

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.34:551.1(082)

DOI: [10.46698/VNC.2023.45.94.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.45.94.006)

Оригинальная статья

Сейсмотектоника южной части центрального сегмента Большого Кавказа

В.В. Стогний¹, Г.А. Стогний¹, Н.Л. Пономарева²

¹Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук, Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: stogny_vv@mail.ru;

²Сейсмическая станция «Махачкала» ФИЦ ЕГС РАН, Россия, 367010, Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. Ахундова, 136

Статья поступила: 25.01.2023, доработана: 20.02.2023, принята к публикации: 02.03.2023

Резюме: Актуальность работы. Зона Южного склона Центрального сегмента Большого Кавказа сейсмически очень активна, в последние десятилетия здесь произошло несколько сильных землетрясений, в связи с этим изучение ее сейсмотектоники с выделением наиболее активных сейсмогенерирующих структур актуально. **Цель работы** – изучение связи глубинных структур земной коры зоны Южного склона Центрального сегмента Большого Кавказа, выявленных по материалам анализа и синтеза геолого-геофизических материалов, с характером его сейсмичности, и обоснованием возможных геодинамических моделей его развития. **Методы исследования.** Методы и методика работы заключались в обобщении материалов по тектоническому строению, сейсмичности, GPS-геодинамике и особенностей фокальных механизмов землетрясений южной части Центрального сегмента Большого Кавказа с обоснованием сейсмотектонической модели его ключевых участков. **Результаты работы.** На основании проведенных исследований установлено, что основными сейсмогенерирующими структурами южной части Центрального сегмента Большого Кавказа являются Дзирульский и Кутаисский высокоплотные блоки консолидированной земной коры. Эти структуры при общем тренде тектонических напряжений северо-северо-восточного направления, связанном с движением в этом направлении Закавказской плиты, обусловили формирование полей тектонических напряжений локального уровня, ответственных за формирование очаговых зон землетрясений. Сейсмотектоническими структурами более высоких порядков являются также глубинные разломы, особенно разграничивающие реологически разнородные структуры, одним из которых является Онийский разлом, представляющий собой северо-западное ограничение Дзирульского блока. Выделены наиболее сейсмоактивные Амбролаурский и Ткибульский сейсмоактивные узлы, проявляющиеся как участки концентрации эпицентров землетрясений и расположенные соответственно западнее северо-западного угла Дзирульского блока и в восточной части Кутаисского блока, в пределах которых можно ожидать сильные землетрясения.

Ключевые слова: сейсмичность, GPS-геодинамика, сейсмотектоника, Большой Кавказ, землетрясение, консолидированная кора, тектонический блок.

Благодарности: Работа выполнена по госзаданию Геофизического института Владикавказского научного центра Российской академии наук, код: FMSM-2022-0013.

Для цитирования: Стогний В.В., Стогний Г.А., Пономарева Н.Л. Сейсмотектоника южной части Центрального сегмента Большого Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(1): 76-96. DOI: 10.46698/VNC.2023.45.94.006.

GEOFYSICS

DOI: [10.46698/VNC.2023.45.94.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.45.94.006)

Original paper

Seismotectonics of the southern part of the Greater Caucasus Central segment

V.V. Stogny¹, G.A. Stogny¹, N.L. Ponomareva²¹Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: stogny_vv@mail.ru;²Seismic station "Makhachkala" FIC UGC RAS, 136 Akhundova Str., Makhachkala 367010, Russian Federation

Received: 25.01.2023, revised: 20.02.2023, accepted: 02.03.2023

Abstract: Relevance. The zone of the southern slope of the Central segment of the Greater Caucasus is seismically very active; in recent decades, several strong earthquakes have occurred here; therefore, the study of its seismotectonics with the identification of the most active seismogenic structures is relevant. **Aim.** The purpose of the work is to study the relationship between the deep structures of the earth's crust in the zone of the southern slope of the Central segment of the Greater Caucasus, identified from the analysis and synthesis of geological and geophysical materials, with the nature of its seismicity, and substantiation of possible geodynamic models of its development. **Methods.** The methods and methodology of the work consisted in summarizing the materials on the tectonic structure, seismicity, GPS geodynamics and features of the focal mechanisms of earthquakes in the southern part of the Central segment of the Greater Caucasus with the substantiation of the seismotectonic model of its key areas. **Results:** On the basis of the conducted studies, it was established that the main seismogenic structures in the southern part of the Central segment of the Greater Caucasus are the Dzirulsky and Kutaisky high-density blocks of the consolidated earth's crust. These structures, along with the general trend of tectonic stresses of the north-northeast direction, associated with the movement of the Transcaucasian plate in this direction, determined the formation of local level tectonic stress fields responsible for the formation of earthquake source zones. Seismotectonic structures of higher orders are also deep faults, especially delimiting rheologically heterogeneous structures, one of which is the Oniisky fault, which is the northwestern boundary of the Dzirulsky block. The most seismically active Ambrolaursky and Tkibulsky seismically active nodes are identified, which manifest themselves as areas of concentration of earthquake epicenters and are located respectively to the west of the northwestern corner of the Dzirulsky block and in the eastern part of the Kutaisky block, within which strong earthquakes can be expected.

Keywords: seismicity, GPS geodynamics, seismotectonics, Greater Caucasus, earthquake, consolidated crust, tectonic block.

Acknowledgment: This work was carried out according to the state assignment of the Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, code: FMSM-2022-0013.

For citation: Stogny V.V., Stogny G.A., Ponomareva N.L. Seismotectonics of the southern part of the Greater Caucasus Central segment. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2023. 13(1): 76-96. DOI: 10.46698/VNC.2023.45.94.006.

Введение

Зона Южного склона Центрального сегмента мегаантиклинория Большого Кавказа считалась практически асейсмичной до Рачинского землетрясения 29.04.1991 г., одного из сильнейших землетрясений XX века на Кавказе. В начале XXI века

в эпицентральной области Рачинского землетрясения произошли Онийское-I 06.02.2006 г. и Онийское-II 07.09.2009 г. землетрясения [Габсатарова и др., 2012; Габсатарова, 2015; Рогожин, 2017].

Геодинамические условия формирования Рачинского землетрясения 29.04.1991 г. рассмотрены в многочисленных публикациях, в том числе [Арефьев и др., 1993, 2006; Белоусов, 2009; Заалишвили, Бондырев, 2010; Рогожин и др., 1991; Fuenzalida et al., 1997; Triep et al., 1995]. В основе предлагаемых сеймотектонических моделей обычно заложен механизм поддвига Дзирульского массива Закавказского микроконтинента под южный склон Центрального Кавказа либо надвиг последнего на Закавказский микроконтинент [Адамия и др., 1989; Гамкрелидзе П., Гамкрелидзе И., 1977; Гиоргобиани, 2008; Рогожин и др., 2015]. Так в [Овсяченко и др., 2014; Tseng et al., 2016] охарактеризована серия надвигов, ответственных за землетрясения Рача-Джавской зоны. Роль тектонических нарушений в формировании очагов землетрясений в пределах Центрального сегмента и в целом по Большому Кавказу охарактеризована в [Gamkrelidze et al., 1998; Tibaldi et al., 2020; Triep et al., 1995].

В настоящее время территория южного склона Центрального Кавказа остается сейсмически активной, поэтому проблема анализа сейсмичности и условий ее реализации является актуальной [Zaalishvili et al., 2014]. Основой предложенной сеймотектонической модели формирования Рачинского и Онийских землетрясений Рача-Джавской зоны, а также современной сейсмичности зоны Южного склона Большого Кавказа является тектоническая схема консолидированной земной коры, разработанная по результатам интерпретации геолого-геофизических материалов.

Материалы и методы исследований

Анализ современной сейсмичности и геолого-геофизических материалов с целью разработки сеймотектонической модели Рача-Джавской сейсмической зоны южной части Центрального сегмента Большого Кавказа выполнен на площади, ограниченной 42,6–44,8° в.д. и 42,0–43,2° с.ш. (рис. 1).

