 2023].

Южной Осетии и приграничной полосы Грузии. На рис. 8 приведены регистрационные возможности системы наблюдений с учётом геометрической конфигурации сети и среднего уровня микросейсмического шума на её станциях [Багаева и др., 2022]. Оконтуренные изолиниями области соответствуют минимальной величине магнитуд надёжно регистрируемых землетрясений со средней глубиной гипоцентра 10 км, при условии их фиксации не менее чем тремя сейсмическими станциями одновременно. Область наибольшей чувствительности сети приходится на центральную часть РСО – Алания с наибольшей плотностью сейсмических станций; её окаймляет изолиния  $M_{\min} = 1,2$ . Практически для всей территории Осетинского сектора Большого Кавказа сеть обеспечивает уверенную регистрацию событий с  $M_{\min} = 1,6$ .

Необходимо отметить, что пять пунктов сейсмологических наблюдений оснащены современными ГНСС-приемниками, формирующими сеть непрерывного геодинамического мониторинга [Сдельникова и др., 2023], два из которых эксплуатируются совместно с Владикавказским научным центром Российской академии наук. Последнее позволяет говорить о комплексном геофизическом мониторинге, осуществляемом СОФ ФИЦ ЕГС РАН.

Под управлением ГФИ ВЦ РАН функционируют две сети сейсмического мониторинга: сеть комплексных наблюдений «Кармадонский параметрический полигон», состоящая из 6 сейсмических станций (рис. 8) и сеть «Владикавказ» (4 станции) [Замливили и др., 2014]. Станции последней расположены на участках с различными грунтовыми условиями, типичными для территории г. Владикавказ, что позволяет

использовать их данные для оценки влияния грунтовых условий на формирование интенсивности и спектрального состава землетрясений. Сеть «Кармадонский параметрический полигон» создана для целей мониторинга опасных геологических процессов на территории РСО – Алания [Заалишвили и Мельков, 2017]. Здесь необходимо отметить станцию «Колка» (KLK, рис. 8), установленную в 2012 году на высоте 2970 метров вблизи ложа ледника Колка, катастрофический сход которого в 2002 году подробно описан в многочисленной литературе [Котляков и др., 2014; Ледник..., 2014; Панов и др., 2002].

Как видно из рис. 8 сейсмические сети ФИЦ ЕГС РАН и ГФИ ВНИЦ РАН незначительно дублируют друг друга.

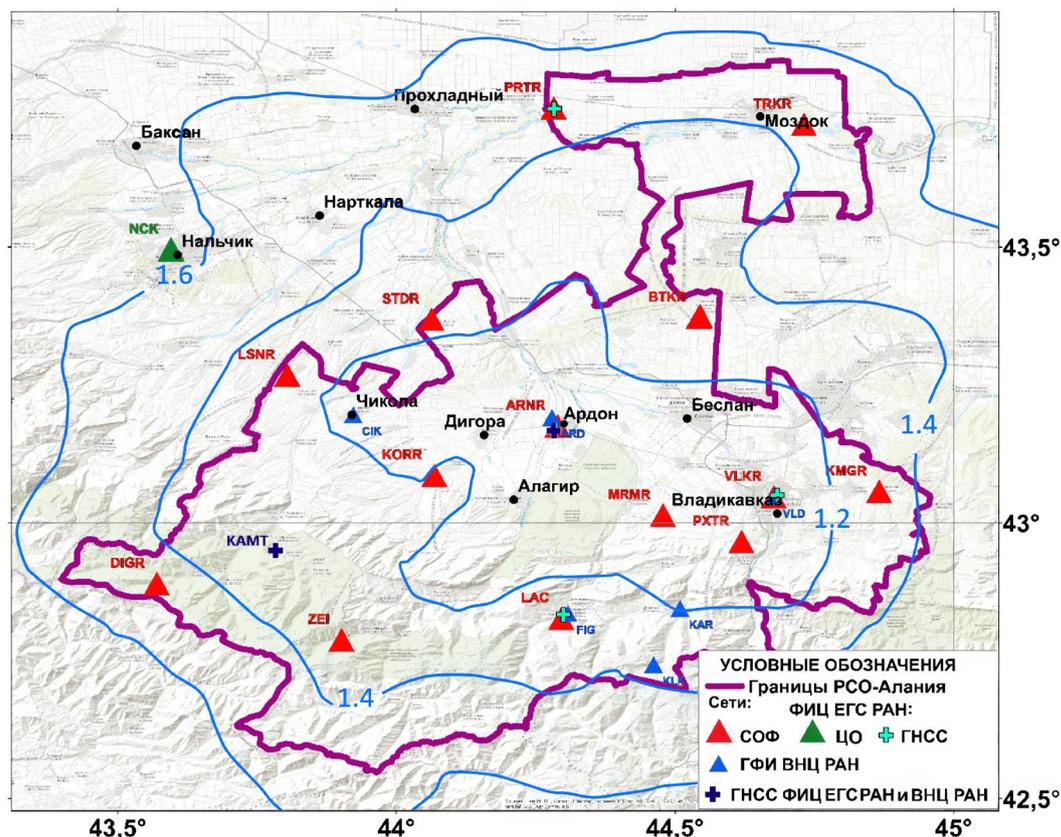


Рис. 8. Мониторинговые сети ФИЦ ЕГС РАН (синими изолиниями показаны регистрационные возможности сети) и ГФИ ВНИЦ РАН («Кармадонский параметрический полигон»).

## 9. Объединенный каталог землетрясений

В работе [Гвишиани и др., 2024] показано, что до настоящего времени остается не до конца решенной задача создания, для изучаемого сейсмоактивного региона, наиболее полного представительного каталога землетрясений с однородной магнитудной шкалой. Связано это, в том числе, с тем, что информация о слабых землетрясениях преимущественно содержится в региональных каталогах и не включается в национальные и международные каталоги в которых хорошо отражены сильные события. Так, например, для изучаемого нами Осетинского сектора Большого Кавказа в каталоге Международного сейсмологического центра (ISC) отсутствует значительная часть слабых событий, информация о которых содержится в региональном каталоге ФИЦ ЕГС РАН, подготавливаемом, в первую очередь, Северо-Осетинским филиалом.

В статье [Vorobieva et al., 2022] путем модификации классического метода ближайшего соседа [Zaliapin and Ben-Zion, 2013, 2016] создан инновационный метод системного

интегрирования каталогов землетрясений. Он позволяет эффективно идентифицировать и удалять образующиеся при объединении каталогов дубли, а также приводить события к единой магнитудной шкале. С его помощью в работе [Vorobieva et al., 2023] создан наиболее полный и представительный интегральный каталог землетрясений Осетинского сектора Большого Кавказа с унифицированной магнитудной шкалой. Каталог создан для региона несколько большего, чем рассматриваемый в настоящей работе (рис. 9), и интегрирует данные о землетрясениях из:

- Каталог Кавказа из сборников «Землетрясения в СССР», 1962–1991 гг.
- Каталог Северного Кавказа из сборников «Землетрясения северной Евразии», 1992–2017 гг., и «Землетрясения России», 2018–2021 гг.
- Каталог Грузии из сборников «Землетрясения северной Евразии», 1993–2004 гг.
- Каталог землетрясений Кавказа из сборников «Сейсмический бюллетень Кавказа», 1971–1986 гг., подготавливаемый под научно-методическим руководством Института геофизики АН Грузинской ССР (сегодня Институт геофизики им. М. Нодия).
- Каталог международного сейсмологического центра (ISC), 1962–2022 гг.

