

УДК 550.311

Сеймотектоника очагов сильных землетрясений Кавказа: итоги исследований Евгения Александровича Рогожина

© 2023 г. А.Н. Овсюченко, А.С. Ларьков, Н.В. Андреева, Р.Н. Лукашова

ИФЗ РАН, г. Москва, Россия

Поступила в редакцию 02.06.2023 г.

Аннотация. Рассмотрены результаты последовательного и разностороннего изучения сеймотектоники очаговых зон сильных современных землетрясений Кавказа под руководством и при участии Е.А. Рогожина. С единых методических позиций оказались изучены очаги всех сильных землетрясений современности. Собранные данные о тектонической позиции сейсмических очагов позволяют сделать определённые выводы, имеющие практический интерес в целях оценки сейсмической опасности. Результаты детальных исследований сильных землетрясений Кавказа показывают, что при картировании сейсмической опасности на уровне детального сейсмического районирования реальное строение прогнозных очагов наиболее адекватно отражается картированием зон, пространственные параметры которых задаются в модели, исходя из глубинного и приповерхностного строения очага и его магнитуды.

Ключевые слова: Е.А. Рогожин, сеймотектоника, Кавказ, очаговая зона, сейсмическая опасность.

Для цитирования: Овсюченко А.Н., Ларьков А.С., Андреева Н.В., Лукашова Р.Н. Сеймотектоника очагов сильных землетрясений Кавказа: итоги исследований Евгения Александровича Рогожина // Российский сейсмологический журнал. – 2023. – Т. 5, № 3. – С. 28–44. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.3.02>. – EDN: GFJYHA

Введение

Крупнейшие активные разломы Кавказа могут породить землетрясения с $M \geq 7$ и интенсивностью 9 баллов и более. Сейчас это широко известно, однако, ещё в 80-х гг. прошлого века уровень прогнозной сейсмической опасности Кавказа считался умеренным (до 8 баллов), что было зафиксировано в нормативной карте Общего сейсмического районирования ОСР-78 [Сейсмическое ..., 1980]. Тогда использование сеймотектонических данных, по сути, ограничивалось корректировкой трассирования сейсмогенерирующих структур, а сейсмический потенциал оценивался по данным имеющейся скудной сейсмостатистики.

С тех пор представления о сейсмической опасности Кавказа претерпели значительную эволюцию. Евгений Александрович Рогожин стал крупнейшим специалистом в вопросах геодинамики, сеймотектоники и сейсмической опасности Кавказа, а история его научной деятельности напрямую связана с основными этапами переосмысления подходов к исследованиям сейсмической опасности этого региона.

Е.А. Рогожин принял участие в исследованиях сеймотектоники Кавказа в середине 1980-х гг. К тому времени он уже имел богатый опыт изучения геологической обстановки современных сильных землетрясений: Черногорского 1979 г. ($M=7.1$) в Югославии; Эль-Аснамского 1980 г. ($M=7.3$) в Алжире; Кумдагского 1983 г. ($M=5.7$) и Бурунского 1984 г. ($M=6.0$) в Западной Туркмении; Газлийского 1984 г. ($M=7.3$) в Западном Узбекистане и Кайраккумского 1985 г. ($M=5.7$) в Северном Таджикистане. Стало очевидным, что очаги сильных землетрясений имеют очень сложное строение, уровень сейсмической опасности определяется слишком большой множественностью факторов, а вопрос с геологическими критериями сейсмичности далёк от решения [Рогожин и др., 1987]. Дальнейшее развитие сеймотектоники виделось Е.А. Рогожиным в изучении условий, которые в заведомо известных сейсмических очагах приводят к накоплению и разрядке тектонических напряжений. Итогом стали результаты последовательного и разностороннего изучения сеймотектоники очаговых зон всех сильных землетрясений Кавказа, начиная с 1970 г. (рис. 1).

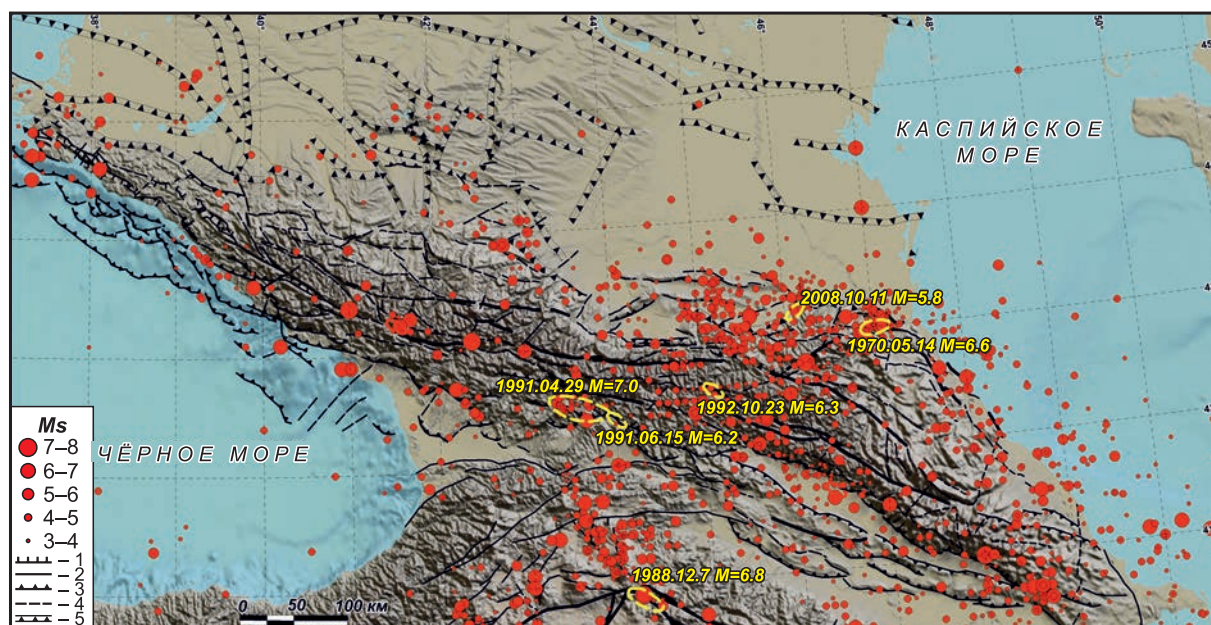


Рис. 1. Изученные очаги сильных землетрясений (жёлтые овалы) на фоне сейсмичности по данным [СКЗ ..., 2012] и генерализованной схемы активных тектонических нарушений (с использованием данных [Милановский, 1968; Рогожин и др., 2014; Бачманов и др., 2017]).

1 – сбросы, штрихи направлены в сторону опущенного крыла; 2 – преимущественно сдвиги; 3 – взбросы и надвиги, штрихи направлены в сторону поднятого крыла; 4 – разломы с неясной кинематикой; 5 – флексурно-разрывные зоны

Большая часть очагов землетрясений исследовалась непосредственно после сейсмических событий. Эти результаты представляют собой фундаментальную основу всех региональных сейсмотектонических построений, поэтому заслуживают специального обобщения.

«Традиционный» подход

Первое обобщение материалов сейсмотектонического изучения упомянутых выше землетрясений Средиземноморского подвижного пояса, а также произошедших на Кавказе Дагестанского (1970 г., $M=6.6$) и Черногорского (1976 г., $M=6.3$) землетрясений, позволило сделать выводы общего плана [Рогожин и др., 1987]. В первую очередь охарактеризована сегментация сейсмоактивных участков. Они имеют устойчивую ширину (примерно 30–40 км), заключены между поперечными или диагональными активными разломами и вмещают очаги с $M=5.5–7.5$. Возникновение более сильных землетрясений в этих геологических условиях принято считать маловероятным. Наличие систем молодых диагональных или поперечных активных разломов у границ блоков земной коры, развивающихся на поздних этапах геологической истории по-разному, обеспечивает возможность накопления напряжений и их

разрядку в виде резких смещений при землетрясениях. В особенности это относится к границам горных сооружений с передовыми прогибами. При землетрясениях по поверхностям некоторых стратиграфических горизонтов вероятно образование субгоризонтальных срывов, что затрудняет их выявление на поверхности.

Разработанный ранее на Большом Кавказе метод количественной оценки морфологической сложности складчатости [Рогожин, Яковлев, 1983] во второй половине 1980-х гг. был использован Е.А. Рогожиным в целях сейсмотектонического районирования [Рогожин и др., 1988; 1993в; 2001]. Выделенные с помощью этого метода тектонические зоны были сопоставлены с рельефом, данными о новейших деформациях речных террас и распределением эпицентров землетрясений (рис. 2). Эпицентры известных тогда слабых и умеренных землетрясений разместились на участках сочленения крупнейших глубинных разломов общекавказского простирания с разломами поперечной ориентировки, разделяющими блоки с разной направленностью новейших вертикальных движений. Структура поперечной зональности, сходная с рисунком будинированных слоёв на региональном уровне, создана в условиях поперечного к простиранию складчатой системы сжатия. Это сжатие вызывает

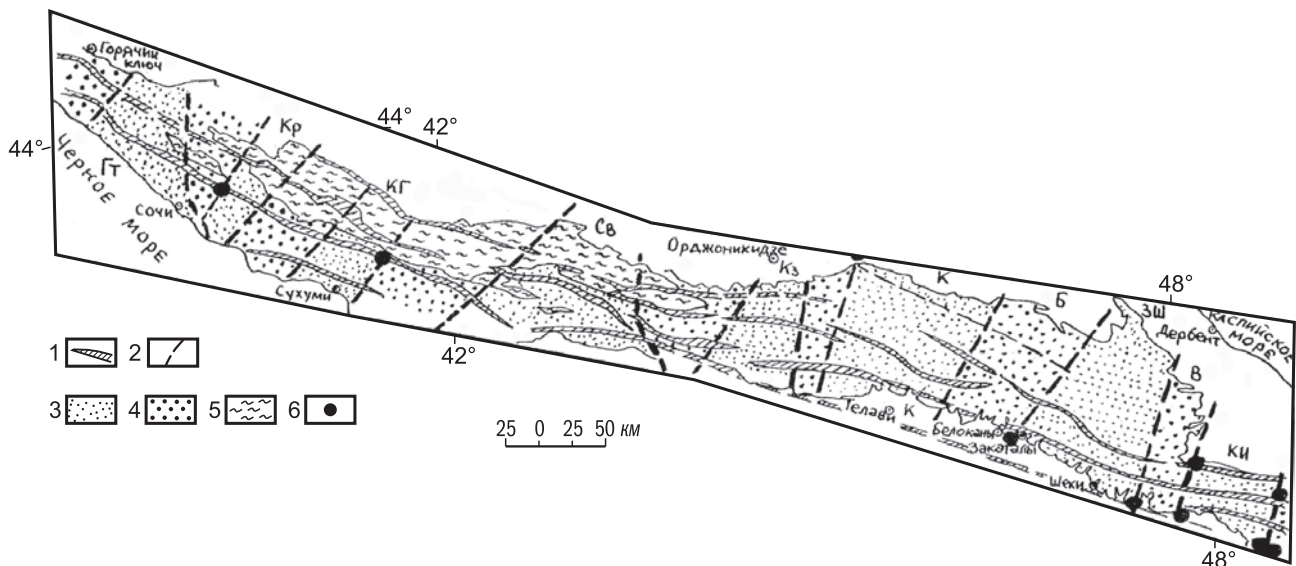


Рис. 2. Схема новейшей блоковой структуры Большого Кавказа [Рогожин и др., 2001].