В тектоническом отношении изучаемый район представлен зонами Главного хребта и Южного склона Центрального сегмента Большого Кавказа, а на юге Закавказским срединным массивом – палеомикроконтинентом [Тектоника ..., 2009]. Зона Главного хребта сложена протерозойскими метаморфическими породами и палеозойскими гранитами. Зона Южного склона сложена мезозойскими карбонатно-сланцевыми толщами Сванетского антиклинория, меловыми флишевыми отложениями Чиауро-Дибрарского синклинория, а также терригенными и вулканогенными толщами Гагро-Джавской зоны, ограниченной с юга Лечхумской шовной зоной, выраженной узкой Рача-Лечхумской грабен-синклиналью, выполненной отложениями верхней юры, мела и палеогена. Гагро-Джавская зона надвинута на сложенную породами юры и мела Окрибо-Сачхерскую зону, частично перекрывающую Дзирульский кристаллический массив Закавказской плиты.

В качестве основной информации при разработке схемы строения консолидированной земной коры служили результаты интерпретации гравитационного поля и данные по профилю ГСЗ Степное-Бакуриани [Павленкова, 2012].

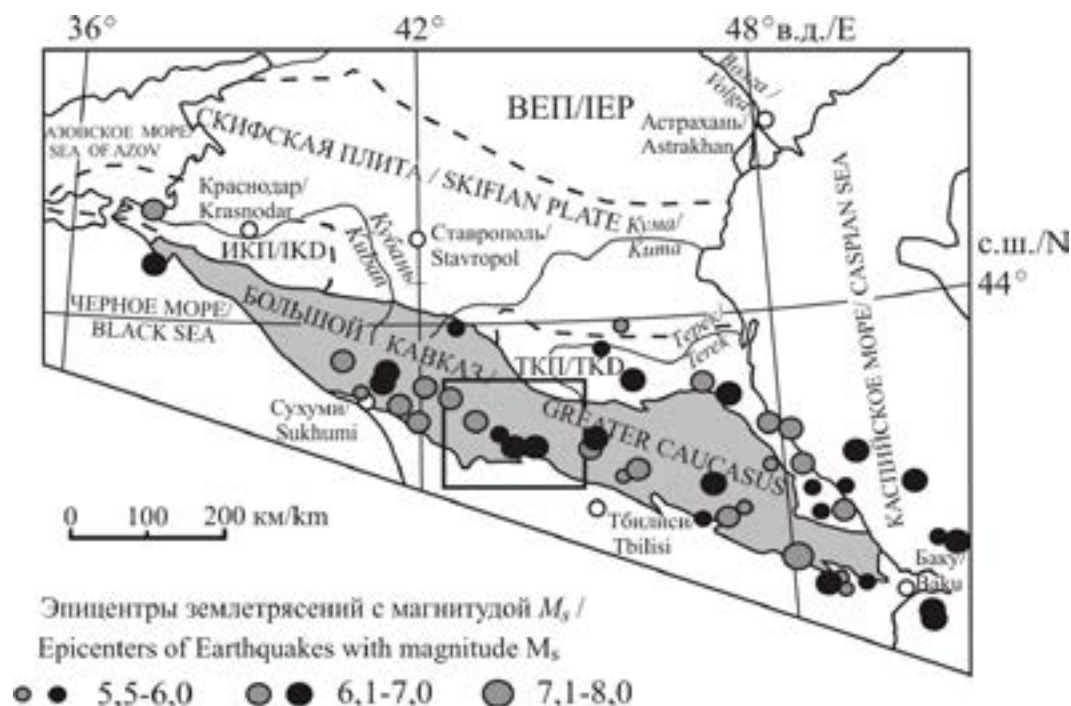


Рис. 1. Обзорная схема Черноморско-Каспийского региона: прямоугольник – район исследования. Буквами обозначены тектонические структуры разного порядка: ВЕП – Восточно-Европейская платформа, ИКП – Индоло-Кубанский прогиб, ТКП – Терско-Каспийский прогиб. Эпицентры сильных землетрясений Большого Кавказа по [Tibaldi et al., 2020 (серые – исторические, черные – инструментальные) /

Fig. 1. Overview scheme of the Black Sea-Caspian region: rectangle – study area. Letters designate tectonic structures of different orders: IEP, East European Platform; ICD, Indolo-Kuban depression; TKD, Terek-Caspian depression. Epicenters of strong earthquakes in the Greater Caucasus according to [Tibaldi et al., 2020] (grey – historical, black – instrumental).

При обосновании геодинамической модели движения блоков земной коры изучаемого района использованы материалы горизонтальных смещений GPS-пунктов, проведенные в период 1991–1997 гг., соответствующий Рачинскому землетрясению (29.04.1991) и его афтершоковому процессу [Шевченко и др., 1999], и в 2010–2013 годах после землетрясения Онийское-II (07.09.2009) [Шевченко и др., 2016, 2017]. Оценка скоростей и направлений движений пунктов GPS-наблюдений периода 1991–1997 гг. осуществлялась в местной системе координат относительно опорной геодезической станции «Зеленчук» (ZELB), которая расположена в пределах довольно стабильной Лабино-Малкинской зоны, а периода 2010–2013 гг. – относительно опорной геодезической станции «Ардон» (ARDN), располагающейся в стабильной приосевой части Бесланского прогиба Предкавказья. Данные GPS-наблюдений широко применяются не только для решения задач геодинамики на глобальном и региональном уровнях, но и на локальном уровне, при решении специальных задач сейсмологии [Srijayanthi et al., 2020; Yadav et al., 2017].

Анализ сейсмичности Рача-Джавской зоны объединяющей сильные землетрясения 1991–2009 годов, в том числе Рачинское и Онийские, приведен по литературным данным, а исследуемого района за период 2011–2021 гг. по материалам каталогов ФИЦ ЕГС РАН.

Сейсмичность южного склона Центрального сегмента

В пределах района исследования известны исторические Лечхуми-Сванетское землетрясение 1350 г. и Лабаскаиди-Церийское землетрясение 1750 г. (рис. 2), магнитуда которых оценивается соответственно 7,0 и 6,9 [Varazanashvili et al., 2011]. В голоцене по [Овсюченко и др., 2014] произошли две крупномасштабные активизации: среднеголоценовая активизация, продолжительность которой оценена в 2300 лет (7300–5000 лет назад) и позднеголоценовая активизация продолжительностью около 1600 лет, включающая Рачинское землетрясение 1991 г.

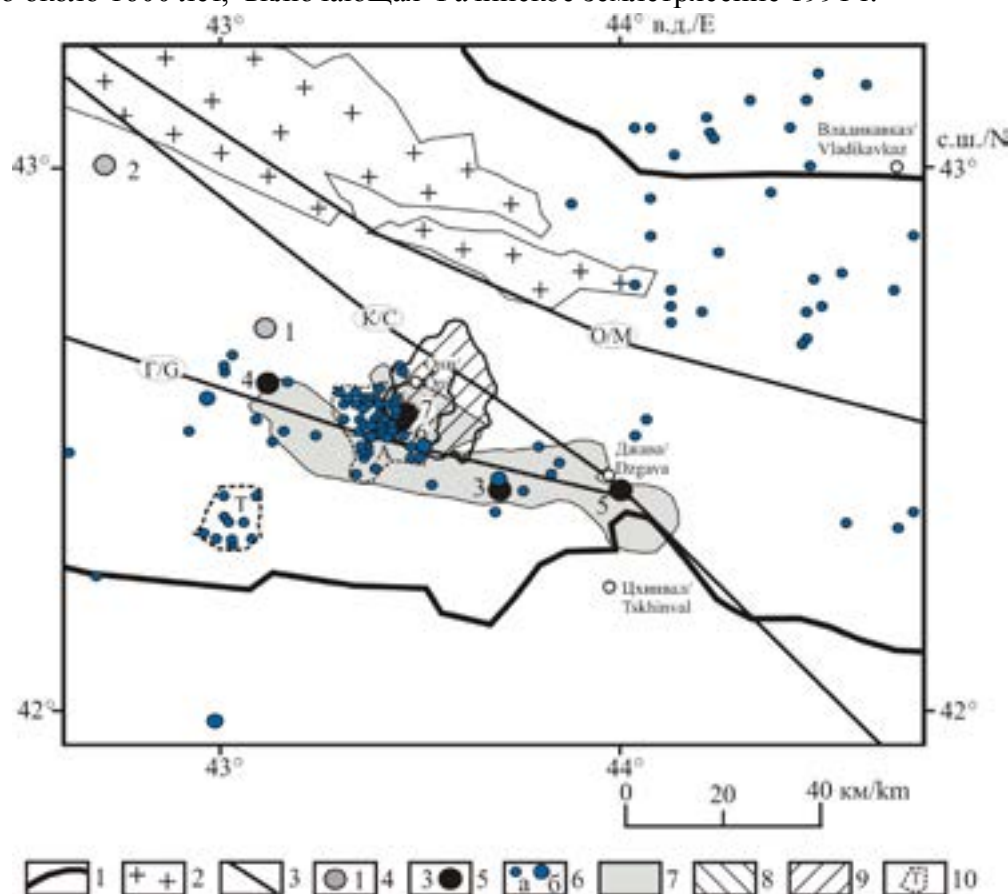


Рис. 2. Сейсмичность изучаемого района Центрального сегмента Большого Кавказа.