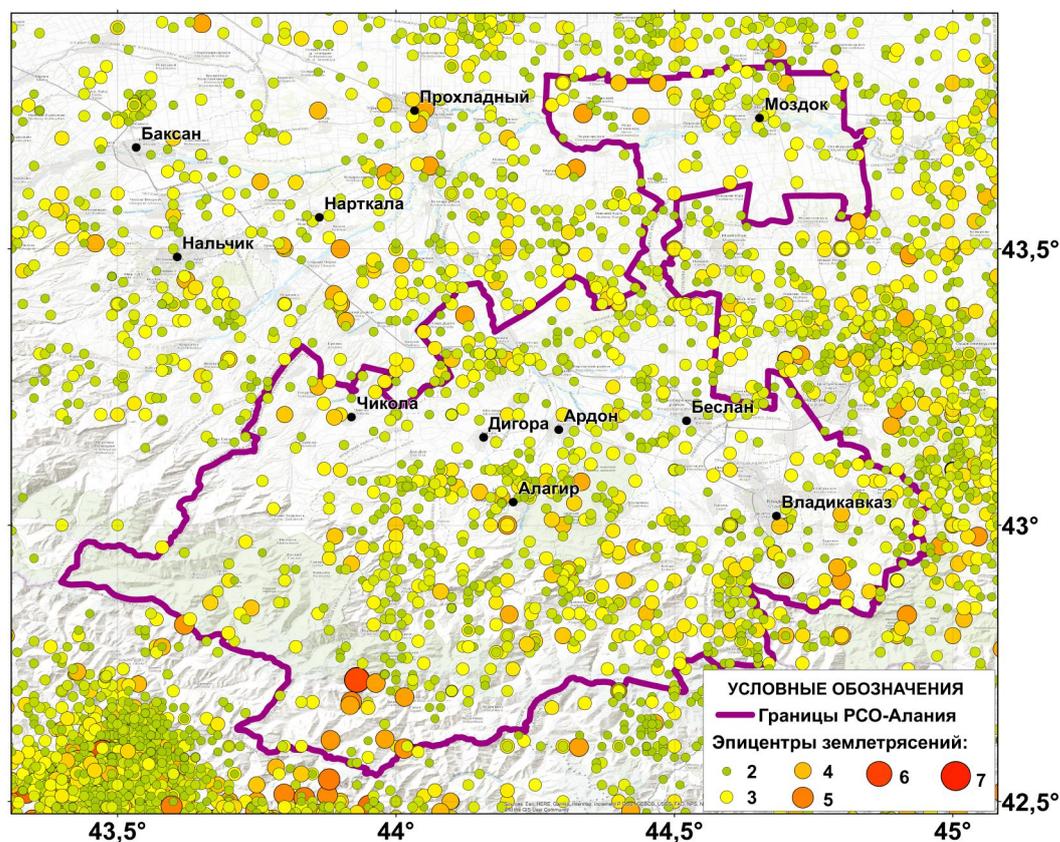


Рис. 9. Интегральный каталог землетрясений ( $M \geq 2,0$ ) Осетинского сектора Большого Кавказа.

Интегральный каталог землетрясений содержит 16 285 событий за период 1962–2022 гг. (рис. 9). При этом авторская унифицированная магнитудная шкала, сведенная к ргоху- $M_w$ , является однородной. Каталог выложен в открытый доступ на сайте Мирового центра данных по физике твердой Земли (<http://www.wdcb.ru/sep/seismology/Ossetia/Ossetia.html>, дата обращения: 14.08.2024).

Необходимо отметить, что в ходе создания объединенного каталога Осетинского сектора Большого Кавказа существенно пополнено начало афтершоковой последовательности Рачинского землетрясения [Обвюченко и др., 2023]. Анализ каталога показал, что в рассматриваемом регионе уровень регистрации существенно изменялся во времени: значительный недостаток событий в 1967–1970 гг. и 1988–1991 гг. [Vorobieva

*et al.*, 2023]. На рис. 10 показана магнитуда полной регистрации  $M_c$  в 1995–2004 гг. и 2005–2022 гг., рассчитанная с помощью высококонтрастного метода [Vorobieva *et al.*, 2024]. Отметим, что уровень регистрации сейсмических событий на востоке региона все еще хуже, чем в его центральной и западной частях. Вероятно, это связано с малым количеством пунктов сейсмического мониторинга восточнее границ изучаемого нами Осетинского сектора.

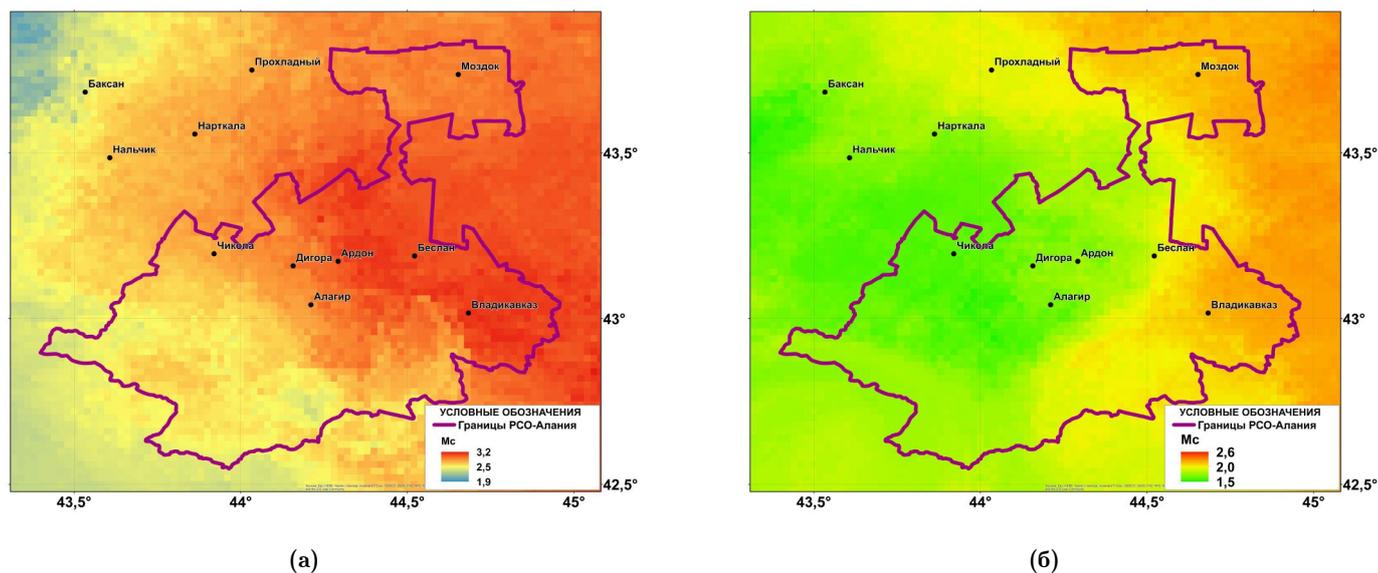


Рис. 10. Магнитуда полной регистрации  $M_c$ : а) пространственные вариации 1995–2004 гг.; б) пространственные вариации 2005–2022 гг.

## 10. Обсуждение и выводы

В статье рассмотрен Осетинский сектор Большого Кавказа с точки зрения различных подходов изучения его сейсмичности и оценок сейсмической опасности, в частности – на всех уровнях сейсмического районирования (ОСР, ДСР и СМР). Проведенный совместный анализ подтвердил высокий уровень сейсмической опасности рассматриваемого региона в, первую очередь, его предгорных и горных районах. Последнее подтверждается и результатами определения мест возможного возникновения землетрясения с  $M \geq 6,0$  (рис. 7).

Комплексный анализ результатов различных подходов демонстрирует наибольшую сейсмическую опасность зоны сочленения Восточной и Западной ветвей Владикавказского разлома (рис. 2). Существенную опасность представляют и сейсмогенерирующие структуры, расположенные южнее границ Осетинского сектора. В пределах последних произошли Рача-Джавское, Барисахское, Онийское и др. сильные землетрясения, существенные сотрясения от которых ощущались на всем Северном Кавказе.