1 – приразломные прогибы; 2 – границы поднятых и опущенных зон; 3 – относительно приподнятые антикавказские зоны; 4 – относительно опущенные антикавказские зоны; 5 – кристаллические толщи Северокавказского краевого массива; 6 – эпицентры крупнейших землетрясений на территории Большого Кавказа

растяжение вдоль оси Большого Кавказа, направленное к областям погружения складчатой системы на северо-западе и юго-востоке, что, в конечном счёте, обеспечивает продольное сейсмотектоническое течение в складчатой системе. Характерные размеры блоков, разделённых поперечными разломами, обычно составляют 30–50 км, реже – 20 или 70 км.

Катастрофические Спитакское (1988 г., $M_w=6.8$, $I_0=10$ баллов) и Рачинское (1991 г., $M_w=7.0$, $I_0=8-9$ баллов) землетрясения показали острую необходимость привлечения новых методов исследования сейсмотектоники и сейсмической опасности. Эпицентральные зоны этих событий стали настоящими полигонами для применения и разработки самых разных методов исследования сейсмичности.

Спитакское землетрясение 1988 г.

Вышедший на поверхность очаг Спитакского землетрясения представлял собой систему протяжённых сейсморазрывов, суммарная длина которых составила около 35 км. При этом выделено три крупных, близких по размеру сегмента, длина каждого из которых составила 8–9 км (рис. 3). На центральном сегменте зафиксированы максимальные амплитуды правого сдвига, достигшие 1.8 м, и вертикальной компоненты взброса – около 2 м. Разрывы ориентированы в соответствии с направлением длинных осей высших изосейст и с характеристиками механизма очага землетрясения, представленного взбросо-сдвигом.

Повторная нивелировка, проведённая ГУГК, позволила зафиксировать также и площадные сейсмотектонические деформации – обширное поднятие земной поверхности до 1.2 м, рост приразломных складок и опускание мелких внутригорных впадин [Рогожин, Филип, 1991].

Система сейсморазрывов не выходит за пределы изосейст 9-го и 10-го баллов [Рогожин, Рыбаков, 1990], в то время как сейсмогравитационные нарушения (оползни, осыпи, обвалы, трещины встряхивания, растяжения и расседания склонов в их привершинных частях, просадки насыпных грунтов и т.п.) распространились на более широкую площадь, чем сейсмотектонические, и укладываются в изосейсту 8 баллов и более.

При анализе сейсмодислокаций и гипоцентров афтершоков была определена глубина очага в 10–15 км, а также установлено его сложное строение и приуроченность к узлу сочленения Памбак-Севанской и Алаварской разломных зон, широтного и диагонального простирания соответственно [Рогожин, Филип, 1991]. Кроме того, была установлена активизация Арагац-Спитакского глубинного разлома субмеридионального простирания. Таким образом было определено, что очаг Спитакского землетрясения имел сложное строение. Он состоял из нескольких сегментов, при этом геологические и сейсмологические данные свидетельствуют о пяти сегментах очага, близких по времени вспарывания [Philip et al., 1992].

Отмеченная приуроченность сейсморазрывов к существовавшим ранее тектоническим формам

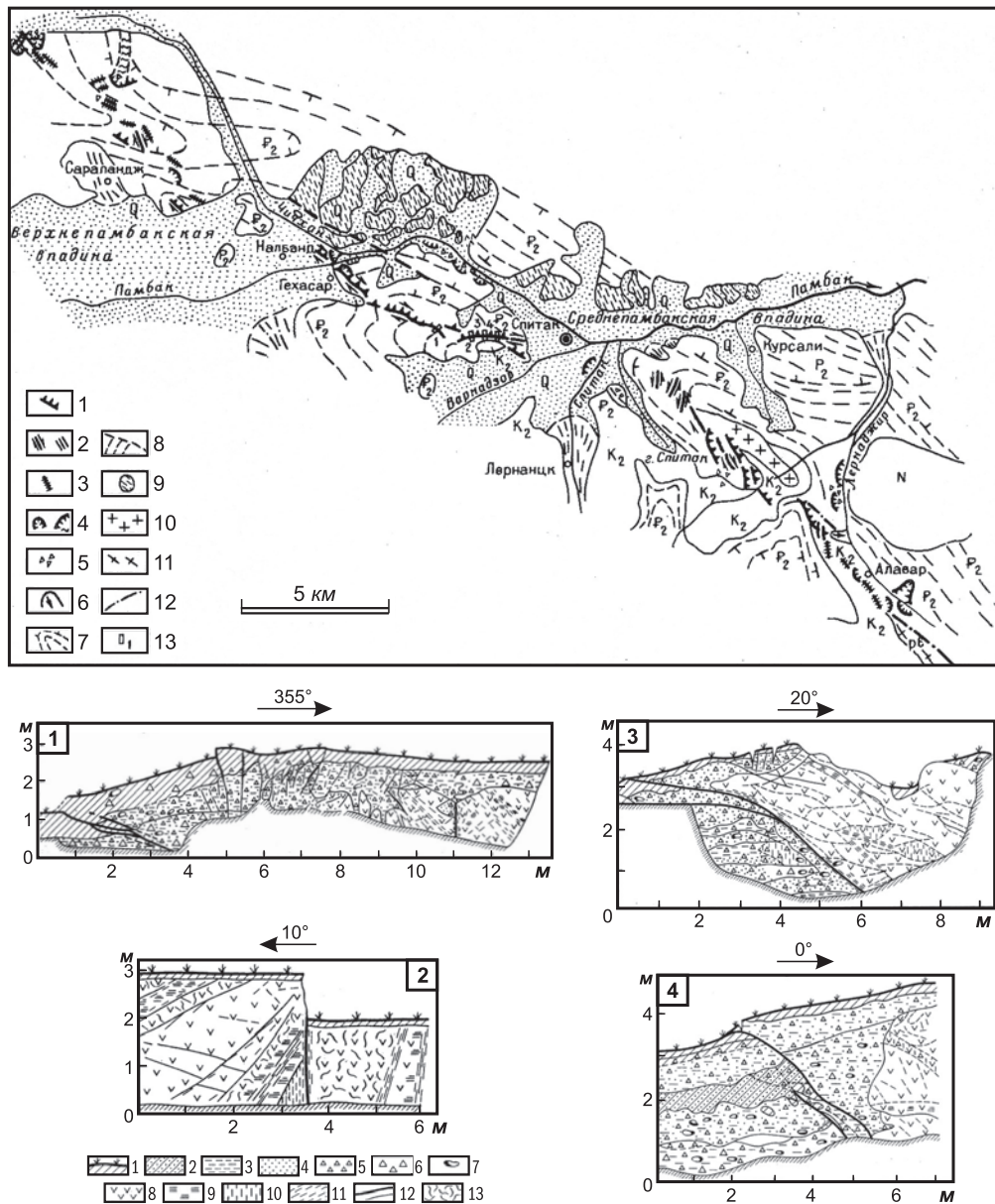


Рис. 3. Вверху – карта сейсмодислокаций Спитакского землетрясения [Рогожин, Филип, 1991].

1–3 – сейсмогенные разрывы: 1 – взбросо-сдвиги; 2 – сдвиги; 3 – трещины встряски и растяжения; 4–6 – сейсмогравитационные нарушения: 4 – оползни; 5 – обвалы горных масс; 6 – сели, вызванные землетрясением; 7 – направления простираения и падения слоёв в вулканогенно-осадочной толще эоцена; 8 – конусы выноса материала реками и временными водотоками; 9 – аномально поднятые плейстоценовые террасы; 10 – диориты; 11 – метаморфические толщи; 12 – разломы; 13 – траншеи и их номера.

Внизу – приповерхностное строение разрыва в траншеях [Рогожин, Рыбаков, 1990].

1 – дёрн и современная почва; 2 – палеопочва; 3 – суглинок; 4 – пески; 5 – дресва; 6 – щебень; 7 – крупные галька и валуны; 8 – вулканиты палеогена; 9 – зоны дробления; 10 – зоны ожелезнения; 11 – мелкие трещины; 12 – сейсмогенный разрыв; 13 – сильнотрещиноватые и раздробленные породы

рельефа и деформациям речных террас говорит о том, что смещения повторяются в одном и том же месте на протяжении длительного времени [Рогожин, Рыбаков, 1990]. Изучение приповерхностного строения сейсморазрыва Спитакского землетрясения включило в себя метод трен-

чинга, что стало его первым применением на территории Кавказа. Эти исследования, выполненные в четырёх специально пройденных траншеях [Албарде и др., 1990; Рогожин, Рыбаков, 1990; Philip et al., 1992], позволили выявить следы подобных или более сильных землетрясений,

возникавших в этом же очаге. Радиоуглеродные даты палеопочв, захороненных во время предыдущих событий — 17565 ± 170 и 24765 ± 770 лет, свидетельствуют о возрасте двух древних разрывообразующих землетрясений. Последнее разрывообразующее землетрясение, произошедшее перед Спитакским, предположительно произошло 2000–3000 лет назад [Албарде и др., 1990].

Рачинское землетрясение 1991 г.

Рачинское землетрясение с $M_w=7.0$ произошло 29 апреля 1991 г., спустя два с половиной года после Спитакского. По определению магнитуды оно стало самым сильным в сейсмической истории Кавказа за инструментальный период наблюдений.

Основным и самым разрушительным эффектом землетрясения стали обвалы, разнообразие оползней, каменные и грязекаменные лавины [Рогожин и др., 1991]. Также в эпицентральной зоне образовались сели, многочисленные оплывины, срывы осыпей, оседания склонов (эмбриональные оползни), вибрационные трещины и выбросы отдельных камней.

Подмытие и подрезание склонов способствовало возникновению огромного количества вторичных нарушений. Полную картину их распространения удалось получить при анализе материалов аэрофотосъёмки масштаба 1:17 000, выполненной через неделю после землетрясения, а также космических снимков масштаба 1:270 000 (увеличенных до масштаба 1:25 000), сделанных до и после землетрясения [Рогожин

и др., 1993б]. Обращает на себя внимание, что участки сгущения вторичных нарушений имеют кулисообразное расположение (рис. 4). Неоднородное распределение выделенных нарушений хорошо соотносится с полем афтершоков. По полученным данным установлены длина очага, равная 75–80 км, и его ширина в близмеридиональном направлении — около 30 км.

Участок сгущения вторичных нарушений, расположенный на востоке эпицентральной зоны, связан с Джавским землетрясением с $M=6.2$, произошедшим 15.06.1991 года. В сейсмотектоническом плане это землетрясение является обособленным, оно породило свои собственные многочисленные афтершоки. В западной части эпицентральной зоны обновилась нарушения склонов, которые, по всей видимости, возникли в соседнем очаге в результате последнего сильного события и уже существовали до Рачинского землетрясения.