1 – границы мегаантиклинория Большого Кавказа; 2 – выходы раннедокембрийских метаморфических пород и палеозойских гранитов по [Геологическая ..., 1978]; 3 – тектонические нарушения по [Gamkrelidze et al., 1998]: О – Главный разлом, Г – Гагра-Джавский разлом, К – Кавказский фронтальный надвиг; 4–5 – сильные землетрясения: 4 – исторические (1 – Лечхуми-Сванетское, 1350 г.; 2 – Лабаскаиди-Церийское, 1750 г.), 5 – инструментальные (3 – Рачинское, 29.04.1991 по каталогу ISC, 4 – афтершок Рачинского землетрясения, 03.05.1991 по данным MOS, 5 – Джавское (Рачинское-II), 15.06.1991, 6 – Онийское-I, 06.02.2006, 7 – Онийское-II, 07.09.2009); 6 – эпицентры землетрясений за 2011–2021 гг. по данным каталогов ФИЦ ЕГС РАН: а – с $2,5 \leq M_s < 4,0$, б – с $M_s \geq 4,0$; 7–9 – эпицентральные области: 7 – Рачинского землетрясения 29.04.1991 г. по [Арефьев и др., 1993]; 8 – землетрясения Онийское-I по [Габсатарова и др., 2012]; 9 – землетрясения Онийское-II по [Габсатарова, 2015]; 10 – сейсмоактивные узлы за период 2011–2021 гг.: А – Амбролаурский, Т – Ткибульский /

Fig. 2. Seismicity of the study area of the Greater Caucasus Central segment.

1 – boundaries of the megaanticlinorium of the Greater Caucasus; 2 – outcrops of Early Precambrian metamorphic rocks and Paleozoic granites after [Geological ..., 1978]; 3 – tectonic faults after [Gamkrelidze et al., 1998]: M – Main fault, G – Gagra-Dzhava fault, C – Caucasian frontal thrust;

4–5 – strong earthquakes: 4 – historical (1 – Lechkhumi-Svanetskoe, 1350; 2 – Labaskaidi-Tseriiskoe, 1750), 5 – instrumental (3 – Rachinskoe, 04.29.1991 according to the ISC catalog, 4 – aftershock Racha earthquake, May 3, 1991 according to MOS data, 5 – Dzhevskoe (Racha II), June 15, 1991, 6 – Oniy I, February 6, 2006, 7 – Oniy II, September 7, 2009); 6 – earthquake epicenters for 2011–2021 years according to the catalogs of the FRC EGS RAS: a – for $2.5 \leq M_S < 4.0$, b – for $M_S \geq 4.0$; 7–9 – epicentral areas: 7 – Racha earthquake of April 29, 1991 after [Arefiev et al., 1993]; 8 – Oniy I earthquake after [Gabsatarova et al., 2012]; 9 – Oniy II earthquake after [Gabsatarova, 2015]; 10 – seismically active nodes for the period 2011–2021 years: A – Ambrolaursky, T – Tkibulsky.

Рачинское (Рача-Джавское по [Папалашвили и др., 1997] землетрясение произошло 29.04.1991 г. в 09:12:48,1 (час:мин:сек) и является одним из наиболее сильных из зарегистрированных на Кавказе в инструментальный период, его магнитуда $M_S=7,0$, а глубина гипоцентра по разным данным оценивалась от 5 до 17 км, землетрясение сопровождалось большим числом афтершоков, только в первой декаде мая 1991 г. их было зарегистрировано около 2,5 тыс.

Эпицентральная область Рачинского землетрясения протяженностью до 100 км при ширине 10–20 км простирается преимущественно вдоль Гагра-Джавского (по [Gamkrelidze et al., 1998]) разлома. В период 1991–1994 гг. было зарегистрировано 33 афтершока Рачинского землетрясения с $M_S > 4,5$, из которых 20 афтершоков произошло в день основного события, четыре из них имели магнитуду $M_S > 5,0$, а одно (29.04.1991 г. в 18:30:41,5) – $M_S=6,1$. На северо-западном фланге области вблизи г. Амбролаури 3 мая 1991 г. зарегистрирован сильный афтершок с магнитудой $M_S=5,3$ и глубиной гипоцентра 5 км, а на ее юго-восточном фланге вблизи г. Джава 15 июня 1991 г. – сейсмическое событие с магнитудой $M_S=6,2$ и глубиной гипоцентра $h=5$ км, считавшееся первоначально сильным афтершоком Рачинского землетрясения, а в последующем – самостоятельным землетрясением Рачинское-II (соответственно, основной толчок стал обозначаться Рачинское-I). Крупные сейсмические события на северо-западном и юго-восточном флангах эпицентральной области сформировали, по-видимому, собственные узлы концентрации эпицентров овальной формы. В центральной части области субпараллельно его основной ветви сформировалась северная ветвь концентрации эпицентров землетрясений.

Следующее сильное сейсмическое событие Онийское-1 произошло 6 февраля 2006 г., эпицентр его находился в пределах северной ветви Рачинской эпицентральной области вблизи г. Они [Габсатарова и др., 2012]. Магнитуда этого землетрясения по данным сети Северного Кавказа ГС РАН (NC) $M_S=5,0$, при глубине гипоцентра $h=12$ км (по данным других центров, TIF, MOS, HRVD, CSEM, глубина гипоцентра Онийского землетрясения определена в интервале $h=10$ – 14 км, два центра дали значения $h=17.7 \pm 8$ км (NEIC) и $h=24 \pm 1$ км (ISC)). Онийское землетрясение сопровождалось серией из 600 афтершоков, зарегистрированных сейсмической сетью Северо-Осетинского филиала ГС РАН. Эпицентральная область Онийского (06.02.2006 г.) землетрясения вынесена на рис. 2. Сейсмическая активность в данном районе отмечена также в мае 1971 г., когда было зарегистрировано три землетрясения с $M=4,0$, интенсивность сотрясений которых в г. Они оценивалась в 5–6 баллов по шкале MSK-64.

Землетрясение с магнитудой $M_S=5,8$, которое произошло 7 сентября 2009 г. (по каталогу ISC магнитуда этого землетрясения M_S оценивается в 5,7, а по данным [Zare et al., 2014] в $M_S=6,0$, $M_W=6,3$) получило название Онийское-II (соответственно землетрясение 06.02.2006 г. стало называться Онийское-I), его эпицентр располагался в нескольких километрах северо-восточнее эпицентра землетрясения Онийское-I, примерно в 10 км южнее г. Они. Детальное описание этого землетрясения дано в

[Габсатарова, 2015]. Глубина гипоцентра по данным центра NC сети Северного Кавказа ГС РАН оценена в 12 км, по данным других центров (TIF, MOS, ISC, NEIC, HRVD, IDC, CSEM) – в интервале 8–15 км.

Землетрясение Онийское-II сопровождалось большой последовательностью афтершоков, которых было зарегистрировано 1167, в их числе в первые сутки после основного толчка – 415, в последующие 2–5 суток – 256 афтершоков [Габсатарова, 2015], контуры области концентрации эпицентров афтершоков этого землетрясения вынесены на рис. 2. Отметим, что границы области концентрации эпицентров афтершоков землетрясения Онийское-II значительно (до 10–12 км) расширились преимущественно в восточном и северо-северо-восточном направлении по сравнению с контурами области концентрации эпицентров афтершоков землетрясения Онийское-I, вытянутость этой области также соответствует северо-северо-восточному направлению. Облако концентраций эпицентров Онинских землетрясений 2009 г. смещено к северу от Рачинской сейсмической зоны на 10–30 км, а глубина их реализации сместилась с 3–10 км, характерных для Рачинской зоны, в интервал 10–20 км [Tseng et al., 2016].