С другой стороны, результаты работы [Шебаллин *и др.*, 2022] показывают, что несмотря на снижение общей балльности при переходе от ОСР-97 к ОСР-2016 существуют основания считать оценку сейсмической опасности Осетинского сектора Большого Кавказа на картах ОСР завышенной. В этой связи может быть интересным и полезным исследование, направленное на верификацию произошедшими и будущими землетрясениями существующих для рассматриваемого региона карт ДСР.

Впервые созданный наиболее полный и представительный каталог землетрясений региона [Vorobieva *et al.*, 2023] (рис. 9) и проанализированные на его основании пространственно-временные вариации полной регистрации  $M_c$  (рис. 10) указывают на необходимость существенного развития сетей сейсмического мониторинга как в Осетинском секторе, так и в его сопредельных регионах. Дальнейшее развитие необходимо и сетям постоянно действующих ГНСС-станций. Совершенствование последних в сово-

купности с расширяющимися сетями периодических ГНСС-наблюдений позволит вести систематический долговременный мониторинг за современными движениями земной коры, что необходимо для увеличения точности полевых измерений и разработки модели напряженно-деформированного состояния региона. Последнее важно для оценки сейсмической опасности, но не используется сегодня в должном масштабе.

Отметим, что решение задачи адекватной оценки сейсмической опасности Осетинского сектора Большого Кавказа заключается в ретроспективном анализе и прогнозе параметров сейсмического воздействия от будущих сильных землетрясений. Оценка сейсмической опасности с одной стороны, должны опираться на надежные результаты детальных сейсмологических, геолого-геофизических, геодезических и других исследований. С другой стороны, учитывая многофакторность геодинамических процессов в регионе, неполноту наших знаний о геологической среде и неоднозначность существующих сеймотектонических моделей решение задачи оценки сейсмической опасности может быть достигнуто только на основе комплексирования геологических, геодезических, геофизических методов и методов численного моделирования. Заключительным шагом процесса интегрирования знаний о сейсмической опасности должен стать системный анализ соответствующих Больших данных.

Результаты настоящего обзора ярко иллюстрируют необходимость создания высокоэффективного системно-аналитического метода оценки сейсмической опасности на основе многофакторного системного анализа сейсмологических, геолого-геофизических, геодезических и других данных [Гвишиани и др., 2019]. Отметим, что на сегодняшний день указанный заключительный шаг не реализован. Сегодня у нас нет системного подхода к оценке сейсмической опасности. Современная геофизика сможет ответить на этот вызов привлекая к проблеме Науку о Данных в ее части создания Больших данных как базы системного анализа сейсмической опасности.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект №23-17-00176 «Системная оценка сейсмической опасности центральной части Большого Кавказа (Осетинский сектор)». В работе использовались данные и сервисы, предоставленные ЦКП «Аналитический центр геомагнитных данных» Геофизического центра РАН (<http://ckp.gcras.ru>).

## Список литературы

- Алексеевская М. А., Габриэлов А. М., Гвишиани А. Д. и др. Морфоструктурное районирование горных стран по формализованным признакам // Вычислительная сейсмология. Вып. 10. Распознавание и спектральный анализ в сейсмологии. — Москва : Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, 1977. — С. 33–49.
- Алешин А. С. Сейсмическое микрорайонирование особо ответственных объектов. — Москва : Светоч Плюс, 2010. — EDN: QKJTGJ.
- Арефьев С. С., Рогожин А. А., Быкова В. В. и др. Глубинная структура очаговой зоны Рачинского землетрясения по сеймотомографическим данным // Физика Земли. — 2006. — № 1. — С. 30–44. — EDN: OPKPZP.
- Багаева С. С., Чивиева Т. В., Саяпина А. А. и др. О сейсмологическом мониторинге нефтепромысловых районов Чеченской Республики // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики: сборник научных трудов. Вып. 5(10). — Пермь : Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2022. — С. 26–33. — EDN: QBLBVK.
- Верпаховская А. О., Пилипенко В. Н. Кинематическая миграция для определения скоростной модели среды при решении практических задач сейморазведки // Геофизический журнал. — 2018. — Т. 40, № 6. — С. 52–67. — DOI: [10.24028/gzh.0203-3100.v40i6.2018.151007](https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i6.2018.151007).
- Габсатарова И. П. Инструментальные параметры очага Курчалойского землетрясения 11 октября 2008 г. с  $K_p = 14,5$ ,  $M_w = 5,8$ ,  $I_0 = 7-8$  (Чеченская Республика) // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. — Обнинск : ГС РАН, 2014. — С. 433–447. — EDN: UDUBWN.
- Габсатарова И. П., Головкова Л. В., Селиванова Е. А. Онийское-II землетрясение 7 сентября 2009 г. с  $K_p = 14,2$ ,  $M_S = 5,8$  (Грузия) // Землетрясения Северной Евразии, 2009 год. — Обнинск : ГС РАН, 2015. — С. 325–333. — EDN: WGNFBR.

- Гамбурцев Г. А. Основы сейсморазведки. — Москва : Гостоптехиздат, 1959.
- Гвишиани А. Д., Агаян С., Дзебоев Б. и др. Распознавание мест возможного возникновения эпицентров сильных землетрясений с одним классом обучения // Доклады Академии наук. — 2017. — № 1. — С. 86. — DOI: [10.7868/S0869565217130175](https://doi.org/10.7868/S0869565217130175).
- Гвишиани А. Д., Горшков А. И., Кособоков В. Г. и др. Морфоструктуры и места землетрясений Большого Кавказа // Известия АН СССР. Физика Земли. — 1986. — № 9. — С. 54–55. — EDN: [RZYRUL](https://www.edn.ru/rzyrul).
- Гвишиани А. Д., Горшков А. И., Ранцман Е. Я. и др. Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности. — Москва : Наука, 1988.
- Гвишиани А. Д., Дзеранов Б., Скоркина А. и др. Мировые сейсмические сети и каталоги землетрясений // Russian Journal of Earth Sciences. — 2024. — С. 1–22. — DOI: [10.2205/2024es000901](https://doi.org/10.2205/2024es000901).
- Гвишиани А. Д., Кафтан В. И., Красноперов Р. И. и др. Геоинформатика и системный анализ в геофизике и геодинамике // Физика Земли. — 2019. — № 1. — С. 42–60. — DOI: [10.31857/S0002-33372019142-60](https://doi.org/10.31857/S0002-33372019142-60).
- Гвишиани А. Д., Соловьев А. А., Дзебоев Б. А. Проблема распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений: актуальный обзор // Физика Земли. — 2020. — № 1. — С. 5–29. — DOI: [10.31857/S0002333720010044](https://doi.org/10.31857/S0002333720010044).
- Гельфанд И. М., Губерман Ш. А., Извекова М. Л. и др. О критериях высокой сейсмичности // Доклады Академии наук СССР. — 1972. — Т. 202, № 6. — С. 1317–1320.
- Гельфанд И. М., Губерман Ш. А., Извекова М. Л. и др. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. I. Памир и Тянь-Шань // Вычислительная сейсмология. Вып. 6. Вычислительные и статистические методы интерпретации сейсмических данных. — Москва : Наука, 1973. — С. 107–133.
- Горшков А. И. Распознавание мест сильных землетрясений в Альпийско-Гималайском поясе // Вычислительная сейсмология. Вып. 40. Алгоритмы прогноза землетрясений. — Москва : КРАСАНД, 2010.
- Дзебоев Б. А., Гвишиани А. Д., Белов И. О. и др. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений на основе алгоритма с единственным чистым классом обучения: I. Алтай-Саяны-Прибайкалье.  $M \geq 6.0$  // Физика Земли. — 2019. — № 4. — С. 33–47. — DOI: [10.31857/S0002-33372019433-47](https://doi.org/10.31857/S0002-33372019433-47).
- Заалишвили В. Б. Физические основы сейсмического микрорайонирования. — Москва : ОИФЗ РАН, 2000. — С. 367. — EDN: [RJATBD](https://www.edn.ru/rjatbd).
- Заалишвили В. Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок. — Москва : Наука, 2009. — EDN: [PWRPGJ](https://www.edn.ru/pwrpgj).
- Заалишвили В. Б., Дзеранов Б. В., Габараев А. Ф. Оценка сейсмической опасности территории и построение вероятностных карт // Геология и геофизика Юга России. — 2011. — № 1. — С. 48–58. — EDN: [OOFTBV](https://www.edn.ru/ooftbv).
- Заалишвили В. Б., Мельков Д. А. Особенности процесса схода каменно-ледовой лавины в районе ледника Девдорак 17 мая 2014 года по инструментальным данным Кармадонского параметрического полигона // Геология и геофизика Юга России. — 2017. — № 4. — С. 39–47. — DOI: [10.23671/vnc.2017.4.9524](https://doi.org/10.23671/vnc.2017.4.9524).
- Заалишвили В. Б., Мельков Д. А., Габеева И. Л. и др. Сейсмическое микрорайонирование территории г. Владикавказ // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. — 2012. — № 1. — С. 49–58. — EDN: [QJGQXJ](https://www.edn.ru/qjgqxj).
- Заалишвили В. Б., Невская Н. И., Мельков Д. А. Инструментальный геофизический мониторинг на территории Северного Кавказа // Физика земли. — 2014. — Т. 2014, № 2. — С. 114–123. — DOI: [10.7868/s0002333714020124](https://doi.org/10.7868/s0002333714020124).
- Замятин А. Л. Повышение информативности исследования геологической среды на основе георадарного зондирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2006. — № 6. — С. 130–132. — EDN: [HZOOVN](https://www.edn.ru/hzooov).
- Керимов И. А., Гайсумов М. Я., Бадаев С. В. Сильные землетрясения территории Чечни и Ингушетии в XVIII–XX вв. // Грозненский естественнонаучный бюллетень. — 2017. — 1(5). — С. 41–54. — EDN: [YZBAKT](https://www.edn.ru/yzbakt).
- Котляков В. М., Рототаева О. В., Носенко Г. А. и др. Кармадонская катастрофа: что случилось и чего ждать дальше. — Москва : Кодекс, 2014. — EDN: [UHBCSV](https://www.edn.ru/uhbcsv).
- Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра / под ред. Ю. Г. Леонов, В. Б. Заалишвили. — Владикавказ : Центр геофизических исследований ВНИЦ РАН и РСО-А, 2014. — EDN: [UAKXFB](https://www.edn.ru/uakxfv).
- Маневич А. И., Дзебоев Б. А., Гвишиани А. Д. и др. Развитие сети деформационного ГНСС-мониторинга Восточных ветвей Владикавказского разлома // Геология и геофизика Юга России. — 2024. — Т. 14, № 3. — DOI: [10.46698/q3386-6383-8155-b](https://doi.org/10.46698/q3386-6383-8155-b).
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / под ред. Н. В. Кондорской, Н. В. Шебалина. — Наука, 1977.