Очаг Рачинского землетрясения представляет собой надвиг по пологой плоскости ($\sim 32\text{--}35^\circ$) северо-западного простирания (азимут $\sim 300^\circ$) [Рогожин и др., 1993а]. Очаг имеет сложное строение: на основе данных об инверсии объёмных волн было выделено три субочага, два из которых полого падают в северном направлении под углом $28\text{--}42^\circ$, а третий отразил растяжение в тылу надвиговой пластины [Vakarchuk et al., 2013]. Пологий наклон основной плоскости смещения к северу на глубинах 5–10 км хорошо объясняет отсутствие ярко выраженных сейсмотектонических разрывов при высокой магнитуде и небольшой глубине очага. Пологим наклоном

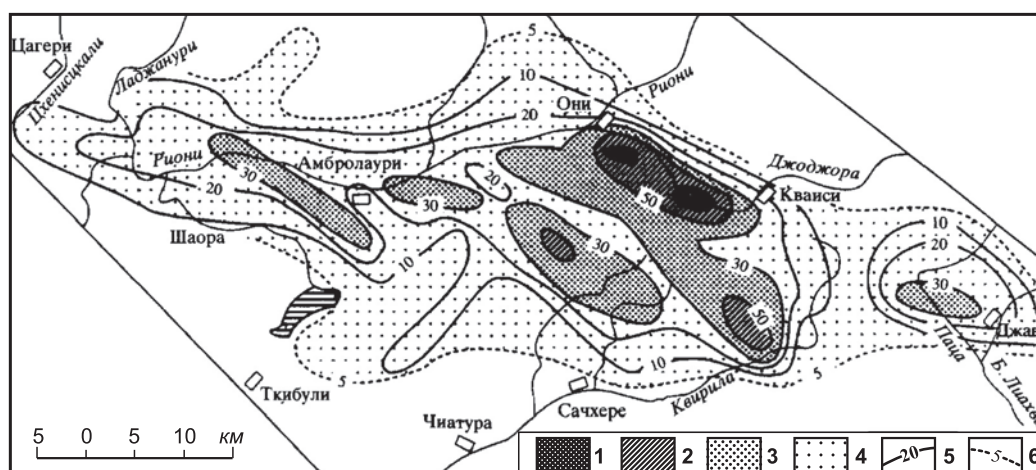


Рис. 4. Карта плотности распределения сейсмодислокаций [Рогожин и др., 1993б].

Площади с повышенной плотностью сейсмодислокаций (количество последних на 25 км^2):

1 — >70 ; 2 — $70\text{--}50$; 3 — $50\text{--}30$; 4 — $30\text{--}5$; изолинии плотностей сейсмодислокаций:

5 — повышенных; 6 — фоновой

плоскости смещения также можно объяснить широкое распространение вторичных нарушений, аномально низкую интенсивность воздействий и большие поперечные размеры поля афтершоков. Согласно данным сейсмотографии, значительная часть облака афтершоков приурочена к зоне раздела между высокоскоростным фундаментом и осадочным чехлом

[Arefiev et al., 2006]. По распределению гипоцентров афтершоков и сейсмотографическим данным до глубин 15–18 км выделяется не только надвиг, но и дополнительные более крутые плоскости смещения, связанные с активизировавшимися разломами в Окрибо-Сачхерской и Рача-Лечхумской тектонических зонах (рис. 5).

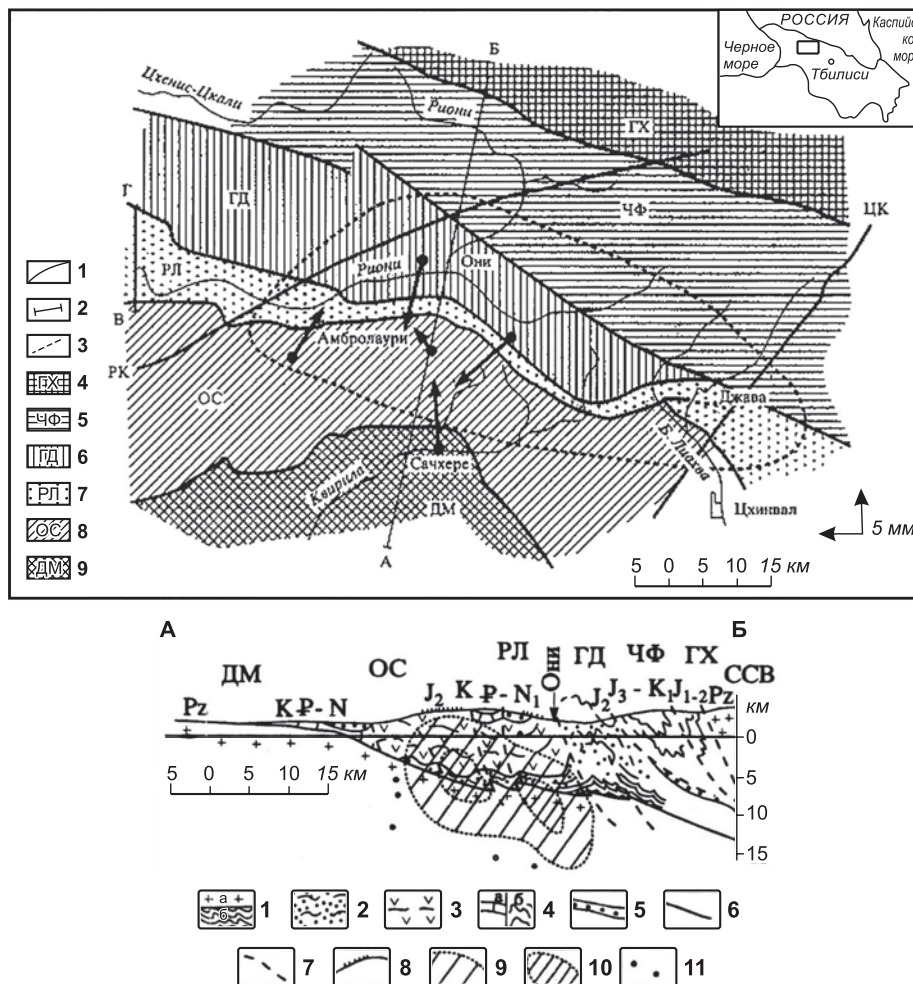


Рис. 5. Тектоническая позиция очага Рачинского землетрясения [Рогожин и др., 1993а] и вектора горизонтальных движений поверхности по данным GPS [Прилепин и др., 1997].

1 – крупнейшие разломы: ЦК – Цхинвали-Казбекский, РК – Риони-Казбекский; 2 – линия разреза; 3 – проекция очага землетрясения на поверхность по сейсмологическим данным; 4–9 – тектонические зоны: 4 – антиклинорий Главного хребта (ГХ); 5 – Чиаурский флишевый синклинорий (ЧФ); 6 – Гагрско-Джавская зона (ГД); 7 – Рача-Лечхумский прогиб (РЛ); 8 – Окрибо-Сачхерская зона (ОС); 9 – Дзирульский срединный массив (ДМ). Стрелками обозначены направления и величины векторов горизонтальных смещений, зарегистрированных локальной сетью GPS.

Внизу – схематический геологический разрез через очаговую зону Рачинского землетрясения [Рогожин и др., 1993а].

1 – доальпийский фундамент (а – дзирульского типа и кристаллического ядра; б – сванетского типа); 2–5 – альпийский геосинклинальный чехол: 2 – терригенные песчано-глинистые толщи лейаса и ааленского яруса средней юры; 3 – вулканогенная формация байосского яруса средней юры; 4 – карбонатные толщи верхней юры и мела (а – в абхазских фациях, б – во флишевых фациях); 5 – молассовые образования эоцена – миоцена; 6 – важнейшие стратиграфические границы; 7 – разломы; 8 – контуры облака афтершоков на глубине (по данным Международной эпицентральной экспедиции ИФЗ РАН). Над разрезом большими буквами показаны названия тектонических зон

На протяжении четырёх лет после Рачинского землетрясения в его эпицентральной области велась регистрация горизонтальных движений поверхности при помощи специально размещённой временной сети, состоящей из пяти GPS-станций. По полученным таким образом данным в очаговой зоне было зарегистрировано сокращение земной поверхности по Кахетино-Лечхумскому разлому со скоростью около 1 см/год . На основании этого был сделан прогноз об уменьшении скоростей [Прилепин и др., 1997]. К 2017 г. скорости горизонтального сжатия уменьшились до $3\text{--}4 \text{ мм/год}$ [Milyukov et al., 2018].

Барисахское землетрясение 1992 г.

Барисахское землетрясение с $M_s=6.3$, $I_0=7\text{--}8$ баллов произошло 23 октября 1992 г., через полтора года после Рачинского землетрясения. Землетрясение 1992 г. произошло к востоку от очага Рачинского землетрясения, на Южном склоне

Большого Кавказа. Очаг Барисахского землетрясения привязан к контакту кристаллического фундамента и складчатого чехла на границе автохтонных Гагро-Джавской, Рача-Лечхумской тектонических зон и Чиаурского флишевого синклинория [Рогожин, 1993]. Методом инверсии объёмных волн была получена модель очага в виде пологой плоскости северо-западного простирания (300°) с углом падения 15° в северо-восточном направлении и глубиной гипоцентра 16 км [Gomez et al., 1997]. Гипоцентры повторных толчков распределились на глубинах $15\text{--}20 \text{ км}$, маркируя поверхность фундамента (рис. 6). В этом районе кровля фундамента полого погружается к северу, появляясь вновь близко к поверхности только к югу от Главного Кавказского и Тлярятинского разломов. Землетрясение 1992 г. отразило пододвигание жёстких пород цоколя под вулканогенно-осадочные толщи южного склона Большого Кавказа.

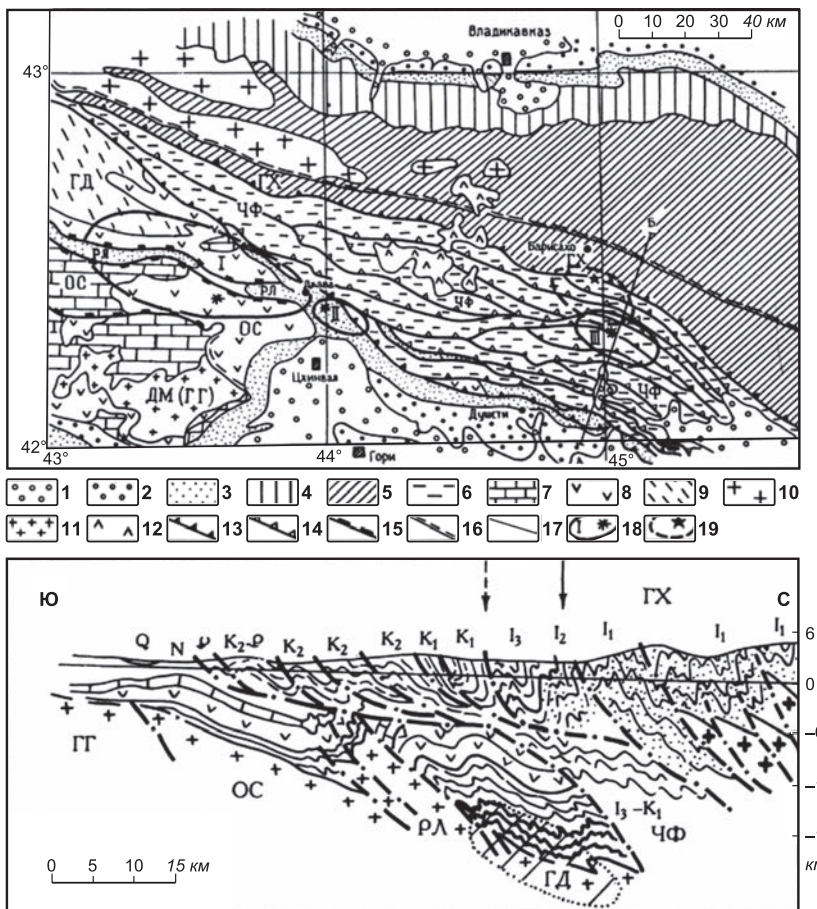


Рис. 6. Тектоническая позиция очаговых зон Барисахского и Рачинского землетрясений [Рогожин, 1993].