Таблица 1 / Table 1

Количество зарегистрированных землетрясений района исследований за период 2001–2021 гг. по каталогам ФИЦ ЕГС РАН. / The number of recorded earthquakes of the study area for the period 2001–2021 years according to the catalogs of the FIC UGC RAS

№ / №	Год / Year	Количество землетрясений / Number of earthquakes			
		Всего / Total	В том числе с магнитудой M_s / Including with magnitude M_s		
			$2,5 < M_s \leq 3,5$	$3,5 < M_s \leq 4,5$	$M_s > 4,5$
1.	2001	54	18	1	–
2.	2002	59	4	–	–
3.	2003	68	8	2	–
4.	2004	147	13	2	–
5.	2005	461	8	–	–
6.	2006	835	36	2	1
7.	2007	375	8	1	–
8.	2008	230	18	1	–
9.	2009	1283	77	2	2
10.	2010	304	20	1	–
11.	2011	321	14	3	1
12.	2012	223	8	1	–
13.	2013	233	10	–	–
14.	2014	197	10	–	–
15.	2015	229	13	1	–
16.	2016	176	9	–	–
17.	2017	147	7	1	–
18.	2018	143	8	–	1
19.	2019	130	9	1	–
20.	2020	177	8	3	–
21.	2021	362	13	2	–

В таблице 1 приведены данные по общему числу зарегистрированных землетрясений за период 2001–2021 гг. и землетрясений с магнитудой: $2,5 < M_S \leq 3,5$; $3,5 < M_S \leq 4,5$; $M_S > 4,5$. В рассмотренном промежутке времени сейсмическая активность начала возрастать с 2004 г., достигнув максимума в 2006 г., когда произошло землетрясение Онийское-I и было зарегистрировано 835 землетрясений, в том числе с магнитудой в интервале $2,5-3,5$ – 36, два землетрясения с магнитудой $M_S = 4,5$ и одно землетрясение имело магнитуду $M_S = 5,1$. Наибольший всплеск сейсмической активности приходится на 2009 г., связанный с землетрясением Онийское-II, когда было зарегистрировано 1383 землетрясения, в том числе с магнитудой в интервале $2,5-3,5$ – 71, в интервале $3,5-4,5$ – 8, и с магнитудой более 4,5 – 2 землетрясения. В период 2010–2019 гг. сейсмическая активность постепенно уменьшается, но с 2020 г. начинает возрастать и резко возросла 2021 г., примерно в два раза по сравнению с предыдущими годами. Эпицентры землетрясений за десятилетний период (2011–2020 гг.) с $2,5 \leq M_S < 4,0$ и $M_S \geq 4,0$ (наибольшая магнитуда из зарегистрированных в этот период – $M_S = 4,7$) вынесены на рис. 2.

В северо-восточной части Центрального сегмента, в его Северо-Осетинском секторе [Горбатилов и др., 2015], расположенном севернее Главного разлома, отмечается повышенная сейсмическая активность, но тенденция к значительной концентрации эпицентров землетрясений в определенных локальных областях не замечена [Стогний и др., 2015].

Наиболее ярко в период 2011–2021 гг. сейсмическая активность проявилась на ограниченной площади ($42,4-42,6^\circ$ с.ш., $43,3-43,5^\circ$ в.д.), расположенной западнее эпицентральной области землетрясения Онийское-I, в пределах которой за этот промежуток времени по данным каталогов ФИЦ ЕГС РАН зарегистрировано 387 землетрясений, в том числе с магнитудой $M_S \geq 2,5$ – 58 землетрясений. На данной площади выделен Амбролаурский сейсмоактивный узел, в котором отмечается резкое увеличение сейсмической активности в 2020–2021 гг. Вторая локальная площадь с высокой концентрацией эпицентров землетрясений расположена юго-западнее Амбролаурского сейсмоактивного узла ($42,25-42,45^\circ$ с.ш., $42,9-43,1^\circ$ в.д.), где за период 2011–2021 гг. по данным центра НС было зарегистрировано 43 землетрясения, 10 из которых имели магнитуду $M_S \geq 2,5$, в ее пределах выделен Ткибульский сейсмоактивный узел.

Сейсмотектоническая модель Рача-Джавской зоны

Основой предложенной сейсмотектонической модели Рача-Джавской зоны является схема блокового строения консолидированной земной коры Северо-Западного и Центрального сегментов мегаантиклинория Большого Кавказа, разработанная по результатам анализа геолого-геофизических материалов (рис. 3). Тектоническое строение консолидированной коры Северо-Западного сегмента и зоны Южного склона Центрального сегмента определяют выделенные по локальным гравитационным максимумам Анапский, Сочинский, Гагринский, Кутаисский и Дзирульский высокоплотные блоки [Стогний Г., Стогний В., 2017], амплитуда гравитационных максимумов которых оценивается до 20–30 мГал, а их размеры по длинной оси составляют в среднем 60 км.

Дзирульский блок консолидированной коры выделен в контурах Цхинвальского гравитационного максимума амплитудой более 25 мГал, южная часть которого в плане соответствует Дзирульскому кристаллическому массиву, сложенному про-

терозойскими метаморфическими породами и палеозой-мезозойскими гранитоидами [Стогний В., Стогний Г., 2022]. Северная часть Дзирульского блока перекрыта мезозойским осадочным комплексом зоны Южного склона Большого Кавказа. Блок ориентирован практически ортогонально по отношению к осевой зоне Большого Кавказа, а ограничивающий его Онийский глубинный разлом на поверхности выражен северо-западным окончанием Кахетино-Вандамской шовной зоны и далее в юго-восточном направлении – южным крылом Чиауро-Диббарского синклинория.

Глубинное строение Дзирульского высокоплотного блока характеризуют материалы профиля ГСЗ Степное-Бакуриани на отрезке Хашури-Джава. По материалам скоростного разреза профиля ГСЗ Степное-Бакуриани, полученного по результатам переинтерпретации первичных данных [Павленкова, 2012], на отрезке Хашури-Джава выделен высокоскоростной фрагмент верхней части земной коры (скорость продольных волн 7,1–7,3 км/с) протяженностью по профилю до 80 км. Верхняя его южная кромка находится на глубине около 1 км, а северная опущена на 5 км, глубина нижней кромки уменьшается с 20 до 15 км в северном направлении. Г.А. Павленкова [2012] данный высокоскоростной фрагмент интерпретирует как интрузивное тело. В нашей интерпретации высокоскоростной фрагмент верхней части земной коры сейсмического разреза ГСЗ отражает Дзирульский высокоплотный блок консолидированной коры Закавказской плиты. Высокоскоростной разрез земной коры зоны Южного склона Центрального сегмента показан также в материалах профиля ММЗ [Рогожин и др., 2015].

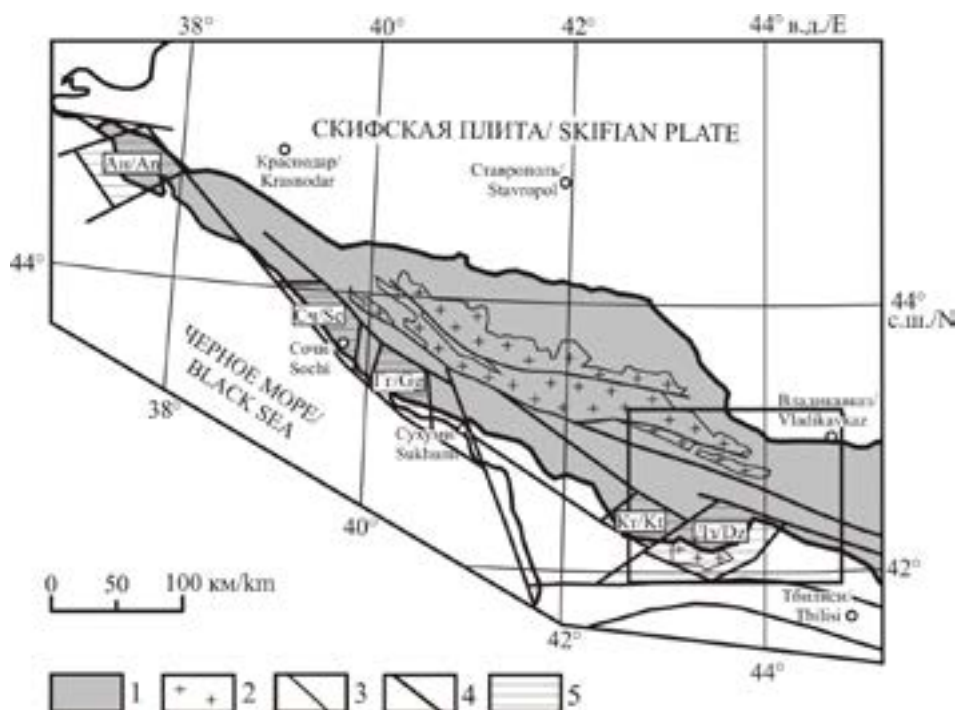


Рис. 3. Тектоническое строение консолидированной коры Северо-Западного сегмента и зоны Южного склона Центрального сегмента Большого Кавказа по результатам интерпретации геолого-геофизических материалов: прямоугольник – район исследования.