- Овсюченко А. Н., Ларьков А. С., Андреева Н. В. и др. Сейсмотектоника очагов сильных землетрясений Кавказа: итоги исследований Евгения Александровича Рогожина // Российский сейсмологический журнал. — 2023. — Т. 5, № 3. — С. 28–44. — DOI: [10.35540/2686-7907.2023.3.02](https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.3.02).
- Овсюченко А. Н., Мараханов А. В., Новиков С. С. и др. Сейсмотектонические исследования зоны Владикавказского активного разлома на территории Республики Северная Осетия – Алания // Вестник Владикавказского научного центра. — 2008. — Т. 8, № 3. — С. 37–49.
- Панов В. Д., Ильичев Ю. Г., Лурье П. М. Ледниковый обвал в горах Северной Осетии в 2002 г. // Метеорология и гидрология. — 2002. — № 12. — С. 94–98. — EDN: [SBOFQP](https://www.edn.ru/SBOFQP).
- Папалашвили В. Г., Варазанашвили О. Ш., Гогмачадзе С. А. и др. Рача-Джавское землетрясение 29 апреля 1991 г. // Землетрясения в СССР в 1991г. — Москва : ОИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, 1997. — С. 18–25.
- Рейснер Г. И., Иогансон Л. И. Комплексная типизация земной коры как основа для решения фундаментальных и прикладных задач // Бюллетень МОИП. Отдел геологический. — 1997. — Т. 72, № 3. — С. 5–13.
- Рогожин Е. А. Современная геодинамика и потенциальные очаги землетрясений Кавказского региона // Современные математические и геологические модели природной среды. — Москва : ОИФЗ РАН, 2002. — С. 244–254.
- Рогожин Е. А. Зоны ВОЗ и их характеристики для территории Республики Северная Осетия – Алания // Инновационные технологии для устойчивого развития горных территорий: Материалы VI Международной конференции. 28–30 мая 2007 г. — Владикавказ : Терек, 2007. — С. 238.
- Рогожин Е. А. Сейсмотектоника центрального сектора Большого Кавказа как основа для сейсмического мониторинга и оценки сейсмической опасности // Вестник Владикавказского научного центра. — 2009. — Т. 9, № 4. — С. 16–22. — EDN: [PZJNJX](https://www.edn.ru/PZJNJX).
- Рогожин Е. А., Гурбанов А. Г., Мараханов А. В. и др. О соотношении проявлений землетрясений, вулканизма и катастрофических пульсаций ледников Северной Осетии в голоцене // Вестник Владикавказского научного центра. — 2004. — Т. 4, № 3. — С. 41–50.
- Рогожин Е. А., Лутиков А. И., Овсюченко А. Н. Оценка сейсмической опасности Северного Кавказа в детальном масштабе // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. — 2013. — № 5. — С. 14–19. — EDN: [RDLYOF](https://www.edn.ru/RDLYOF).
- Рогожин Е. А., Рейснер Г. И., Иогансон Л. И. Оценка сейсмического потенциала Большого Кавказа и Апеннин независимыми методами // Современные математические и геологические модели в задачах прикладной геофизики: Избранные научные труды. — Москва : ОИФЗ РАН, 2001. — С. 279–300.
- Саяпина А. А., Чивиева Т. В., Пятунин М. С. О расширении сети сейсмических наблюдений на территории Северной Осетии – Алании // Вестник Владикавказского научного центра. — 2023. — № 4. — С. 81–87. — DOI: [10.46698/VNC.2023.56.33.001](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.56.33.001).
- Сдельникова И. А., Саяпина А. А., Габсатаров Ю. В. и др. Спутниковые геодинамические наблюдения на территории Республики Северная Осетия – Алания // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. — Москва : Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН, 2023. — DOI: [10.26200/GSTOU.2023.85.41.048](https://doi.org/10.26200/GSTOU.2023.85.41.048).
- Соловьев А. А., Гвишиани А. Д., Горшков А. И. и др. Распознавание мест возможного возникновения землетрясений: методология и анализ результатов // Физика земли. — 2014. — Т. 2014, № 2. — С. 3–20. — DOI: [10.7868/S0002333714020112](https://doi.org/10.7868/S0002333714020112).
- Соловьев А. А., Новикова О. В., Горшков А. И. и др. Распознавание расположения потенциальных очагов сильных землетрясений в Кавказском регионе с использованием ГИС-технологий // Доклады Академии наук. — 2013. — Т. 450. — С. 599–601. — DOI: [10.7868/S0869565213170222](https://doi.org/10.7868/S0869565213170222).
- Соловьев Ал. А., Горшков А. И., Соловьев Ан. А. Применение данных по литосферным магнитным аномалиям в задаче распознавания мест возможного возникновения землетрясений // Физика Земли. — 2016. — № 6. — С. 21–27. — DOI: [10.7868/S0002333716050148](https://doi.org/10.7868/S0002333716050148).
- СП 14.13330.2018. Свод правил. Строительство в сейсмических районах. — Росстандарт, 2018.
- Татаринов В. Н., Кафтан В. И., Маневич А. И. и др. Новейшая тектоническая эволюция Кавказа: современные вертикальные движения и механизм деформирования земной коры // Физика земли. — 2024. — № 4. — С. 76–99. — DOI: [10.31857/S0002333724040068](https://doi.org/10.31857/S0002333724040068).
- Уломов В. И., Данилова Т. И., Медведева Н. С. и др. К оценке сейсмической опасности на Северном Кавказе // Физика Земли. — 2007. — № 7. — С. 21–45. — EDN: [IBANMP](https://www.edn.ru/IBANMP).