1–3 – отложения кайнозоя: 1 – четвертичные; 2 – неогеновые; 3 – палеогеновые; 4–6 – тектонические зоны мегантиклинория Большого Кавказа:

4 – северного склона; 5 – сланцевого ядра Главного (ГХ) и Бокового хребтов; 6 – Чиаурская флишевая (ЧФ); 7–9 – комплексы пород Гагро-Джавской (ГД), Рача-Лечхумской (РЛ), Окрибо-Сачхерской (ОС) зон и Дзирульского массива (ДМ): 7 – карбонатные толщи верхней юры и мела; 8 – вулканиты байоса; 9 – песчано-сланцевые толщи нижней юры и ааленского яруса средней юры; 10, 11 – породы доальпийского основания: 10 – кристаллического ядра; 11 – Грузинской глыбы (Дзирульский массив – ДМ(ГГ)); 12 – четвертичные лавы вулканов Казбекской группы; 13–16 – разломы: 13 – граничные взбросо-надвижки; 14 – внутризональные взбросо-надвижки; 15 – взбросы; 16 – прочие; 17 – некоторые стратиграфические границы; 18 – очаговые зоны сильных землетрясений (Рачинского 1991 г. (I), Джавского 1991 г. (II), Барисахского 1992 г. (III)) и их инструментальные эпицентры; 19 – контуры облака эпицентров афтершоков и эпицентр главного толчка Барисахского землетрясения по данным ГС РАН; А – Алазанская впадина; А–Б – линия разрезов.

На схематическом геологическом разрезе очаговой области Барисахского землетрясения стрелками показано положение эпицентра землетрясения по разным данным. Заштрихованная область – облако эпицентров афтершоков и гипоцентр главного толчка Барисахского землетрясения

Дагестанское землетрясение 1970 г.

Дагестанское землетрясение с $M_s=6.6$, $I_0=9$ баллов произошло 14 мая 1970 года. Его тектоническая позиция отразила весьма сложное строение сейсмоактивной среды в районе северо-восточного выступа Большого Кавказа – Дагестанского клина [Рогожин и др., 2014]. Несмотря на то, что гипоцентр располагался на небольшой глубине ($h=9-12$ км), плоскость подвижки в очаге на поверхность не вышла. Сразу после события в районе очага были проведены сейсмологические наблюдения экспедиционным отрядом ИФЗ АН СССР. Тем не менее попытки воссоздания модели очага в то время были затруднены обнаруженной крайне слабой связью между сейсмологическими проявлениями очагового процесса и приповерхностной геологической структурой [Дагестанское ..., 1980]. Позже, опираясь на данные об инверсии объёмных волн, была предложена сложная модель с тремя субочагами [Arefiev et al., 2004]. В этой модели подвижки по плоскостям субочагов имеют сдвигово-взбросовую кинематику. Однако накопленные к тому времени данные о тектоническом устройстве фронтальной зоны Дагестанского клина в ней использованы не были.

Построенные в начале 1990-х гг. геолого-геофизические разрезы показали резкое различие

строения северной части Дагестанского клина на разных глубинах. Глубокие горизонты характеризуются наличием складчатых дислокаций и взбросо-надвигов, дисгармоничных по отношению к приповерхностным, более простым, коробчатым складкам с малоамплитудными взбросами. Если в верхнем этаже взбросы имеют преимущественно крутое северное падение, то в нижнем они полого погружаются на юг, в сторону Осевой зоны Большого Кавказа. Раздел между этими двумя структурными этажами выявлен на глубине около 4 км.

Размещение гипоцентров афтершоков в сопоставлении с глубинной структурой показало, что повторные толчки сгущаются в корневых частях пологих поверхностей вдвиговых разрывов на глубинах от 2 до 10 км (рис. 7, 8). Эти разрывы образуют листрическую систему вдвинутых в северном направлении линз-чешуй, которые затухают в палеоген-неогеновых пластичных толщах нефтеносной майкопской серии. Мезозойские и более молодые отложения Дагестанского клина в этой области надвинуты на Терско-Каспийский краевой прогиб по прерывистой поверхности, погружающейся в южном направлении. Взбросы верхнего яруса в основном круто падают в обратном направлении, на север, т.е. в сторону прогиба.

1–5 – активные тектонические нарушения (с использованием данных [Милановский, 1968; Рогожин и др., 2014; Бачманов и др., 2017; Ovsyuchenko et al., 2020]): 1 – взбросы и надвиги; 2 – разломы с неясной кинематикой; 3 – преимущественно сдвиги; 4 – флексурно-разрывные зоны; 5 – контуры очаговой зоны Дагестанского землетрясения 1970 г.; 6 – положение геолого-геофизического разреза на рис. 8

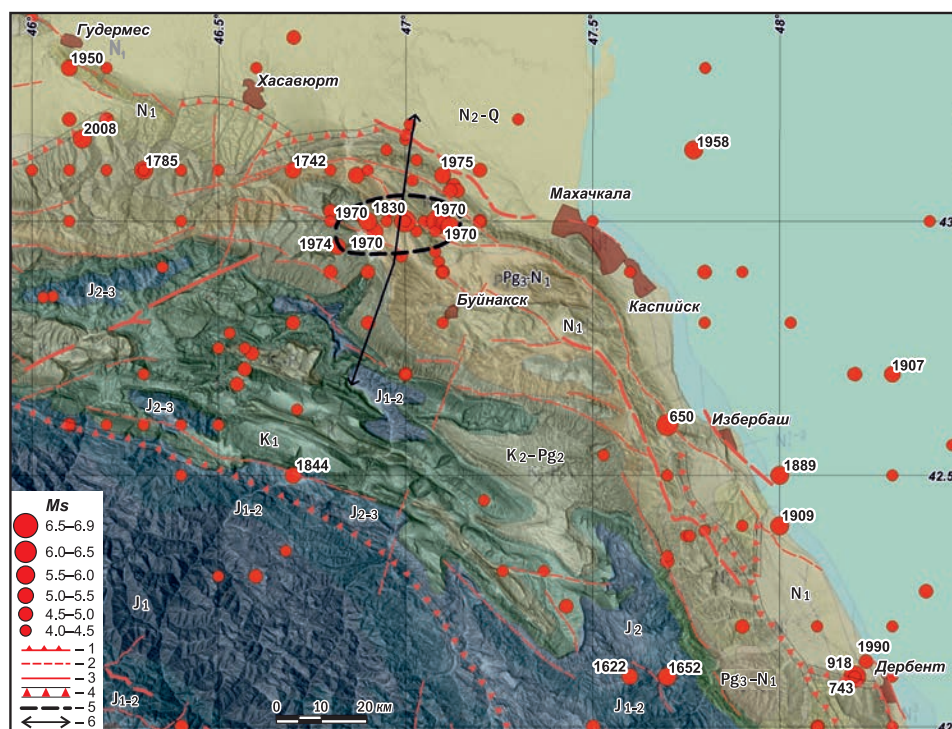


Рис. 7. Сейсмотектоническая схема Дагестанского клина с положением очаговой зоны землетрясения 1970 г. и эпицентрами ощутимых землетрясений по данным Дагестанского филиала ФИЦ ЕГС РАН [Общий..., 2007].

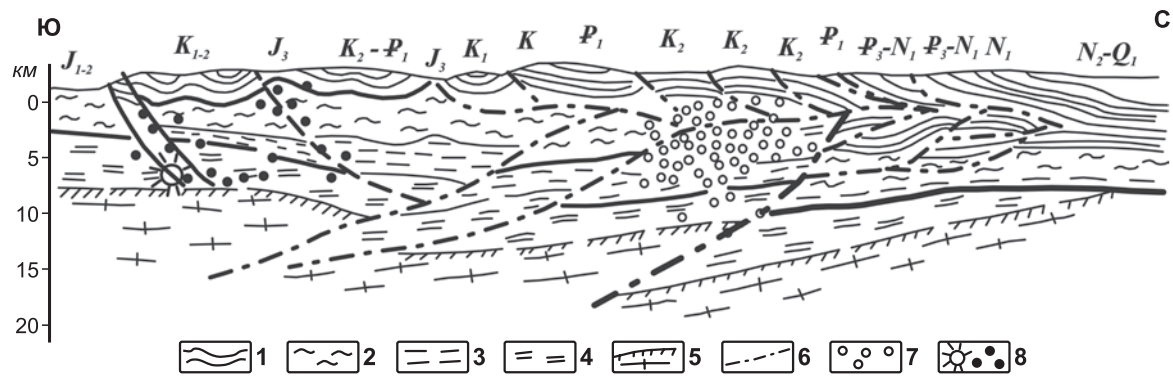


Рис. 8. Схематический геолого-геофизический разрез Дагестанского клина в районе Дагестанского (1970 г.) и Глохского (1992 г., $M=4.7$, $I_0=7$ баллов) землетрясений [Рогожин и др., 2014].

1 — толщи верхней юры, мела и кайнозоя; 2 — толщи флишеидной формации средней юры; 3 — толщи аспидной формации нижней–средней юры; 4 — метаморфизированные породы среднего палеозоя-триаса (?); 5 — кристаллический фундамент и кровля гранитогнейсового слоя; 6 — разломы; 7 — гипоцентры афтершоков землетрясения 1970 г.; 8 — гипоцентры главного толчка и афтершоков Глохского землетрясения 1992 г.

Таким образом, глубокие горизонты чехла и кристаллического фундамента, к которым приурочен очаг землетрясения 1970 г., на поверхности оказываются замаскированы структурами Дагестанского клина. Вероятнее всего, очаг связан со скрытыми глубинными перемещениями аллохтонных пластин во фронтальной части Дагестанского клина. Итоговая модель очага представлена в виде объёмного геологического тела, образованного как крупным уступом на поверхности кристаллического фундамента, так и обширной деформированной линзой в среднем и нижнем горизонтах чехла. В таких случаях проекция очагов на поверхность рассеивается пологими разноуровневыми плоскостями и может не соответствовать пространственным параметрам модели по сейсмологическим данным.

Землетрясения Восточного Кавказа

11 октября 2008 г. на западной окраине Дагестанского клина произошло Курчалойское землетрясение с $M_s=5.8$, $I_0=7-8$ баллов. Облако афтершоков, как и длинная ось изосейст высших баллов, вытянуты в северо-восточном направлении вдоль разлома, ограничивающего горное поднятие Дагестанского клина с северо-запада (рис. 9). Кинематика подвижки в очаге по инструментальным данным — левосторонний взбросо-сдвиг. При этом поверхность сместителя круто погружается под северо-западный склон Дагестанского клина в юго-восточном направлении. Таким образом, тенденция разрастания Дагестанского клина в северо-восточном направлении отразилась в сеймотектонической

позиции Курчалойского землетрясения [Рогожин и др., 2014].