1 – контур мегаантиклинория Большого Кавказа по [Геологическая ..., 1992]; 2 – выходы протерозойских метаморфических пород и палеозойских гранитов Центрального сегмента и Дзирульского массива по [Геологическая ..., 1992]; 3–4 – разломы: 3 – по геологическим данным [Геологическая ..., 1992], 4 – по анализу гравитационного поля; 5 – высокоплотные блоки: Ан – Анапский, Сч – Сочинский, Гг – Гагринский, Кт – Кутаисский, Дз – Дзирульский /

Fig. 3. Tectonic structure of the consolidated crust of the Northwestern segment and the zone of the Southern slope of the Central segment of the Greater Caucasus according to the results of the geological and geophysical materials interpretation: a rectangle is the study area. 1 – outline of the Greater Caucasus megaanticlinorium after [Geological ..., 1992]; 2 – outcrops of Proterozoic metamorphic rocks and Paleozoic granites of the Central segment and the Dzirulsky massif after [Geological ..., 1992]; 3–4 – faults: 3 – according to geological data [Geological ..., 1992], 4 – according to the analysis of the gravitational field; 5 – high-density blocks: An – Anapsky, Sc – Sochinsky, Gg – Gagrynsky, Kt – Kutaissky, Dz – Dzirulsky.

Дзирульский блок продолжается под мезозойскими отложениями зоны Южного склона Большого Кавказа более чем на 40 км при глубине его подошвы до 20 км, а ограничивающий его Онийский разлом фиксирует южный борт мезозойского прогиба мегаантиклинория.

Для оценки кинематики Дзирульского блока консолидированной коры проведен анализ имеющихся материалов по горизонтальным смещениям геодезических пунктов GPS-наблюдений [Лукк, Шевченко, 2019], простираения главных осей сжатия фокальных механизмов землетрясений [Лукк, Шевченко, 2019; Tseng et al., 2016], а также направлений перемещения сейсмотектонических блоков земной коры после Рачинского землетрясения [Белоусов, 2009] (рис. 4).

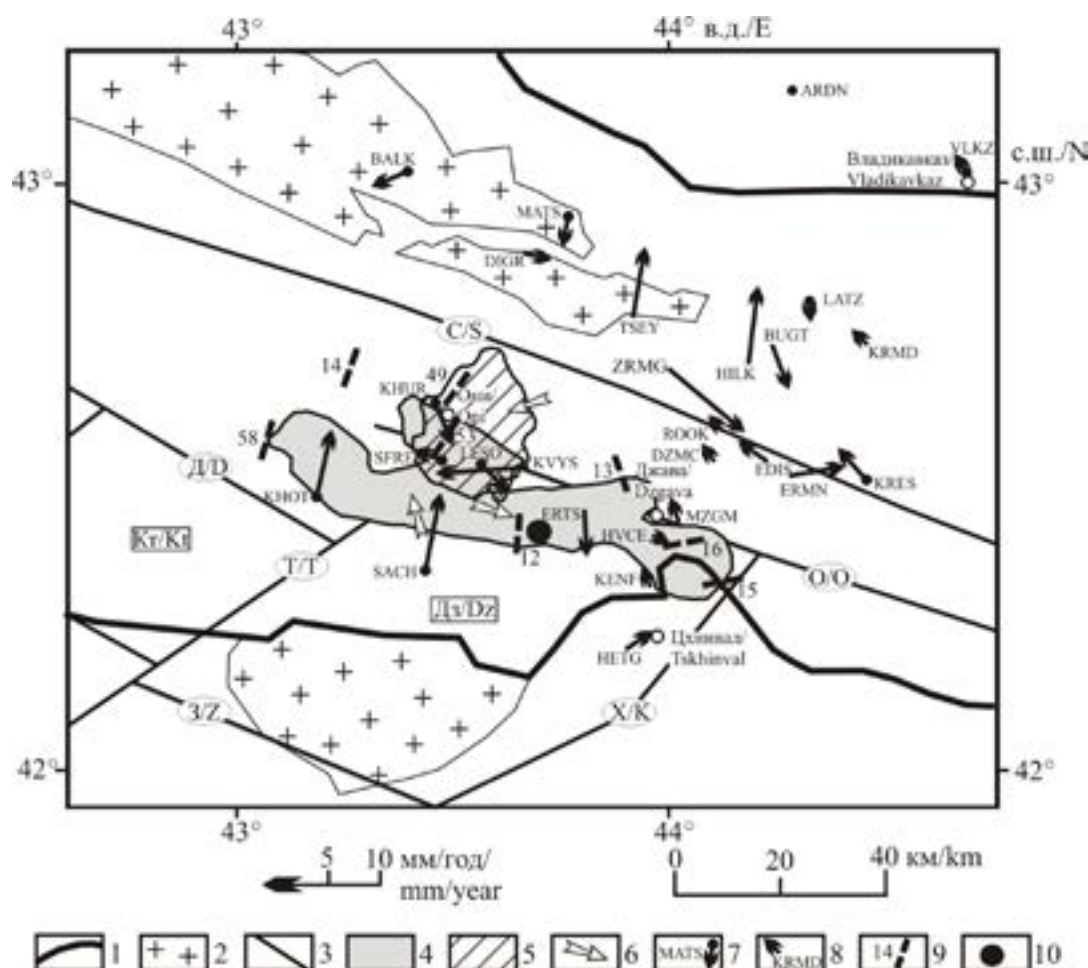


Рис. 4. Схема строения консолидированной коры района исследования по результатам интерпретации гравитационного поля [Гравиметрическая ..., 1990]. 1 – границы мегаантиклинория Большого Кавказа по [Геологическая ..., 1978]; 2 – выходы

протерозойских метаморфических пород и палеозойских гранитов Центрального сегмента Большого Кавказа и Дзирульского массива Закавказской плиты; 3 – глубокие разломы консолидированной коры: С – Сването-Алазанский, З – Зестафонский, О – Онийский, Д – Диагональный, Т – Терзольский, Х – Хашурский; 4–5 – эпицентральные области землетрясений: 4 – Рачинского 29.04.1991 г. по [Арефьев и др., 1993], 5 – Онийского-II 07.09.2009 г. по [Габсатарова, 2015]; 6 – направление горизонтального перемещения сеймотектонических блоков во время Рачинского землетрясения по [Белоусов, 2009]; 7–8 – векторы скоростей горизонтальных смещений пунктов GPS-наблюдений и их кодовые названия по [Лукк, Шевченко, 2019]: 7 – за 1991–1997 гг. относительно опорной геодезической станции ZELB, 8 – за 2010–2013 гг. относительно опорной геодезической станции ARDN; 9 – простираание главных осей сжатия фокальных механизмов землетрясений и их номера по [Лукк, Шевченко, 2019]; 10 – эпицентр Рачинского землетрясения (29.04.1991 г.). Буквами обозначены высокоплотные блоки консолидированной коры: Дз – Дзирульский, Кт – Кутаисский /