- Шебалин П. Н., Гвишиани А. Д., Дзебоев Б. А. и др. Почему необходимы новые подходы к оценке сейсмической опасности? // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. — 2022. — Т. 507, № 1. — С. 91–97. — DOI: [10.31857/S2686739722601466](https://doi.org/10.31857/S2686739722601466).
- Шнеерсон М. Б. Современные полевые технологии наземной сейсморазведки // Экспозиция Нефть Газ. — 2019. — Т. 71, № 4. — С. 39–42. — DOI: [10.24411/2076-6785-2019-10032](https://doi.org/10.24411/2076-6785-2019-10032).
- Alekseevskaya M., Gabrielov A., Gelfand I., et al. Formal morphostructural zoning of mountain territories // Geophysics. — 1977. — Vol. 43, no. 1. — P. 227–233. — EDN: [RZYSKP](https://www.edn.org/RZYSKP).
- Balassanian S., Ashirov T., Chelidze T., et al. Seismic hazard assessment for the Caucasus test area // Annali di Geofisica. — 1999. — Vol. 42, no. 6. — P. 1139–1151. — EDN: [XKHETV](https://www.edn.org/XKHETV).
- Bender B., Perkins D. M. SEISRISK III: A Computer Program for Seismic Hazard Estimation // US Geological Survey Bulletin. — 1987. — Vol. 1772. — P. 48.
- Cornell C. A. Engineering seismic risk analysis // Bulletin of the Seismological Society of America. — 1968. — Vol. 58, no. 5. — P. 1583–1606.
- Dzeboev B. A., Gvishiani A. D., Agayan S. M., et al. System-Analytical Method of Earthquake-Prone Areas Recognition // Applied Sciences. — 2021. — Vol. 11, no. 17. — P. 7972. — DOI: [10.3390/app11177972](https://doi.org/10.3390/app11177972).
- Dzeboev B. A., Karapetyan J. K., Aronov G. A., et al. FCAZ-recognition based on declustered earthquake catalogs // Russian Journal of Earth Sciences. — 2020. — Vol. 20, no. 6. — DOI: [10.2205/2020ES000754](https://doi.org/10.2205/2020ES000754).
- Dzeboev B. A., Soloviev A. A., Dzeranov B. V., et al. Strong earthquake-prone areas recognition based on the algorithm with a single pure training class. II. Caucasus,  $M \geq 6.0$ . Variable EPA method // Russian Journal of Earth Sciences. — 2019. — Vol. 19, no. 6. — P. 1–12. — DOI: [10.2205/2019ES000691](https://doi.org/10.2205/2019ES000691).
- Giardini D. The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) – 1992/1999 // Annals of Geophysics. — 1999. — Vol. 42, no. 6. — DOI: [10.4401/ag-3780](https://doi.org/10.4401/ag-3780).
- Gómez J. M., Bukchin B., Madariaga R., et al. A study of the Barisakho, Georgia, earthquake of 1992 October 23 from broad-band surface and body waves // Geophysical Journal International. — 1997. — Vol. 129, no. 3. — P. 613–623. — DOI: [10.1111/j.1365-246X.1997.tb04497.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb04497.x).
- Gorshkov A. I., Novikova O. Estimating the validity of the recognition results of earthquake-prone areas using the ArcMap // Acta Geophysica. — 2018. — Vol. 66, no. 5. — P. 843–853. — DOI: [10.1007/s11600-018-0177-3](https://doi.org/10.1007/s11600-018-0177-3).
- Gorshkov A. I., Soloviev A. A. Recognition of earthquake-prone areas in the Altai-Sayan-Baikal region based on the morphostructural zoning // Russian Journal of Earth Sciences. — 2021. — Vol. 21, no. 1. — DOI: [10.2205/2020ES000751](https://doi.org/10.2205/2020ES000751).
- Kaftan V. I., Gvishiani A. D., Manevich A. I., et al. An Analytical Review of the Recent Crustal Uplifts, Tectonics, and Seismicity of the Caucasus Region // Geosciences. — 2024. — Vol. 14, no. 3. — P. 70. — DOI: [10.3390/geosciences14030070](https://doi.org/10.3390/geosciences14030070).
- McGuire R. K. MNO-10, Seismic hazard and risk analysis. — Earthquake Engineering Research Institute, 2004.
- Musson R. M. W. Probabilistic seismic hazard maps for the North Balkan region // Annals of Geophysics. — 1999. — Vol. 42, no. 6. — DOI: [10.4401/ag-3772](https://doi.org/10.4401/ag-3772).
- Salsabili M., Saeidi A., Rouleau A., et al. Seismic microzonation of a region with complex surficial geology based on different site classification approaches // Geoenvironmental Disasters. — 2021. — Vol. 8, no. 1. — DOI: [10.1186/s40677-021-00198-8](https://doi.org/10.1186/s40677-021-00198-8).
- Ulomov V. I. Seismic hazard of Northern Eurasia // Annali di Geofisica. — 1999. — Vol. 42, no. 6. — P. 1023–1038.
- Vorobieva I. A., Dzeboev B. A., Dzeranov B. V., et al. Integrated Earthquake Catalog of the Ossetian Sector of the Greater Caucasus // Applied Sciences. — 2023. — Vol. 14, no. 1. — P. 172. — DOI: [10.3390/app14010172](https://doi.org/10.3390/app14010172).
- Vorobieva I. A., Grekov E., Krushelnitskii K., et al. High Resolution Seismicity Smoothing Method for Seismic Hazard Assessment // Russian Journal of Earth Sciences. — 2024. — P. 1–10. — DOI: [10.2205/2024ES000892](https://doi.org/10.2205/2024ES000892).
- Vorobieva I. A., Gvishiani A. D., Dzeboev B. A., et al. Nearest Neighbor Method for Discriminating Aftershocks and Duplicates When Merging Earthquake Catalogs // Frontiers in Earth Science. — 2022. — Vol. 10. — DOI: [10.3389/feart.2022.820277](https://doi.org/10.3389/feart.2022.820277).
- Yamin L. E., Reyes J. C., Rueda R., et al. Practical seismic microzonation in complex geological environments // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. — 2018. — Vol. 114. — P. 480–494. — DOI: [10.1016/j.soildyn.2018.07.030](https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.07.030).
- Zaliapin I., Ben-Zion Y. Earthquake clusters in southern California I: Identification and stability // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. — 2013. — Vol. 118, no. 6. — P. 2847–2864. — DOI: [10.1002/jgrb.50179](https://doi.org/10.1002/jgrb.50179).
- Zaliapin I., Ben-Zion Y. A global classification and characterization of earthquake clusters // Geophysical Journal International. — 2016. — Vol. 207, no. 1. — P. 608–634. — DOI: [10.1093/gji/ggw300](https://doi.org/10.1093/gji/ggw300).