После Рачинского землетрясения 1991 г. Рача-Джавская зона на Южном склоне Большого Кавказа оставалась высокосейсмичной все последующие годы. Наиболее сильные сейсмические события после 1991 г. здесь произошли в 2006 г. (Онийское-I, $M_w=5.3$, $I_0=4$ балла) и 2009 г. (Онийское-II, $M_w=6.2$, $I_0=7$ баллов). После Онийского-II землетрясения в 2009 г. Е.А. Рогожиным и С.С. Арефьевым были инициированы специальные сейсмологические, макросейсмические и геологические исследования на территории Южной Осетии [Рогожин и др., 2009]. В результате землетрясения возникли только вторичные нарушения — редкие обвалы, многочисленные осыпи на горных склонах и сели на небольших реках и ручьях. Выявилось сходство строения очагов Онийского-II и Рачинского землетрясений. В частности, установленный механизм подвижки в очаге Онийского-II землетрясения — надвиг с незначительной компонентой сдвига по пологой плоскости, погружающейся в север–северо-восточном направлении, аналогичен Рачинскому землетрясению. Сходство в строении очагов доказывает, что процесс надвигания Южного склона Большого Кавказа на Закавказский массив продолжился и в 2009 году.

Сейсмическая активизация в 2000–2018 гг. охватила Южный склон и Осевую зону Восточного Кавказа. Сильнейшими за эту активизацию являются два Бакинских землетрясения, произошедшие 25 ноября 2000 г. с $M_w=6.8$ и 6.5 ($I_0=8$ баллов). Позже имели место: Шекинский

рой с главным землетрясением 08.02.2004 г. ($M=5.1$); два Закавказских (III, IV) землетрясения 2012 г. с $M_w=5.6$ и 5.3 ; Исмаиллинское 2012 г. с $M_w=5.1$; Балакенское 2012 г. с $M_w=5.6$; толчок на границе Грузии и России 2013 г. с $M_w=5.5$; землетрясения 2014 г. с $M_w=5.0$ в районе Закаталы-Балакен и $M_w=5.1$ в районе г. Габала; Огузское 2015 г. с $M_w=5.5$ [Етурмишли и др., 2019]. Эти ощутимые сейсмические события происходили с необычно высокой частотой и охватили практически все сегменты восточной части Южного склона Большого Кавказа (рис. 10).

Механизм очагов представлен различными сочетаниями сбросов и взбросов со сдвиговой компонентой. Очаги преимущественно сбросового и взбросового типов связаны с разломами общекавказского, запад–северо-западного простирания. Преобладание сдвиговой компоненты в очагах связано с разломами антикавказской, в основном север–северо-восточной ориенти-

ровки. Кинематика смещений в очагах сильнейших из этой серии – Бакинских землетрясений – сбросы северо-западного простирания с незначительной сдвиговой составляющей. Очаги располагались в акватории Каспийского моря, на восточном погружении складчатого поднятия Большого Кавказа [Mammadli, Rogozhin, 2019]. Существенные различия кинематики смещений отражают резкие изменения современного напряжённо-деформированного состояния в земной коре на разных отрезках Восточного Кавказа и связаны с наличием активных поперечных структур, которые контролируют размещение очагов умеренных землетрясений [Етурмишли и др., 2019]. Поперечные разломы контролируют положение землетрясений с глубиной гипоцентров до 40 км, в то время как в разделяемых ими блоках гипоцентры обычно не достигают глубин более 15 км [Mammadli, Rogozhin, 2019].

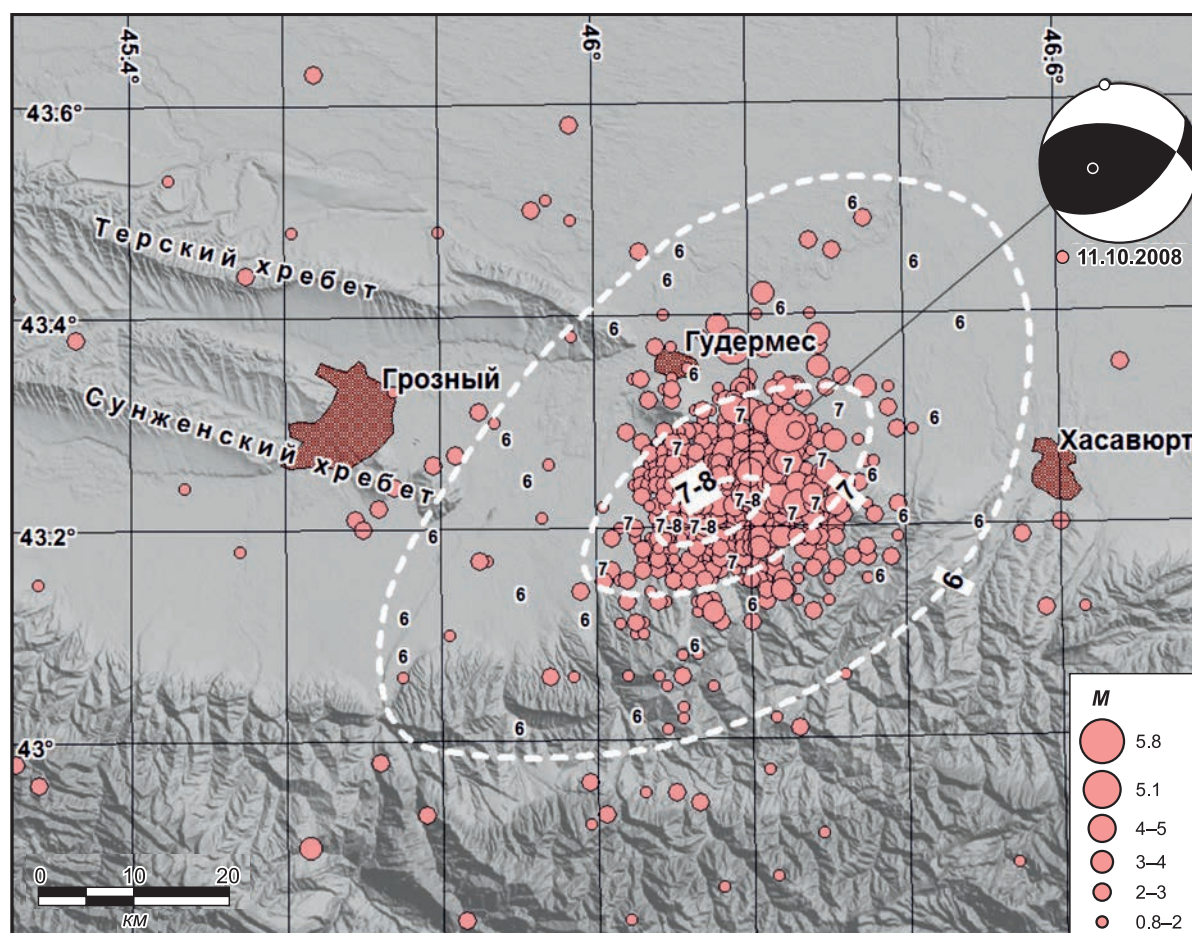


Рис. 9. Положение эпицентров сейсмических толчков, механизм очага и изосейсты землетрясения 11 октября 2008 г. по данным [Габсатарова и др., 2014].

Макросейсмические сведения собраны М.А. Гайсумовым и И.А. Керимовым [Керимов, Гайсумов, 2009]

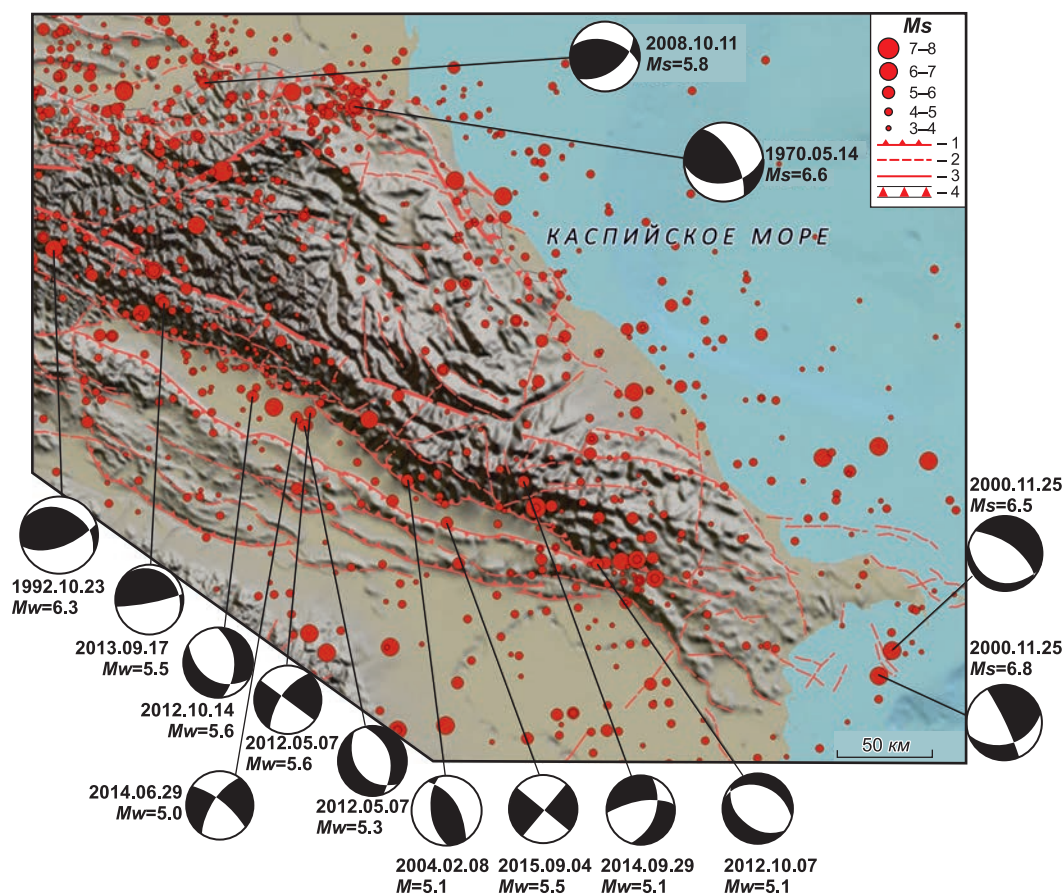


Рис. 10. Схема сеймотектоники Восточного Кавказа.

Диаграммы механизмов очагов сильнейших землетрясений приведены для событий, обсуждаемых в тексте, по данным [Gomez et al., 1997; Етирмишли и др., 2019]. Эпицентры исторических и инструментально зарегистрированных землетрясений представлены по данным ФИЦ ЕГС РАН, СКЗ ОСР-2012 и [Етирмишли и др., 2019]. 1–4 – активные тектонические нарушения (с использованием данных [Милановский, 1968; Рогожин и др., 2014; Бачманов и др., 2017; Овсяченко и др., 2020]): 1 – взбросы и надвиги; 2 – разломы по косвенным данным; 3 – преимущественно сдвиги; 4 – флексурно-разрывные зоны

Исследования очагов современных землетрясений Восточного Кавказа показали большую сложность кинематической картины происходящих здесь в настоящее время сеймотектонических движений и отсутствие непротиворечивой сеймотектонической модели. Так, обстановка растяжения, продемонстрированная Бакинскими землетрясениями 2000 г., не соответствует реконструируемой здесь (исходя из наличия океанической земной коры в Южно-Каспийской впадине) обстановке активной континентальной окраины.