Fig. 4. Scheme of the structure of the study area consolidated crust based on the results of the gravitational field interpretation [Gravimetric ..., 1990]. 1 – boundaries of the megaanticlinorium of the Greater Caucasus according to [Geological ..., 1978]; 2 – outcrops of Proterozoic metamorphic rocks and Paleozoic granites of the Greater Caucasus Central segment and the Dzirulsky massif of the Transcaucasian Plate; 3 – deep faults of the consolidated crust: S – Svaneto-Alazansky, Z – Zestafonsky, O – Oniisky, D – Diagonalny, T – Terzholsky, K – Khashursky; 4–5 – epicentral regions of earthquakes: 4 – Racha earthquake on April 29, 1991 after [Arefiev et al., 1993], 5 – Oniy II earthquake on September 7, 2009 after [Gabsatarova, 2015]; 6 – direction of horizontal movement of seismotectonic blocks during the Racha earthquake according to [Belousov, 2009]; 7–8 – velocity vectors of horizontal displacements of GPS observation points and their code names according to [Lukk, Shevchenko, 2019]: 7 – for 1991–1997 relative to the ZELB reference geodetic station, 8 – for 2010–2013 relative to the ARDN reference geodetic station; 9 – strike of the main compression axes of earthquake focal mechanisms and their numbers according to [Lukk, Shevchenko, 2019]; 10 – epicenter of the Racha earthquake (April 29, 1991). Letters designate high-density blocks of the consolidated crust: Dz – Dzirulsky, Kt – Kutaissky.

Расположенные в северной части Дзирульского блока GPS-пункты ERTS, HVCE, KENF, MZGM имеют различные направления векторов скорости смещения (ERTS южное, HVCE юго-восточное, KENF и MZGM северо-северо-западное), а пункт HETG восточной части блока – северо-восточное, параллельное Хашурскому разлому. Скорости всех этих пунктов относительно станции GPS ARDN не превышают нескольких мм/год. GPS-пункты KNUR, LESO и SFRE северо-западного угла Дзирульского блока имеют следующие направления и величину векторов скорости смещения относительно станции ZELB: KNUR и LESO (соответственно 3,73 и 2,20 мм/год) – юго-восточное, SFRE – северо-северо-западное, а KVYS (7,05 мм/год) западное относительно станции ARDN.

В зоне Сването-Алазанского разлома векторы скоростей GPS-пунктов ROOK, DZMC, EDIS (скорости соответственно 0,93, 1,03 и 2,76 мм/год относительно станции ARDN) и станции KRES (3,53 мм/год относительно станции ZELB) имеют северо-западное направление, согласное с направлением простираания разлома, пункт ERMN (4,39 мм/год относительно станции ARDN) – субширотное восточное.

GPS-пункты KHOT и SACH (скорости соответственно 4,80 и 5,35 мм/год относительно станции ZELB) как и расположенные южнее площади исследования GPS-пункты NINO и NICH (скорости соответственно 4,3 и 6,0 мм/год) имеют северо-северо-восточное направление совпадающее с общим трендом направлений векторов скорости GPS южного склона Центрального и Восточного Кавказа [Reilinger et al., 2006].

Простирающие главных осей сжатия фокальных механизмов землетрясений изучаемой территории и их номера вынесены на схему рис. 4 согласно [Лукк, Шевченко, 2019], приведенным из бюллетеня ISC. По отношению к Дзирульскому блоку их простирающие различно для его северо-западного и юго-восточных углов, для первого характерно северо-северо-восточное простирающее, а для второго – восточное.

Для главных осей сжатия фокальных механизмов 12–16 они соответствуют Рачинскому землетрясению и его афтершокам: 12 – Рачинское землетрясение ($m_b=6,2$, 29.04.1991); 13 – афтершок ($m_b=6,2$, 29.04.1991), который произошел в день основного толчка; 14 – афтершок ($m_b=5,3$, 03.05.1991); 15 – Рачинское-II ($m_b=6,1$, 15.06.1991); 16 – афтершок ($m_b=5,0$, 04.07.1991). Для главных осей сжатия фокальных механизмов 49, 53, 58 они соответствуют: 49 – землетрясение Онийское-I ($m_b=5,2$, 06.02.2006); 53 – землетрясение Онийское-II ($m_b=6,0$, 07.09.2009); 58 – афтершок ($m_b=5,0$, 18.08.2011).

Для гипоцентров землетрясений 12–16 и их главных осей сжатия фокальных механизмов приводятся следующие значения: 12 – (Рачинское 29.04.1991), глубина гипоцентра $h=17$ км, направление простирающей главной оси сжатия $A=186^\circ$, а афтершоки 1991 г. соответствуют значениям: $h=10$ км, $A=161^\circ$ (13); $h=1$ км, $A=200^\circ$ (14); $h=9$ км, $A=79^\circ$ (15); $h=12$ км, $A=82^\circ$ (16), при их угле наклона α главной оси тензора СМТ, изменяющейся в пределах $4\text{--}10^\circ$. Для землетрясений 49 (Онийское-I, 06.02.2006) и 53 (Онийское-II, 07.09.2009) приведены значения соответственно $h=23$ км, $A=214^\circ$, $\alpha=16^\circ$ (49) и $h=15$ км, $A=212^\circ$, $\alpha=17^\circ$ (53), по характеру фокальных механизмов землетрясения Онийское-I и Онийское-II близки. Для всех землетрясений изучаемой территории характерны субгоризонтальные оси сжатия при небольших значениях угла α , соответствующих северному–северо-северо-восточному тренду, исключение составляют лишь землетрясения 15 и 16, направления осей сжатия которых (при A равном 79° и 82° соответственно) ортогональны основному направлению и развернуты в направлении простирающей Онийского разлома, в зоне которого они находятся. По [Tseng et al., 2016] тренд максимальных сжимающих напряжений изменяется в интервале от -2 до 14° с.ш.

Непосредственно после Рачинского землетрясения в полевых условиях были выполнены измерения направлений перемещения сеймотектонических блоков земной коры [Белоусов, 2009] и по результатам этих измерений сделан вывод, что обобщенное горизонтальное перемещение сеймотектонических блоков Гагро-Джавской зоны происходило в западном-юго-западном направлении, Рача-Лечхумской – в восточном-юго-восточном, а Окрибо-Сачхерской – в северо-северо-западном.

Результаты работы и их обсуждение

Обобщающая схема геодинамики Дзирульского блока консолидированной коры по анализу векторов скоростей горизонтальных смещений пунктов GPS-наблюдений и простирающих главных осей сжатия фокальных механизмов землетрясений приведена на рисунке 5. Учитывая преобладающие направления главных осей сжатия фокальных механизмов землетрясений, на схеме показано направление локального тренда тектонических напряжений Рача-Джавской сеймогенной зоны, ортогональное к направлению главных осей сжатия и субпараллельное вектору скорости GPS-пункта KVYS.