# SEISMICITY AND SEISMIC HAZARD ASSESSMENTS OF THE OSSETIAN SECTOR OF THE GREATER CAUCASUS. REVIEW

B. V. Dzeranov<sup>\*\*1,2</sup> , A. D. Gvishiani<sup>1,3</sup> , B. A. Dzeboev<sup>1,2,3</sup> , V. B. Zaalishvili<sup>1,2</sup> , A. A. Sayapina<sup>4</sup> ,  
D. A. Melkov<sup>2</sup> , A. F. Gabaraev<sup>2</sup> , and N. A. Fomenko<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Center RAS, Vladikavkaz, Russia

<sup>3</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>4</sup>North Ossetian branch of Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz, Russia

**\*\*Correspondence to:** Boris Dzeranov, b.dzeranov@gcras.ru

The article considers the Ossetian sector of the Greater Caucasus from the point of view of studying its seismicity and analyzing seismic hazard assessments previously constructed at all levels of seismic zoning (GSZ, DSZ and SMZ). The areas prone to strong earthquakes identified by pattern recognition methods are discussed. The results of the analysis emphasized the high level of seismic hazard of the foothill and mountainous areas of the region. The description of seismic networks that continuously monitor the region is given. The analysis of the most representative earthquake catalog with a unified magnitude scale that was previously created by the authors, and spatial variations of the magnitude of full registration, showed that the level of registration of seismic events in the east of the Ossetian sector of the Greater Caucasus is still worse than in its central and western parts.

**Keywords:** Ossetian sector of the Greater Caucasus, seismicity, seismic hazard, GSZ, DSZ, SMZ, seismic networks, earthquake catalogs, catalog representativeness.

Received: 22 September 2024

Accepted: 21 November 2025

Published: 21 February 2025



© 2025. The Authors.

**Citation:** Dzeranov, B. V., A. D. Gvishiani, B. A. Dzeboev, V. B. Zaalishvili, A. A. Sayapina, D. A. Melkov, A. F. Gabaraev, and N. A. Fomenko (2025), Seismicity and Seismic Hazard Assessments of the Ossetian Sector of the Greater Caucasus. Review, *Russian Journal of Earth Sciences*, 25, ES1004, <https://doi.org/10.2205/2025ES000959>, EDN: ORHUOZ

## References

- Alekseevskaya M. A., Gabrielov A., Gelfand I., et al. Formal morphostructural zoning of mountain territories // *Geophysics*. — 1977a. — Vol. 43, no. 1. — P. 227–233. — EDN: RZYSKP.
- Alekseevskaya M. A., Gabrielov A. M., Gvishiani A. D., et al. Morphostructural Zoning of Mountainous Countries Based on Formalized Features // *Computational Seismology. Issue 10. Recognition and Spectral Analysis in Seismology*. — Moscow : Institute for Earthquake Prediction Theory, Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, 1977b. — P. 33–49. — (In Russian).
- Aleshin A. S. Seismic microzoning of especially important objects. — Moscow : Svetoch Plus, 2010. — EDN: QKJTGJ ; (in Russian).
- Arefiev S. S., Rogozhin E. A., Bykova V. V., et al. Deep structure of the Racha earthquake source zone from seismic tomography data // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. — 2006. — Vol. 42, no. 1. — P. 27–40. — DOI: [10.1134/s1069351306010034](https://doi.org/10.1134/s1069351306010034).
- Bagaeva S. S., Chivieva T. V., Sayapina A. A., et al. On seismological monitoring of the oil-field regions of the Chechen Republic // *Theory and practice of exploration and petroleum geophysics: collection of scientific papers. Issue 5(10)*. — Perm : Perm State University, 2022. — P. 26–33. — EDN: QBLBVK ; (in Russian).
- Balassanian S., Ashirov T., Chelidze T., et al. Seismic hazard assessment for the Caucasus test area // *Annali di Geofisica*. — 1999. — Vol. 42, no. 6. — P. 1139–1151. — EDN: XKHETV.
- Bender B., Perkins D. M. SEISRISK III: A Computer Program for Seismic Hazard Estimation // *US Geological Survey Bulletin*. — 1987. — Vol. 1772. — P. 48.

- Cornell C. A. Engineering seismic risk analysis // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 1968. — Vol. 58, no. 5. — P. 1583–1606.
- CR 14.13330.2018. Seismic building design code. — Rosstandart, 2018. — (In Russian).
- Dzeboev B. A., Gvishiani A. D., Agayan S. M., et al. System-Analytical Method of Earthquake-Prone Areas Recognition // *Applied Sciences*. — 2021. — Vol. 11, no. 17. — P. 7972. — DOI: [10.3390/app11177972](https://doi.org/10.3390/app11177972).
- Dzeboev B. A., Gvishiani A. D., Belov I. O., et al. Strong-Earthquake-Prone Areas Recognition Based on an Algorithm with a Single Pure Training Class: I. Altai-Sayan-Baikal Region,  $M \geq 6.0$  // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. — 2019a. — Vol. 55, no. 4. — P. 563–575. — DOI: [10.1134/s1069351319040050](https://doi.org/10.1134/s1069351319040050).
- Dzeboev B. A., Karapetyan J. K., Aronov G. A., et al. FCAZ-recognition based on declustered earthquake catalogs // *Russian Journal of Earth Sciences*. — 2020. — Vol. 20, no. 6. — DOI: [10.2205/2020ES000754](https://doi.org/10.2205/2020ES000754).
- Dzeboev B. A., Soloviev A. A., Dzeranov B. V., et al. Strong earthquake-prone areas recognition based on the algorithm with a single pure training class. II. Caucasus,  $M \geq 6.0$ . Variable EPA method // *Russian Journal of Earth Sciences*. — 2019b. — Vol. 19, no. 6. — P. 1–12. — DOI: [10.2205/2019ES000691](https://doi.org/10.2205/2019ES000691).
- Gabsatarova I. P. Instrumental parameters of the source of the Kurchaloy earthquake on October 11, 2008 with  $K_p = 14.5$ ,  $M_w = 5.8$ ,  $I_0 = 7 - -8$  (Chechen Republic) // *Earthquakes of Northern Eurasia, 2008*. — Obninsk : GS RAS, 2014. — P. 433–447. — EDN: [UDUBWN](https://www.edn.ru/UDUBWN) ; (in Russian).
- Gabsatarova I. P., Golovkova L. V., Selivanova E. A. Onii-II earthquake of September 7, 2009 with  $K_p = 14.2$ ,  $M_S = 5.8$  (Georgia) // *Earthquakes of Northern Eurasia, 2009*. — Obninsk : GS RAS, 2015. — P. 325–333. — EDN: [WGNFBR](https://www.edn.ru/WGNFBR) ; (in Russian).
- Gamburtsev G. A. Fundamentals of Seismic Prospecting. — Moscow : Gostoptekhizdat, 1959. — (In Russian).
- Gelfand I. M., Guberman Sh. A., Izvekova M. L., et al. On the criteria of high seismicity // *Doklady Akademii nauk SSSR*. — 1972. — Vol. 202, no. 6. — P. 1317–1320. — (In Russian).
- Gelfand I. M., Guberman Sh. A., Izvekova M. L., et al. Recognition of Locations of Possible Occurrence of Strong Earthquakes. I. Pamir and Tien Shan // *Computational Seismology*. Vol. 6. Computational and Statistical Methods of Interpreting Seismic Data. — Moscow : Nauka, 1973. — P. 107–133. — (In Russian).
- Giardini D. The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) – 1992/1999 // *Annals of Geophysics*. — 1999. — Vol. 42, no. 6. — DOI: [10.4401/ag-3780](https://doi.org/10.4401/ag-3780).
- Gómez J. M., Bukchin B., Madariaga R., et al. A study of the Barisakho, Georgia, earthquake of 1992 October 23 from broad-band surface and body waves // *Geophysical Journal International*. — 1997. — Vol. 129, no. 3. — P. 613–623. — DOI: [10.1111/j.1365-246X.1997.tb04497.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb04497.x).
- Gorshkov A. I. Recognition of Earthquake Prone Areas in the Alpine-Himalayan Belt // *Computational Seismology*. Issue 40. Earthquake Prediction Algorithms. — Moscow : KRASAND, 2010. — (In Russian).
- Gorshkov A. I., Novikova O. Estimating the validity of the recognition results of earthquake-prone areas using the ArcMap // *Acta Geophysica*. — 2018. — Vol. 66, no. 5. — P. 843–853. — DOI: [10.1007/s11600-018-0177-3](https://doi.org/10.1007/s11600-018-0177-3).
- Gorshkov A. I., Soloviev A. A. Recognition of earthquake-prone areas in the Altai-Sayan-Baikal region based on the morphostructural zoning // *Russian Journal of Earth Sciences*. — 2021. — Vol. 21, no. 1. — DOI: [10.2205/2020ES000751](https://doi.org/10.2205/2020ES000751).
- Gvishiani A. D., Agayan S. M., Dzeboev B. A., et al. Recognition of strong earthquake-prone areas with a single learning class // *Doklady Earth Sciences*. — 2017. — Vol. 474, no. 1. — P. 546–551. — DOI: [10.1134/S1028334X17050038](https://doi.org/10.1134/S1028334X17050038).
- Gvishiani A. D., Dzeranov B., Skorkina A., et al. World Seismic Networks and Earthquake Catalogs // *Russian Journal of Earth Sciences*. — 2024. — P. 1–22. — DOI: [10.2205/2024es000901](https://doi.org/10.2205/2024es000901). — (In Russian).
- Gvishiani A. D., Gorshkov A. I., Kosobokov V. G., et al. Morphostructures and earthquake sites of the Greater Caucasus // *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli*. — 1986. — No. 9. — P. 54–55. — EDN: [RZYRUL](https://www.edn.ru/RZYRUL) ; (in Russian).
- Gvishiani A. D., Gorshkov A. I., Rantsman E. Ya., et al. Prediction of earthquake locations in regions of moderate seismicity. — Moscow : Nauka, 1988. — (In Russian).
- Gvishiani A. D., Kaftan V. I., Krasnoperov R. I., et al. Geoinformatics and Systems Analysis in Geophysics and Geodynamics // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. — 2019. — Vol. 55, no. 1. — P. 33–49. — DOI: [10.1134/s1069351319010038](https://doi.org/10.1134/s1069351319010038).
- Gvishiani A. D., Soloviev A. A., Dzeboev B. A. Problem of Recognition of Strong-Earthquake-Prone Areas: a State-of-the-Art Review // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. — 2020. — Vol. 56, no. 1. — P. 1–23. — DOI: [10.1134/s1069351320010048](https://doi.org/10.1134/s1069351320010048).
- Kaftan V. I., Gvishiani A. D., Manevich A. I., et al. An Analytical Review of the Recent Crustal Uplifts, Tectonics, and Seismicity of the Caucasus Region // *Geosciences*. — 2024. — Vol. 14, no. 3. — P. 70. — DOI: [10.3390/geosciences14030070](https://doi.org/10.3390/geosciences14030070).