Сеймотектоника очагов сильных землетрясений Кавказа и отдельные прикладные вопросы исследований сейсмической опасности

Актуальной проблеме оценки сейсмической опасности посвящено множество исследований, среди которых важно отметить методику типич-

зации земной коры, разработанную Г.И. Рейснером [Рейснер и др., 1993] на основании сопоставления параметров современной структуры и энергетического потенциала земной коры методом кластерного анализа, а также работы по распознаванию мест сильных землетрясений, основанных на связи крупных сейсмических событий с морфоструктурными узлами, в разработку и развитие которого внесли большой вклад учёные И.М. Гельфанд, В.И. Кейлис-Борок, А.Д. Гвишиани и др. С помощью этого метода места возможного возникновения сильных землетрясений вначале были определены для территорий Тянь-Шаня и Памира, а в дальнейшем – для регионов умеренной сейсмичности: Пиреней, Западные Альпы и Большой Кавказ [Гвишиани и др., 1987; Гвишиани и др., 1988].

Новой отправной точкой в исследованиях сеймотектоники Кавказа стали результаты исследований сейсморазрыва Спитакского

землетрясения. Они убедительно показали, что потенциальные очаги сильных землетрясений могут быть обнаружены, датированы и параметризованы геологическими методами в целях оценки сейсмической опасности. Сейсморазрыв Спитакского землетрясения возник в зоне активного разлома, смещения по которому в прошлом имели тот же знак смещений и носили импульсный характер с близкой величиной подвижки.

Одним из первых хорошо исследованных случаев сейсмичности в условиях покровной тектоники стало Рачинское землетрясение 1991 года. Сейсмический очаг напрямую не вышел на поверхность. В связи с этим Е.А. Рогожиным с коллегами был разработан и применён метод изучения внутренней структуры и пространственных параметров очага по распределению вторичных сейсмодислокаций. При этом широко использованы дистанционные, сейсмологические, геофизические и структурно-тектонические данные о геологическом строении и проявлениях очага землетрясения. Эти исследования показали, что тренчинг на активных разломах — далеко не исчерпывающий метод выявления и параметризации потенциальных очагов сильных землетрясений. Информация о положении очага и его сейсмической истории может быть получена и по данным о вторичных деформациях.

Позже по данным о вторичных деформациях, оставленных предыдущими землетрясениями, была восстановлена сейсмическая история очага Рачинского землетрясения [Ovsyuchenko et al., 2014]. Наиболее вероятный возраст предпоследнего сильного землетрясения, предшествовавшего Рачинскому, — примерно 1100–1600 лет назад. В долгосрочном аспекте сильнейшие события, подобные Рачинскому, группируются в сейсмические активизации продолжительностью от 2300 лет (5000–7300 лет назад, предпоследняя активизация) до 1600 лет (последняя, включая события 1991 г.). Среди известных аналогов на Кавказе можно привести Шемахинскую эпицентральною зону, также расположенную на Южном склоне Большого Кавказа. Здесь разрушительные землетрясения начались в XVII в. и продолжились в XIX–XX вв.

Исследования Рачинского и Барисахского землетрясений выявили основную направленность сейсмогенеза Большого Кавказа. Главную роль здесь играют взбросо-надвиги, вытянутые вдоль простирания основных хребтов, и диагональные или поперечные по отношению к ним сдвиги и взбросы. Очаги событий 1991 и 1992 гг. отразили основную тенденцию геологического развития Южного склона Большого Кав-

каза — наряду с относительным воздыманием складчатой системы, взаимное сближение ядра Центрального Кавказа и Дзирульского выступа фундамента Закавказского срединного массива, поддвижение пород фундамента последнего под Большой Кавказ и, в связи с этим, отрыв от основания и надвигание в южном направлении пород альпийского чехла. Это позволило начать региональные сейсмоструктурные исследования с новых позиций.

Модель очаговой зоны, контуры которой не соответствуют приповерхностному геологическому строению, получена на примере Дагестанского землетрясения 1970 года. Аналогичное сложное строение с несоответствием структурных планов на разных глубинах характерно для фронтальной зоны Дагестанского клина, антиклинальных зон Терско-Каспийского передового прогиба и Приморского Дагестана. Более того, такое сложное строение отмечается для всей зоны перехода от горного сооружения Большого Кавказа к Скифской плите и передовым прогибам Предкавказья.

Возможность выхода очага сильного землетрясения на поверхность зависит не только от глубины или магнитуды, но и от кинематики подвижки в очаге. Это убедительно показали исследования сейсмоструктурной Дагестанского и Рачинского землетрясений. Даже при большой магнитуде и небольшой глубине очаг надвигового землетрясения может не выйти на поверхность или же будет иметь очень сложное строение, распознать которое в целях оценки сейсмической опасности можно далеко не всегда. Таким образом стало ясно, что для возможности выхода очага сильного землетрясения на поверхность, помимо глубины гипоцентра, важную роль играют конкретные тектонические условия очаговой зоны. Чем глубже расположен очаг, положение плоскости подвижки и сложнее его структурный ансамбль, тем меньше вероятность появления сейсморазрыва на поверхности [Рогожин, 2012; Rogozhin et al., 2021]. Реализация смещения вдоль многих поверхностей также способствует более компактному положению проекции очага на поверхность. Все эти особенности напрямую связаны с макросейсмическим эффектом землетрясений [Tatevossian, Aptekman, 2011].

Заключение

Непосредственное отношение к оценке сейсмической опасности имеет вывод о том, что наличие или отсутствие ярко выраженных активных разломов на поверхности далеко не всегда

прямо отражает уровень сейсмической опасности. Кроме того, выход очага на поверхность может быть представлен складками и флексурами, т.е. деформациями изгиба, или завуалирован гравитационно-сеймотектоническими структурами. Реальные очаги Кавказа представляют собой объёмные структуры, проекции которых на поверхность не соответствуют линейным структурам — сейсмолинеаментам, использование которых в сеймотектонических моделях целесообразно только на масштабном уровне Общего сейсмического районирования. Это подчёркивает отличие методологических основ ОСР и детального сейсмического районирования (ДСР). Результаты детальных исследований сильных землетрясений Кавказа показывают, что при картировании сейсмической опасности на уровне ДСР реальное строение прогнозных очагов наиболее адекватно отражается картированием зон, пространственные параметры которых задаются в модели исходя из глубинного и приповерхностного строения очага и его магнитуды.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИФЗ РАН при финансовой поддержке международного гранта РФФИ № 21-55-46007 СТ_а.

Литература

- Албарде Ф., Богачкин Б.М., Олейник А.Э., Рогожин Е.А., Рыбаков Л.М., Филип Э. О доисторическом сильном землетрясении в районе г. Спитак (Северная Армения) // Доклады Академии наук СССР. — 1990. — Т. 313, № 2. — С. 397–400.
- Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и Тектонофизика. — 2017. — Т. 8, № 4. — С. 711–736. — DOI: 10.5800/GT-2017-8-4-0314. — EDN: ZWRGNL
- Габсатарова И.П., Селиванова Е.А., Головкова Л.В., Асманов О.А., Девяткина Л.В. (отв. сост.), Александрова Л.И., Иванова Л.Е., Малянова Л.С., Амиров С.Р., Мусалаева З.А., Сагателова Е.Ю., Гамидова А.М., Абдуллаева А.Р., Калоева И.Ю., Киселёва О.А., Перевозников К.А., Цирихова Г.В. Афтершоки Курчалойского землетрясения 11.10.2008 г. ($N=1003$) за 2008 г. // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. — Обнинск: ГС РАН, 2014. — Приложение на CD.
- Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Жидков М.П. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XV. Морфоструктурные узлы Большого Кавказа, $M \geq 5.5$ // Вычислительная сейсмология. Численное моделирование и анализ геофизических процессов. — 1987. — Вып. 20. — С. 136–148. — EDN: RZYSUF
- Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Кособоков В.Г., Ранциан Е.Я. Морфоструктуры и места землетрясений Большого Кавказа // Известия АН СССР. Физика Земли. — 1988. — № 9. — С. 42.
- Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г. Сейсмология, геология, геофизика / Ред. Х.И. Амирханов. — М.: Наука, 1980. — 220 с.
- Етирмишли Г.Д., Маммадли Т.Я., Рогожин Е.А., Сысолин А.И. Сейсмическая активизация в восточной части Южного склона Большого Кавказа в конце XX — начале XXI в. // Геофизические процессы и биосфера. — 2019. — Т. 18, № 2. — С. 82–96. — DOI: 10.21455/GRB2019.2-7. — EDN: RCNBPT
- Керимов И.А., Гайсумов М.Я. Курчалоевское землетрясение 11 октября 2008 г. // Вестник Академии наук Чеченской Республики. — 2009. — № 2. — С. 48–53. — EDN: PXJEYT
- Милановский Е.Е. Новейшая тектоника Кавказа. — М.: Недра, 1968. — 483 с.
- Общий каталог землетрясений на территории Дагестана. Макросейсмические и инструментальные данные о землетрясениях за период с VII в н.э. до 2005 г. / Отв. ред. Р.А. Левкович. — Махачкала: Эпоха, 2007. — 393 с. — EDN: QKHOQL
- Прилепин М.Т., Баласанян С., Баранова С.М., Гусева Т.В., Мишин А.В., Надария М., Рогожин Е.А., Розенберг Н.К., Сквородкин Ю.П., Хамбургер М., Кинг Р., Рейлингер Р. Изучение кинематики Кавказского региона с использованием GPS технологии // Физика Земли. — 1997. — № 6. — С. 68–75.
- Рейснер Г.И., Иогансон Л.И., Рейснер М.Г., Баранов Ю.Е. Типизация земной коры и современные геологические процессы. — М.: ОИФЗ РАН, 1993. — 208 с.
- Рогожин Е.А. Барисахское землетрясение 1992 г. на южном склоне Большого Кавказа: тектоническая позиция очага // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 1. — М.: ИФЗ РАН, 1993. — С. 148–151.
- Рогожин Е.А. Очерки региональной сеймотектоники. — М.: ИФЗ РАН, 2012. — 340 с. — EDN: QKLHLT
- Рогожин Е.А., Арефьев С.С., Богачкин Б.М., Систернас А., Филип Э. Комплексный анализ геологических и сейсмологических данных и сеймотектоническое представление об очаге Рачинского землетрясения // Физика Земли. — 1993а. — № 3. — С. 70–77.
- Рогожин Е.А., Арефьев С.С., Мараханов А.В., Овсюченко А.Н., Новиков С.С., Матвеев И.В., Молотков С.Г. Недавнее землетрясение на Центральном Кавказе // Геофизические исследования. — 2009. — Т. 10, № 4. — С. 64–66. — EDN: LJMGBF
- Рогожин Е.А., Богачкин Б.М., Нечаев Ю.В., Арефьев С.С. Опыт использования материалов изучения вторичных сейсмодислокаций для построения геологической модели очага сильного землетрясения // Доклады Академии наук. — 1993б. — Т. 333, № 1. — С. 96–100.
- Рогожин Е.А., Богачкин В.М., Нечаев Ю.В. Сеймотектоническое значение поперечной зональности Северо-Западной части Большого Кавказа // Построение моделей развития сейсмического процесса и предвестников землетрясений. Вып. 1. — М.: Труды ОИФЗ РАН, 1993в. — С. 139–148.
- Рогожин Е.А., Борисов Б.А., Богачкин Б.М. Рачинское землетрясение (Грузия, 29 апреля 1991 г.): материалы