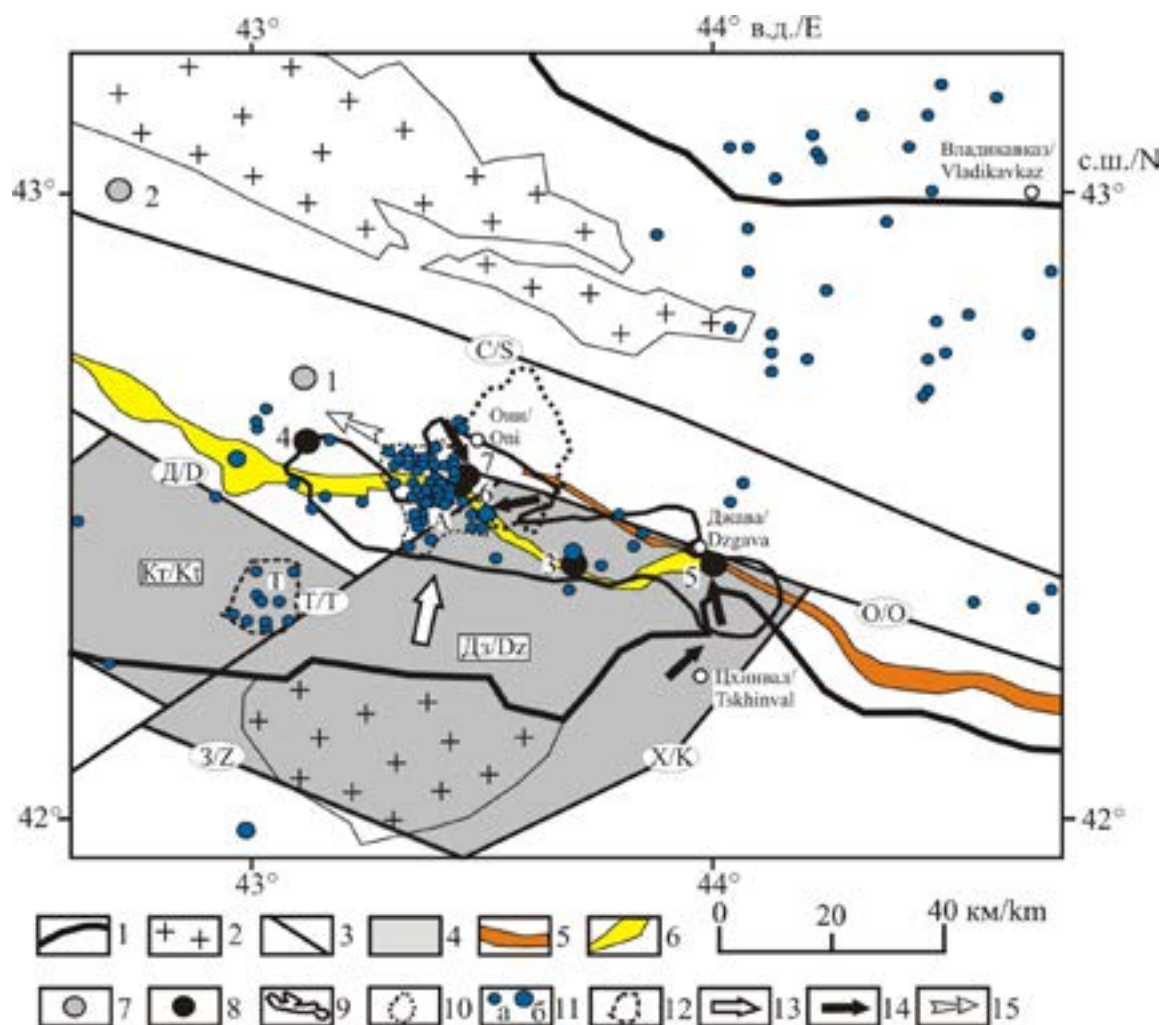


Рис. 5. Сейсмотектоническая модель Рача-Джавской зоны.

1 – границы мегаантиклинория Большого Кавказа по [Геологическая ..., 1978]; 2 – выходы протерозойских метаморфических пород и палеозойских гранитов Центрального сегмента Большого Кавказа и Дзирульского массива Закавказской плиты; 3 – глубинные разломы консолидированной коры по анализу [Гравиметрическая ..., 1990]: С – Сването-Алазанский, З – Зестафонский, О – Онийский, Т – Терзольский, Х – Хашурский; 4 – высокоплотные блоки консолидированной коры: Дз – Дзирульский, Кт – Кутаисский; 5 – Кахетино-Вандамская зона по [Геологическая ..., 1978]; 6 – Рача-Лечхумская грабен-синклиналь по [Геологическая ..., 1978]; 7–8 – сильные землетрясения: 7 – исторические (1 – Лечхуми-Сванетское, 1350 г.; 2 – Лабаскаиди-Церийское, 1750 г.), 8 – инструментальные (3 – Рачинское, 29.04.1991 по каталогу ISC, 4 – афтершок Рачинского землетрясения, 03.05.1991 по данным MOS; 5 – Джавское (Рачинское-II), 15.06.1991; 6 – Онийское-I, 06.02.2006; 7 – Онийское-II, 07.09.2009); 9–10 – эпицентральные области землетрясений: 9 – Рачинского 29.04.1991 г. по [Арефьев и др., 1993], 10 – Онийского-II 07.09.2009 г. по [Габсатарова, 2015]; 11 – эпицентры землетрясений за период 2011–2021 гг.: а – с $2,5 \leq M_S < 4,0$, б – с $M_S \geq 4,0$; 12 – сейсмоактивные узлы (А – Амбролаурский, Т – Ткибульский); 13 – региональный тренд тектонических напряжений; 14 – локальные тектонические напряжения по данным интерпретации GPS; 15 – предполагаемый основной тренд тектонических напряжений Рача-Джавской сейсмической зоны /

Fig. 5. Seismotectonic model of the Racha-Java zone. 1 – boundaries of the megaanticlinorium of the Greater Caucasus according to [Geological ..., 1978]; 2 – outcrops of Proterozoic metamorphic rocks and Paleozoic granites of the Central segment of the Greater Caucasus and the Dzirulsky massif of the Transcaucasian Plate; 3 – deep faults of the consolidated crust according to the analysis [Gravimetric ..., 1990]: S – Svaneto-Alazan, Z – Zestafon, O – Oniyskiy, T – Terzholskiy, X – Khashurskiy; 4 – high-density blocks of the consolidated crust: Dz – Dzirulsky, Kt – Kutaisky; 5 – Kakheto-Vandamskaya zone after

[Geological ..., 1978]; 6 – Racha-Lechkhumsкая graben-syncline after [Geological ..., 1978]; 7–8 – strong earthquakes: 7 – historical (1 – Lechkhumi-Svanetskoe, 1350; 2 – Labaskaidi-Tseriiskoe, 1750), 8 – instrumental (3 – Racha earthquake, 29.04.1991 according to the ISC catalog, 4 – aftershock of Racha earthquake, 03.05.1991 according to MOS data; 5 – Dzhavskoe (Racha II), 15.06.1991; 6 – Oniy I earthquake, February 6, 2006, 7 – Oniy II earthquake, September 7, 2009); 9–10 – epicentral regions of earthquakes: 9 – Racha earthquake on April 29, 1991 after [Arefiev et al., 1993]; 10 – Oniy II earthquake, September 7, 2009 after [Gabsatarova, 2015]; 11 – earthquake epicenters for the period 2011–2021 years: a – for $2.5 \leq M_s < 4.0$, b – $M_s \geq 4.0$; 12 – seismically active nodes (A – Ambrolaursky, T – Tkibulsky); 13 – regional trend of tectonic stresses; 14 – local tectonic stresses according to GPS interpretation; 15 – the assumed main trend of tectonic stresses in the Racha-Java seismic zone

Эпицентральная область Рачинского землетрясения в плане соответствует северному флангу Дзирульского блока, а вытянутые в северном направлении эпицентральные области Онийских землетрясений в своей южной части – северо-западному углу блока. Гипоцентры сильных землетрясений Рача-Джавской зоны глубиной 10–17 км локализованы в Дзирульском блоке.

В период 2011–2021 гг. активизация сейсмичности отмечается на западном продолжении Онийского разлома (Амбролаурский узел) и северо-западнее Тержольского разлома (Ткибульский узел) в пределах Кутаисского высокоплотного блока.

При сопоставлении полученной по результатам интерпретации геолого-геофизических материалов схемы тектонического строения консолидированной коры Южного склона Большого Кавказа с сейсмичностью показано, что основной сейсмогенерирующей структурой Рача-Джавской зоны является Дзирульский высокоплотный блок Закавказского микроконтинента. Южная часть Дзирульского блока представлена одноименным кристаллическим массивом Закавказского микроконтинента, а сам блок продолжается под мезозойскими отложениями мегаантиклинория Большого Кавказа более чем на 40 км при глубине его подошвы до 20 км. В пределах Северо-Западного сегмента Большого Кавказа к аналогичным локальным сейсмогенерирующим структурами отнесены Анапский и Сочинский блоки кристаллического фундамента, контролируемые одноименные сейсмические районы [Стогний Г., Стогний В., 2019].

Для южной части Центрального сегмента Большого Кавказа при общем региональном северо-северо-восточном тренде тектонических напряжений происходит перераспределение тектонических напряжений на сейсмогенных структурах с формированием локальных систем тектонических напряжений. Локальный уровень определяют блоки первого и более высоких порядков, которые во многом формируют как условия накопления энергии очага землетрясения, так и ее рассеивания.