- Kerimov I. A., Gaysumov M. Ya., Badaev S. V. Strong Earthquakes in Chechnya and Ingushetia in the 18th and 20th Centuries // Grozny Natural Science Bulletin. — 2017. — 1(5). — P. 41–54. — EDN: [YZBAKT](#) ; (in Russian).
- Kotlyakov V. M., Rototaeva O. V., Nosenko G. A., et al. Karmadon Catastrophe: What Happened and What We Should Wait for in Future. — Moscow : Kodeks, 2014. — EDN: [UHBCSV](#) ; (in Russian).
- Manevich A. I., Dzeboev B. A., Gvishiani A. D., et al. Development of the deformation GNSS monitoring network for the eastern branches of the Vladikavkaz fault // Geology and Geophysics of Russian South. — 2024. — Vol. 14, no. 3. — DOI: [10.46698/q3386-6383-8155-b](#). — (In Russian).
- McGuire R. K. MNO-10, Seismic hazard and risk analysis. — Earthquake Engineering Research Institute, 2004.
- Musson R. M. W. Probabilistic seismic hazard maps for the North Balkan region // Annals of Geophysics. — 1999. — Vol. 42, no. 6. — DOI: [10.4401/ag-3772](#).
- New catalogue of strong earthquakes on the territory of the USSR from ancient times to 1975 / ed. by N. V. Kondorskaya, N. V. Shebalin. — Nauka, 1977. — (In Russian).
- Ovsyuchenko A. N., Larkov A. S., Andreeva N. V., et al. Seismotectonics of sources of strong earthquakes in the Caucasus: Results of studies by Evgeny Alexandrovich Rogozhin // Russian Journal of Seismology. — 2023. — Vol. 5, no. 3. — P. 28–44. — DOI: [10.35540/2686-7907.2023.3.02](#). — (In Russian).
- Ovsyuchenko A. N., Marakhanov A. V., Novikov S. S., et al. Seismotectonic studies of the Vladikavkaz active fault zone in the Republic of North Ossetia – Alania // Vestnik Vladikavkaz Scientific Center. — 2008. — Vol. 8, no. 3. — P. 37–49. — (In Russian).
- Panov V. D., Il'ichev Yu. G., Lur'e P. M. Ice Avalanche of 2002 in the Mountains of Northern Ossetia // Russian Meteorology and Hydrology. — 2002. — No. 12. — P. 69–72. — EDN: [PJKNYX](#).
- Papalashvili V. G., Varazanashvili O. Sh., Gogmachade S. A., et al. Racha-Dzhava earthquake of April 29, 1991 // Earthquakes in the USSR in 1991. — Moscow : O.Yu. Schmidt Institute of Physical Geophysics of the Russian Academy of Sciences, 1997. — P. 18–25. — (In Russian).
- Reisner G. I., Ioganson L. I. Complex typification of the earth's crust as a basis for solving fundamental and applied problems // Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological Series. — 1997. — Vol. 72, no. 3. — P. 5–13. — (In Russian).
- Rogozhin E. A. Modern Geodynamics and Potential Earthquake Foci of the Caucasus Region // Modern Mathematical and Geological Models of the Natural Environment. — Moscow : OIPE RAS, 2002. — P. 244–254. — (In Russian).
- Rogozhin E. A. WHO zones and their characteristics for the territory of the Republic of North Ossetia – Alania // Innovative technologies for sustainable development of mountain territories: Proceedings of the VI International Conference. May 28–30, 2007. — Vladikavkaz : Terek, 2007. — P. 238. — (In Russian).
- Rogozhin E. A. Seismotectonics of the Central Sector of the Greater Caucasus as a Basis for Seismic Monitoring and Seismic Hazard Assessment // Vestnik Vladikavkaz Scientific Center. — 2009. — Vol. 9, no. 4. — P. 16–22. — EDN: [PZJNJX](#) ; (in Russian).
- Rogozhin E. A., Gurbanov A. G., Marakhanov A. V., et al. On the relationship between the manifestations of earthquakes, volcanism and catastrophic pulsations of glaciers in North Ossetia in the Holocene // Vestnik Vladikavkaz Scientific Center. — 2004. — Vol. 4, no. 3. — P. 41–50. — (In Russian).
- Rogozhin E. A., Lutikov A. I., Ovsyuchenko A. N. The Detailed Assessment of the Seismic Risk in the Territory of North Caucasus // Earthquake-resistant construction. Safety of structures. — 2013. — No. 5. — P. 14–19. — EDN: [RDLYOF](#) ; (in Russian).
- Rogozhin E. A., Reisner G. I., Ioganson L. I. Assessment of the Seismic Potential of the Greater Caucasus and the Apennines by Independent Methods // Modern Mathematical and Geological Models in Applied Geophysics Problems: Selected Scientific Works. — Moscow : O.Yu. Schmidt Institute of Physical Geophysics of the Russian Academy of Sciences, 2001. — P. 279–300. — (In Russian).
- Salsabili M., Saeidi A., Rouleau A., et al. Seismic microzonation of a region with complex surficial geology based on different site classification approaches // Geoenvironmental Disasters. — 2021. — Vol. 8, no. 1. — DOI: [10.1186/s40677-021-00198-8](#).
- Sayapina A. A., Chivieva T. V., Pyatunin M. S. About the expanding of the seismic observation network on the territory of the Republic of North Ossetia – Alania // Vestnik Vladikavkaz Scientific Center. — 2023. — No. 4. — P. 81–87. — DOI: [10.46698/VNC.2023.56.33.001](#). — (In Russian).
- Sdelnikova I. A., Sayapina A. A., Gabsatarov Yu. V., et al. Satellite Geodynamic Observations on the Territory of the Republic of North Ossetia – Alania // Modern Problems of Geology, Geophysics and Geoecology of the North Caucasus. Proceedings of the XIII All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation. —