- геологического обследования // Доклады АН СССР. — 1991. — Т. 321, № 2. — С. 353–358.
- Рогожин Е.А., Борисов Б.А., Рейснер Г.И., Шолто В.Н. Геологические условия возникновения очагов сильных землетрясений Средиземноморского альпийского пояса // Строение и эволюция тектоносферы. — М.: ИФЗ АН СССР, 1987. — С. 133–150.
- Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Лутиков А.И., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Горбатов А.В. Эндогенные опасности Большого Кавказа. — М.: ИФЗ РАН, 2014. — 256 с. — EDN: ZPKBCV
- Рогожин Е.А., Рейснер Г.И., Мамедов Т.Я. Поперечная зональность восточной части Большого Кавказа // Исследование сейсмической опасности. Вопросы инженерной сейсмологии. — 1988. — Вып. 29. — С. 15–20.
- Рогожин Е.А., Рыбаков Л.М. Тектоническая позиция и геологическое проявление Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 г. // Геотектоника. — 1990. — № 6. — С. 32–45.
- Рогожин Е.А., Собисевич Л.Е., Нечаев Ю.В., Собисевич А.Л., Бозаитиков О.А., Гурбанов А.Г., Коваленко В.И., Газеев В.М., Поляк Б.Г., Покровский Б.Г., Лаврушин В.Ю., Куликов В.И., Мелекесцев И.В., Кашук Д.Г., Миллюков В.К., Копяев А.В. Геодинамика, сейсмоструктура и вулканизм Северного Кавказа / Под ред. Н.П. Лавёрова. — М.: ОИФЗ РАН, 2001. — 338 с.
- Рогожин Е.А., Филип Э. Геолого-тектоническое изучение очаговой зоны Спитакского землетрясения // Известия АН СССР. Физика Земли. — 1991. — № 11. — С. 3–17.
- Рогожин Е.А., Яковлев Ф.Л. Опыт количественной оценки морфологии складчатости Тфанской зоны Большого Кавказа // Геотектоника. — 1983. — № 3. — С. 87–98.
- Сейсмическое районирование территории СССР / Отв. ред. В.И. Бунэ, Г.П. Горшков. — М.: Наука, 1980. — 308 с.
- СКЗ ОСП-2012. Специализированный каталог землетрясений Северной Евразии для общего сейсмического районирования территории Российской Федерации / Отв. ред. В.И. Уломов. — М., 2012. — URL: <http://seismos-u.ifz.ru/documents/Eartquake-Catalog-CK3.pdf>
- Arefiev S.S., Rogozhin E.A., Aptekman Z.Y., Bykova V.V., Dorbath C. Deep structure and tomographic imaging of strong earthquake source zones // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. — 2006. — V. 42, Is. 10. — P. 850–863. — DOI: 10.1134/S1069351306100090. — EDN: LJTZFF
- Arefiev S.S., Stasyuk E.I., Rivera L. Source model of the Dagestan, 1970 earthquake // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. — 2004. — V. 40, N 2. — P. 102–113. — EDN: LIRXCN
- Gomez J.M., Bukchin B., Madariaga R., Rogozhin E.A. A study of the Barisakho, Georgia, earthquake of 1992 October 23 from broadband surface and body waves // Geophysical Journal International. — 1997. — V. 129, N 3. — P. 613–623. — DOI: 10.1111/j.1365-246X.1997.tb04497.x. — EDN: LELUJJ
- Mammadli T.Y., Rogozhin E.A. Transverse faults of the Eastern Caucasus and their manifestations in seismicity // Seismic Instruments. — 2019. — V. 55, Is. 2. — P. 220–228. — DOI: 10.3103/S0747923919020099
- Milyukov V.K., Mironov A.P., Drobyshev V.N., Khubaev K.M., Ovsyuchenko A.N., Rogozhin E.A., Gorbatikov A.V., Nikolaev A.V. Velocities of present-day horizontal movements in the central sector of the Greater Caucasus according to GPS observations and their relation to tectonics and the deep structure of the Earth's crust // Doklady Earth Sciences. — 2018. — V. 481, N 1. — P. 879–882. — DOI: 10.1134/S1028334X18070279. — EDN: YBIFZJ
- Ovsyuchenko A.N., Korzhenkov A.M., Larkov A.S., Rogozhin E.A., Gadjev M.S. Seismotectonic deformation of the early medieval fortress wall of Derbent (Dagestan) // Doklady Earth Sciences. — 2020. — V. 493, N 1. — P. 535–538. — DOI: 10.1134/S1028334X20070132. — EDN: TJCPGP
- Ovsyuchenko A.N., Marakhanov A.V., Lar'kov A.S., Novikov S.S. Late quaternary dislocations and seismotectonics of the Racha earthquake source, the Greater Caucasus // Geotectonics. — 2014. — V. 48, N 6. — P. 440–458. — DOI: 10.1134/S0016852114050057. — EDN: UFKLCV
- Philip H., Rogozhin E., Bousquet J.C., Borisov B., Cisternas A., Karakhanian A. The Armenian earthquake of 1988 December 7: faulting and folding, neotectonics and paleoseismicity // Geophysical Journal International. — 1992. — V. 110, N 1. — P. 141–158. — DOI: 10.1111/j.1365-246X.1992.tb00718.x. — EDN: XJDFOP
- Rogozhin E.A., Ovsyuchenko A.N., Larkov A.S. Source of strong earthquake as a geological object // Geotectonics. — 2021. — V. 55, Is. 3. — P. 307–333. — DOI: 10.1134/S0016852121030079. — EDN: JFKPPJ
- Tatevossian R.E., Aptekman Z.Y. Source model and the macroseismic effect of the 1991 Racha earthquake // Seismic Instruments. — 2011. — V. 47, Is. 2. — P. 107–115. — DOI: 10.3103/S0747923911020095
- Vakarchuk R.N., Tatevossian R.E., Aptekman Z.Y., Bykova V.V. The 1991 Racha earthquake, Caucasus: Multiple source model with compensative type of motion // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. — 2013. — V. 40, Is. 5. — P. 653–659. — DOI: 10.1134/S1069351313050121. — EDN: RFNBCL

Сведения об авторах

Овсяченко Александр Николаевич, канд. геол.-мин. наук, зав. лаб. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия. E-mail: ovs@ifz.ru

Ларьков Александр Сергеевич, канд. геол.-мин. наук, зав. лаб. ИФЗ РАН, г. Москва, Россия. E-mail: las119@yandex.ru

Андреева Надежда Вячеславовна, канд. геол.-мин. наук, ст. науч. сотр. ИФЗ РАН, г. Москва, Россия. E-mail: znv@ifz.ru

Лукашова Раиса Николаевна, науч. сотр. ИФЗ РАН, г. Москва, Россия. E-mail: lur@ifz.ru

Seismotectonics of sources of strong earthquakes in the Caucasus: Results of studies by Evgeny Alexandrovich Rogozhin

© 2023 A.N. Ovsyuchenko, A.S. Larkov, N.V. Andreeva, R.N. Lukashova

IPE RAS, Moscow, Russia

Received June 2, 2023

Abstract The results of a consistent and versatile study of the seismotectonics of source zones of strong modern earthquakes in the Caucasus under the guidance and with the participation of E.A. Rogozhin. The sources of all strong modern earthquakes have been studied from a unified methodological standpoint. The collected data on the tectonic position of seismic sources make it possible to draw certain conclusions that are of practical interest in order to seismic hazard assessment.

Keywords E.A. Rogozhin, seismotectonics, Caucasus, source zone, seismic hazard.

For citation Ovsyuchenko, A.N., Larkov, A.S., Andreeva, N.V., & Lukashova, R.N. (2023). [Seismotectonics of sources of strong earthquakes in the Caucasus: Results of studies by Evgeny Alexandrovich Rogozhin]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 5(3), 28-44. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.3.02>. EDN: GFJYHA

References

- Albarede, F., Bogachkin, B.M., Oleinik, A.E., Rogozhin, E.A., Rybakov, L.M., & Philip, E. (1990). [On a prehistoric strong earthquake near the town of Spitak (Northern Armenia)]. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Doklady of the USSR Academy of Sciences], 313(2), 397-400. (In Russ.).
- Amirkhanov, H.I. (Ed.). (1980). *Dagestanskoe zemletriasenie 14 maia 1970 g. Seismologiya, geologiya, geofizika* [Dagestan earthquake May 14, 1970. Seismology, Geology, Geophysics]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 220 p. (In Russ.).
- Arefiev, S.S., Rogozhin, E.A., Aptekman, Z.Y., Bykova, V.V., & Dorbath, C. (2006). Deep structure and tomographic imaging of strong earthquake source zones. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 42(10), 850-863. DOI: [10.1134/S1069351306100090](https://doi.org/10.1134/S1069351306100090). EDN: LJTZFF
- Arefiev, S.S., Stasyuk, E.I., & Rivera, L. (2004). Source model of the Dagestan, 1970 earthquake. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 40(2), 102-113. EDN: LIRXCN
- Bachmanov, D.M., Kozhurin, A.I., & Trifonov, V.G. (2017). [The active faults of Eurasia database]. *Geodinamika i Tektonofizika* [Geodynamics and Tectonophysics], 8(4), 711-736. (In Russ.). DOI: [10.5800/GT-2017-8-4-0314](https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0314). EDN: ZWRGNL
- Bune, V.I., & Gorshkov, G.P. (Rev. Eds.). (1980). *Seismicheskoe raionirovanie territorii SSSR* [Seismic zoning of the territory of the USSR]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 308 p. (In Russ.).
- Gabsatarova, I.P., Selivanova, E.A., Golovkova, L.V., Asmanov, O.A., Devyatkina, L.V. (Resp. Comp.), Aleksandrova, L.I., Ivanova, L.E., Malyanova, L.S., Amirov, S.R., Musalaeva, Z.A., Sagatelova, E.Yu., Gamidova, A.M., Abdullaeva, A.R., Kaloeva, I.Yu., Kiseleva, O.A., Perevoznikov, K.A., & Tsirikhova, G.V. (2014). [Aftershocks of the Kurchaloy earthquake on October 11, 2008 for 2008]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii, 2008 god* [Earthquakes of Northern Eurasia, 2008]. Obninsk, Russia: GS RAS Publ. Application on CD (In Russ.).
- Gomez, J.M., Bukchin, B., Madariaga, R., & Rogozhin, E.A. (1997). A study of the Barisakho, Georgia, earthquake of 1992 October 23 from broadband surface and body waves. *Geophysical Journal International*, 129(3), 613-623. DOI: [10.1111/j.1365-246X.1997.tb04497.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb04497.x). EDN: LELUJJ
- Gvishiani, A.D., Gorshkov, A.I., Kossobokov, V.G., & Rantsian, E.Ya. (1988). [Morphostructures and earthquake occurrence sites of the Greater Caucasus]. *Izvestiia AN SSSR. Fizika Zemli* [Izvestiya of the Academy of Sciences of the USSR. Physics of the Solid Earth], 9, 42. (In Russ.).
- Gvishiani, A.D., Gorshkov, A.I., & Zhidkov, M.P. (1987). [Recognition of places of possible occurrence of strong earthquakes. XV. Morphostructural nodes of the Greater Caucasus, M≥5.5]. *Vychislitel'naia seismologiya. Chislennoe modelirovanie i analiz geofizicheskikh protsessov* [Computational seismology. Numerical modeling and analysis of geophysical processes], 20, 136-148. (In Russ.). EDN: RZYSUF