- Moscow : S.I. Vavilov Institute for the History of Natural Science, Technology, Russian Academy of Sciences, 2023. — DOI: [10.26200/GSTOU.2023.85.41.048](https://doi.org/10.26200/GSTOU.2023.85.41.048). — (In Russian).
- Shebalin P. N., Gvishiani A. D., Dzeboev B. A., et al. Why Are New Approaches to Seismic Hazard Assessment Required? // *Doklady Earth Sciences*. — 2022. — Vol. 507, no. 1. — P. 930–935. — DOI: [10.1134/s1028334x22700362](https://doi.org/10.1134/s1028334x22700362).
- Shneerson M. B. Modern onshore seismic acquisition // *Oil Gas Exposure*. — 2019. — Vol. 71, no. 4. — P. 39–42. — DOI: [10.24411/2076-6785-2019-10032](https://doi.org/10.24411/2076-6785-2019-10032). — (In Russian).
- Soloviev A. A., Gvishiani A. D., Gorshkov A. I., et al. Recognition of earthquake-prone areas: Methodology and analysis of the results // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. — 2014. — Vol. 50, no. 2. — P. 151–168. — DOI: [10.1134/s1069351314020116](https://doi.org/10.1134/s1069351314020116).
- Soloviev A. A., Novikova O. V., Gorshkov A. I., et al. Recognition of potential sources of strong earthquakes in the Caucasus region using GIS technologies // *Doklady Earth Sciences*. — 2013. — Vol. 450, no. 2. — P. 658–660. — DOI: [10.1134/S1028334X13060159](https://doi.org/10.1134/S1028334X13060159).
- Soloviev A. A., Gorshkov A. I., Soloviev A. A. Application of the data on the lithospheric magnetic anomalies in the problem of recognizing the earthquake prone areas // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. — 2016. — Vol. 52, no. 6. — P. 803–809. — DOI: [10.1134/S1069351316050141](https://doi.org/10.1134/S1069351316050141).
- Tatarinov V. N., Kaftan V. I., Manevich A. I., et al. Neotectonic Evolution of the Caucasus: Recent Vertical Movements and Mechanism of Crustal Deformation // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. — 2024. — Vol. 60, no. 4. — P. 585–603. — DOI: [10.1134/S1069351324700630](https://doi.org/10.1134/S1069351324700630).
- The Kolka Glacier: Past, Present, Future / ed. by Yu. G. Leonov, V. B. Zaalishvili. — Vladikavkaz : Center for Geophysical Research of the VSC RAS, the Republic of North Ossetia – Alania, 2014. — EDN: [UAKXFB](https://doi.org/10.2205/2024ES000892) ; (in Russian).
- Ulomov V. I. Seismic hazard of Northern Eurasia // *Annali di Geofisica*. — 1999. — Vol. 42, no. 6. — P. 1023–1038.
- Ulomov V. I., Danilova T. I., Medvedeva N. S., et al. Assessment of seismic hazard in the North Caucasus // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. — 2007. — Vol. 43, no. 7. — P. 559–572. — DOI: [10.1134/S1069351307070051](https://doi.org/10.1134/S1069351307070051).
- Verpakhovskaya A. O., Pilipenko V. N. Kinematic migration for determination of velocity model of the medium while solving practical problems of seismic exploration // *Geofizicheskiy Zhurnal*. — 2018. — Vol. 40, no. 6. — P. 52–67. — DOI: [10.24028/gzh.0203-3100.v40i6.2018.151007](https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i6.2018.151007). — (In Russian).
- Vorobieva I. A., Dzeboev B. A., Dzeranov B. V., et al. Integrated Earthquake Catalog of the Ossetian Sector of the Greater Caucasus // *Applied Sciences*. — 2023. — Vol. 14, no. 1. — P. 172. — DOI: [10.3390/app14010172](https://doi.org/10.3390/app14010172).
- Vorobieva I. A., Grekov E., Krushelnitskii K., et al. High Resolution Seismicity Smoothing Method for Seismic Hazard Assessment // *Russian Journal of Earth Sciences*. — 2024. — P. 1–10. — DOI: [10.2205/2024ES000892](https://doi.org/10.2205/2024ES000892).
- Vorobieva I. A., Gvishiani A. D., Dzeboev B. A., et al. Nearest Neighbor Method for Discriminating Aftershocks and Duplicates When Merging Earthquake Catalogs // *Frontiers in Earth Science*. — 2022. — Vol. 10. — DOI: [10.3389/feart.2022.820277](https://doi.org/10.3389/feart.2022.820277).
- Yamin L. E., Reyes J. C., Rueda R., et al. Practical seismic microzonation in complex geological environments // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. — 2018. — Vol. 114. — P. 480–494. — DOI: [10.1016/j.soildyn.2018.07.030](https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.07.030).
- Zaalishvili V. B. Physical bases of seismic microzoning. — Moscow : OIPE RAS, 2000. — EDN: [RJATBD](https://doi.org/10.2205/2024ES000892) ; (in Russian).
- Zaalishvili V. B. Seismic Microzonation of Urban Territories, Settlements and Large Construction Sites. — Moscow : Nauka, 2009. — EDN: [PWRPGJ](https://doi.org/10.2205/2024ES000892) ; (in Russian).
- Zaalishvili V. B., Dzeranov B. V., Gabaraev A. F. Seismic Hazard Assessment of the Territory and Construction of Probability Maps // *Geology and Geophysics of the South of Russia*. — 2011. — No. 1. — P. 48–58. — (In Russian).
- Zaalishvili V. B., Mel'kov D. A. Features of the Stone-Ice Avalanche in the Region of Devdorak Glacier on May 17, 2014 on the Instrumental Data of the Karmadon Parametric Range // *Geology and Geophysics of Russian South*. — 2017. — No. 4. — P. 39–47. — DOI: [10.23671/vnc.2017.4.9524](https://doi.org/10.23671/vnc.2017.4.9524). — (In Russian).
- Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Gabeeva I. L., et al. Seismic Microzoning of Vladikavkaz City Territory // *Earthquake-resistant construction. Safety of structures*. — 2012. — No. 1. — P. 49–58. — EDN: [QJGQXJ](https://doi.org/10.2205/2024ES000892) ; (in Russian).
- Zaalishvili V. B., Nevskaya N. I., Mel'kov D. A. Instrumental geophysical monitoring in the territory of northern Caucasus // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. — 2014. — Vol. 50, no. 2. — P. 263–272. — DOI: [10.1134/s1069351314020128](https://doi.org/10.1134/s1069351314020128).
- Zaliapin I., Ben-Zion Y. Earthquake clusters in southern California I: Identification and stability // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. — 2013. — Vol. 118, no. 6. — P. 2847–2864. — DOI: [10.1002/jgrb.50179](https://doi.org/10.1002/jgrb.50179).
- Zaliapin I., Ben-Zion Y. A global classification and characterization of earthquake clusters // *Geophysical Journal International*. — 2016. — Vol. 207, no. 1. — P. 608–634. — DOI: [10.1093/gji/ggw300](https://doi.org/10.1093/gji/ggw300).
- Zamyatin A. L. Increasing the information content of geological environment research based on ground penetrating radar sounding // *Mining information and analytical bulletin*. — 2006. — No. 6. — P. 130–132. — EDN: [HZOONB](https://doi.org/10.2205/2025es000959) ; (in Russian).