- Kerimov, I.A., & Gajsumov, M.Ja. (2009). [Kurchaloevsky earthquake on October 11, 2008]. *Vestnik Akademii nauk Chechenskoj Respubliki* [Bulletin of the Academy of Sciences of the Chechen Republic], 2, 48-53. (In Russ.). EDN: PXJEYT
- Levkovich, R.A. (Resp. Ed.). (2007). *Obshchii katalog zemletriasenii na territorii Dagestana. Makroseismicheskie i instrumental'nye dannye o zemletriaseniiakh za period s VII v n.e. do 2005 g.* [General catalog of earthquakes in the territory of Dagestan. Macro seismic and instrumental data on earthquakes for the period from the 7th Century AD until 2005]. Makhachkala, Russia: Epoch Publ., 393 p. (In Russ.). EDN: QKHOQL
- Mammadli, T.Y., & Rogozhin, E.A. (2019). Transverse faults of the Eastern Caucasus and their manifestations in seismicity. *Seismic Instruments*, 55(2), 220-228. DOI: 10.3103/S0747923919020099
- Milanovsky, E.E. (1968). *Noveishaia tektonika Kavkaza* [Recent tectonics of the Caucasus]. Moscow, Russia: Nedra Publ., 483 p. (In Russ.).
- Milyukov, V.K., Mironov, A.P., Drobyshev, V.N., Khubaev, K.M., Ovsyuchenko, A.N., Rogozhin, E.A., Gorbatiukov, A.V., & Nikolaev, A.V. (2018). Velocities of present-day horizontal movements in the central sector of the Greater Caucasus according to GPS observations and their relation to tectonics and the deep structure of the Earth's crust. *Doklady Earth Sciences*, 481(1), 879-882. DOI: 10.1134/S1028334X18070279. EDN: YBIFZJ
- Ovsyuchenko, A.N., Korzhenkov, A.M., Larkov, A.S., Rogozhin, E.A., & Gadjeev, M.S. (2020). Seismotectonic deformation of the early medieval fortress wall of Derbent (Dagestan). *Doklady Earth Sciences*, 493(1), 535-538. DOI: 10.1134/S1028334X20070132. EDN: TJCPGP
- Ovsyuchenko, A.N., Marakhanov, A.V., Lar'kov, A.S., & Novikov, S.S. (2014). Late quaternary dislocations and seismotectonics of the Racha earthquake source, the Greater Caucasus. *Geotectonics*, 48(6), 440-458. DOI: 10.1134/S0016852114050057. EDN: UFKLCV
- Philip, H., Rogozhin, E., Bousquet, J.C., Borisov, B., Cisternas, A., & Karakhanian, A. (1992). The Armenian earthquake of 1988 December 7: faulting and folding, neotectonics and palaeoseismicity. *Geophysical Journal International*, 110(1), 141-158. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1992.tb00718.x. EDN: XJDFOP
- Prilepin, M.T., Balasanyan, S., Baranova, S.M., Guseva, T.V., Mishin, A.V., Nadaria, M., Rogozhin, E.A., Rozenberg, N.K., Skovorodkin, Yu.P., Hamburger, M., King, R., & Reilinger, R. (1997). [Studying the kinematics of the Caucasus region using GPS technology]. *Fizika Zemli* [Physics of the Earth], 6, 68-75. (In Russ.).
- Rejsner, G.I., Ioganson, L.I., Rejsner, M.G., & Baranov, Yu.E. (1993). *Tipizatsiia zemnoi kory i sovremennye geologicheskie protsessy* [Typification of the Earth's crust and modern geological processes]. Moscow, Russia: UIPE RAS, 208 p. (In Russ.).
- Rogozhin, E.A. (1993). [The 1992 Barisakh earthquake on the southern slope of the Greater Caucasus: the tectonic position of the source]. In *Seismichnost' i seismicheskoe raionirovanie Severnoi Evrazii. Vyp. 1* [Seismicity and seismic zoning of Northern Eurasia. Issue 1] (pp. 148-151). Moscow, Russia: IPE RAS Publ. (In Russ.).
- Rogozhin, E.A. (2012). *Ocherki regional'noi seismotektoniki* [Essays on regional seismotectonics]. Moscow, Russia: IPE RAS Publ., 340 p. (In Russ.). EDN: QKLHLT
- Rogozhin, E.A., & Jakovlev, F.L. (1983). [Opyt kolichestvennoj ocenki morfologii skladchatosti Tfanskoj zony Bol'shogo Kavkaza]. *Geotektonika* [Geotectonics], 3, 87-98. (In Russ.).
- Rogozhin, E.A., & Philip, E. (1991). [Geological and tectonic study of the source zone of the Spitak earthquake]. *Izvestiia AN SSSR. Fizika Zemli* [Izvestia of the USSR Academy of Sciences. Physics of the Earth], 11, 3-17. (In Russ.).
- Rogozhin, E.A., & Rybakov, L.M. (1990). [Tectonic position and geological manifestation of the Spitak earthquake on December 7, 1988]. *Geotektonika* [Geotectonics], 6, 32-45. (In Russ.).
- Rogozhin, E.A., Arefiev, S.S., Bogachkin, B.M., Cisternas, A., & Philip, E. (1993a). [Complex analysis of geological and seismological data and seismotectonic representation of the source of the Racha earthquake]. *Fizika Zemli* [Physics of the Earth], 3, 70-77. (In Russ.).
- Rogozhin, E.A., Arefiev, S.S., Marakhanov, A.V., Ovsyuchenko, A.N., Novikov, S.S., Matveev, I.V., & Molotkov, S.G. (2009). [Recent earthquake in the Central Caucasus]. *Geofizicheskie issledovaniia* [Geophysical Research], 10(4), 64-66. (In Russ.). EDN: LJMGBF
- Rogozhin, E.A., Bogachkin, B.M., Nechaev, Yu.V., & Arefiev, S.S. (1993b). [Experience in using materials from the study of secondary seismic dislocations to build a geological model of the source of a strong earthquake]. *Doklady Akademii nauk* [Doklady of the Academy of Sciences], 333(1), 96-100. (In Russ.).
- Rogozhin, E.A., Bogachkin, V.M., & Nechaev, Yu.V. (1993c). [Seismotectonic significance of the transverse zonality of the Northwestern part of the Greater Caucasus]. In *Postroenie modelei razvitiia seismicheskogo protsessa i predvestnikov zemletriasenii. Vyp. 1* [Construction of models for the development of the seismic process and earthquake precursors. Iss. 1] (pp. 139-148). Moscow, Russia: UIPE RAS Publ. (In Russ.).
- Rogozhin, E.A., Borisov, B.A., & Bogachkin, B.M. (1991). [Racha earthquake (Georgia, April 29, 1991): materials of geological survey]. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Doklady of the USSR Academy of Sciences], 321(2), 353-358. (In Russ.).
- Rogozhin, E.A., Borisov, B.A., Rejsner, G.I., & Sholpo, V.N. (1987). [Geological conditions for the occurrence of foci of strong earthquakes in the Mediterranean Alpine belt]. In *Stroenie i evoliutsiia tektonosfery*

- [Structure and evolution of the tectonosphere] (pp. 133-150). Moscow, Russia: IPE AS USSR Publ. (In Russ.).
- Rogozhin, E.A., Ovsyuchenko, A.N., & Larkov, A.S. (2021). Source of strong earthquake as a geological object. *Geotectonics*, 55(3), 307-333. DOI: 10.1134/S0016852121030079. EDN: JFKPPJ
- Rogozhin, E.A., Ovsyuchenko, A.N., Lutikov, A.I., Sobisevich, A.L., Sobisevich, L.E., & Gorbatikov, A.V. (2014). *Endogennye opasnosti Bol'shogo Kavkaza* [Endogenous dangers of the Greater Caucasus]. Moscow, Russia: IPE RAS Publ., 256 p. (In Russ.).
- Rogozhin, E.A., Reisner, G.I., & Mamedov, T.Ya. (1988). [Transverse zoning of the Eastern part of the Greater Caucasus]. *Issledovanie seismicheskoi opasnosti. Voprosy inzhenernoi seismologii* [Study of seismic hazard. Questions of Engineering Seismology. Issue], 29, 15-20. (In Russ.).
- Rogozhin, E.A., Sobisevich, L.E., Nechaev, Yu.V., Sobisevich, A.L., Bogatkov, O.A., Gurbanov, A.G., Kovalenko, V.I., Gazeev, V.M., Polyak, B.G., Pokrovsky, B.G., Lavrushin, V.Yu., Kulikov, V.I., Melekestsev, I.V., Kashchuk, D.G., Milyukov, V.K., & Kopaev, A.V. (2001). *Geodinamika, seismotektonika i vulkanizm Severnogo Kavkaza. Pod red. N.P. Laverova* [Geodynamics, seismotectonics and volcanism of the North Caucasus. Ed. N.P. Laverov]. Moscow, Russia: UIPE RAS Publ., 338 p. (In Russ.).
- Tatevossian, R.E., & Aptekman, Z.Y. (2011). Source model and the macroseismic effect of the 1991 Racha earthquake. *Seismic Instruments*, 47(2), 107-115. DOI: 10.3103/S0747923911020095
- Ulomov, V.I. (Resp. ed.). (2012). *SKZ OSR-2012. Spetsializirovannyi katalog zemletriasenii Severnoi Evrazii dlia obshchego seismicheskogo raionirovaniia territorii Rossiiskoi Federatsii* [SKZ OSR-2012. Specialized catalog of earthquakes in Northern Eurasia for general seismic zoning of the territory of the Russian Federation]. Moscow, Russia. (In Russ.). Retrieved from <http://seismos-u.ifz.ru/documents/Eartquake-Catalog-CK3.pdf>
- Vakarchuk, R.N., Tatevossian, R.E., Aptekman, Z.Y., & Bykova, V.V. (2013). The 1991 Racha earthquake, Caucasus: Multiple source model with compensative type of motion. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 40(5), 653-659. DOI: 10.1134/S1069351313050121. EDN: RFBCL
- Yetirmishli, G.D., Mammadli, T.Ya., Rogozhin, E.A., & Sysolin, A.I. (2019). [Seismic activation in the eastern part of the southern slope of the Greater Caucasus in the late XX - early XXI Century]. *Geophysical Processes and Biosphere*, 18(2), 82-96. (In Russ.). DOI: 10.21455/GPB2019.2-7. EDN: RCNBPT

Information about authors

Ovsyuchenko Alexander Nikolayevich, PhD, Head of Laboratory of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (IPE RAS), Moscow, Russia. E-mail: ovs@ifz.ru

Larkov Alexander Sergeevich, PhD, Head of the Laboratory of the IPE RAS, Moscow, Russia. E-mail: las119@yandex.ru

Andreeva Nadezhda Vyacheslavovna, PhD, Senior Researcher of the IPE RAS, Moscow, Russia. E-mail: znv@ifz.ru

Lukashova Raisa Nikolaevna, Researcher of the IPE RAS, Moscow, Russia. E-mail: lur@ifz.ru