Рача-Джавская сейсмическая зона приурочена к северному краю Дзирульского высокоплотного блока, ограниченного Онийским глубинным разломом и соответствующего южному борту мезозойского трога (прогиба) мегаантиклинория. Эта тектоническая особенность, по-видимому, являлась определяющей при формировании очага Рачинского землетрясения 29.04.1991 г.

Изменения направлений и величин векторов скорости GPS-пунктов Дзирульского блока имеют сложный характер, в пределах его северной части наблюдается тенденция локальных тектонических напряжений к вращательному движению против часовой стрелки (рис. 5). Такая кинематика тектонических напряжений при основном северо-северо-западном тренде способствовала формированию афтершокового процесса Рача-Джавской зоны, в том числе афтершока 03.05.1991 г. с магнитудой $M_s=5,3$ в западной части зоны.

Землетрясения Онийское-I и Онийское-II имели несколько иную природу, напряжения и их очагах накапливалось достаточно длительный период времени (15–20 лет), а вытянутость их эпицентральных областей в северном направлении обусловлена региональным трендом тектонических напряжений.

Анализ современной сейсмичности изучаемого района за период 2011–2021 гг. позволяет отметить следующее. В пределах северо-западной части района не было землетрясений с $M_s \geq 2,5$, в северо-восточной части сейсмичность носила рассеянный характер. Высокая сейсмическая активность была характерна для его южной части.

Локальной сейсмогенерирующей структурой является, по-видимому, Рача-Лечхумская грабен-синклиналь, в пределах которой за рассматриваемый период наблюдается повышенная концентрация эпицентров, при этом землетрясений с $M_s \geq 4,0$ произошло три из четырех, зарегистрированных на данной площади, четвертое из них произошло к югу от Зестафонского разлома, являющегося юго-западным ограничением Дзирульского блока.

По результатам анализа характера распределения эпицентров землетрясений с $M_s \geq 2,5$ за период 2011–2021 гг. выделено два сейсмоактивных узла: Амбролаурский и Ткибульский. Формирование в течение последнего десятилетия Амбролаурского узла связывается с основным трендом тектонических напряжений Рача-Джавской сейсмической зоны (рис. 5). Учитывая высокую интенсивность проявления сейсмичности в пределах этого узла, можно предположить, что здесь в ближайшие годы может произойти землетрясение с магнитудой, соизмеримой с магнитудой землетрясений Онийское-I и Онийское-II (на уровне 5–6). Ткибульский сейсмоактивный узел расположен в восточной части Кутаисского высокоплотного блока. Кутаисский блок по площади значительно меньше Дзирульского, ожидаемая максимальная магнитуда землетрясения в его пределах не может значительно превышать 5,0.

Выводы

1. Сейсмогенерирующей структурой Рачинского землетрясения 29.04.1991 г. был Дзирульский высокоплотный блок Закавказской плиты размером 40'60 км при глубине его подошвы до 20 км. Южная часть блока представлена выходами протерозойских метаморфических пород и палеозойских гранитов Дзирульского массива, а северная продолжается под мезозойскими отложениями мегаантиклинория Большого Кавказа.

2. Изменения направлений и величин векторов скорости GPS-пунктов Дзирульского блока имеют сложный характер, в пределах его северной части наблюдается тенденция локальных тектонических напряжений к вращательному движению против часовой стрелки. Такая кинематика тектонических напряжений при основном региональном северо-северо-западном тренде способствовала формированию афтершокового процесса Рачинского (29.04.1991) землетрясения.

3. Для землетрясений Онийское-I (06.02.2006) и Онийское-II (07.09.2009) сейсмогенерирующей структурой был Онийский глубинный разлом, ограничивающий Дзирульский высокоплотный блок с севера. Формирование афтершокового процесса данных землетрясений связано с региональным субмеридиональным трендом тектонических напряжений.

4. Основными сейсмогенными структурами южной части Центрального сегмента Большого Кавказа являются Дзирульский и Кутаисский высокоплотные бло-

ки консолидированной земной коры, взаимодействие этих реологических неоднородностей с общим трендом тектонических напряжений северо-северо-восточного направления, обусловленных движением в этом направлении Закавказской плиты, приводит к формированию полей тектонических напряжений локального уровня и очаговых зон землетрясений.

5. Сейсмогенными структурами более высоких порядков являются глубинные разломы, особенно разграничивающие реологически разнородные структуры, в их числе Онийский разлом, являющийся северо-западным ограничением Дзирульского блока, и Рача-Лечхумская грабен-синклиналь, в зоне которой отмечается повышенная сейсмичность.

6. В качестве наиболее сейсмоактивных в последнем десятилетии выделены Амбролаурский и Ткибульский сейсмоактивные узлы, проявляющиеся как участки концентрации эпицентров землетрясений и расположенные соответственно западнее северо-западного угла Дзирульского блока и в восточной части Кутаисского блока. В пределах первого из них в ближайшие годы может произойти сильное землетрясение, по своей магнитуде соизмеримое с магнитудой землетрясений Онийское-I и Онийское-II.

Литература

1. Адамия Ш.А., Габуния Г.Л., Кутелия З.А. Характерные черты тектоники Кавказа. // Геодинамика Кавказа. – М.: Наука, 1989. – С. 3–15.
2. Арефьев С.С., Плетнев К.Г., Татевосян Р.Э. и др. Рачинское землетрясение 1991 г.: результаты полевых сейсмологических наблюдений. // Физика Земли. – 1993. – №3. – С. 12–23.
3. Арефьев С.С., Рогожин Е.А., Быкова В.В., Дорбат К. Глубинная структура очаговой зоны Рачинского землетрясения по сейсмотомографическим данным. // Физика Земли. – 2006. – №1. – С. 30–44.
4. Белоусов Т.П. Рачинское землетрясение 1991 года и его проявление в рельефе Большого Кавказа. – М.: Светоч Плюс, 2009. – 208 с.
5. Габсатарова И.П. Онийское-II землетрясение 7 сентября 2009 г. с $K_p=14,2$, $MS=5,8$ (Грузия). // Землетрясения Северной Евразии, 2009 год. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – С. 325–333.
6. Габсатарова И.П., Головкова Л.В., Селиванова Е.А. Онийское землетрясение 6 февраля 2006 г. с $MS=5,0$, $I_{0p}=6$ (Грузия). // Землетрясения Северной Евразии, 2006 год. Обнинск: ГС РАН, 2012. – С. 308–313.
7. Гамкрелидзе П.Д., Гамкрелидзе И.П. Тектонические покровы южного склона Большого Кавказа. – Тбилиси: Мецниереба, 1977. – 82 с.
8. Геологическая карта России и сопредельных государств (в границах бывшего СССР). М-б 1:5 000 000. Под ред. Р.И. Соколова – СПб: ВСЕГЕИ, 1992. – 2 листа.
9. Геологическая карта Кавказа. Масштаб 1:500 000 / Гл. редактор Д.В. Наливкин. – М.: НПО «Аэрогеология», 1978.
10. Гиоргобиани Т.В. Пододвигается ли Черноморско-Закавказский микроконтинент под Большой Кавказ? // Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики. – М.: ГЕОС, 2008. – С. 188–194.
11. Горбатилов А.В., Рогожин Е.А., Степанова М.Ю., Харазова Ю.В., Андреева Н.В., Передерин Ф.В., Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Дзеранов Б.В., Дзедобоев Б.А., Габараев А.Ф. Особенности глубинного строения и современной тектоники Большого Кавказа в Осетинском секторе по комплексу геофизических данных // Физика Земли. – 2015. – №1. – С. 28–39.

12. Гравиметрическая карта СССР. Масштаб 1 : 2 500 000 / Гл. редакторы: П.П. Степанов, М.А. Якушевич. – М.: ВНИИ «Геофизика». – 1990.
13. Заалишвили В.Б., Бондырев И.В. Геоморфология и палеогеография Рачи. // Опасные природные и техногенные процессы на горных и предгорных территориях Северного Кавказа. – Владикавказ: ЦГИ ВНИЦ РАН, 2010. – С. 105–138.
14. Лукк А.А., Шевченко В.И. Сейсмичность, тектоника и GPS-геодинамика Кавказа. // Физика Земли. – 2019. – №4. – С. 99–123.
15. Овсяченко А.Н., Мараханов А.В., Ларьков А.С., Новиков С.С. Позднечетвертичные дислокации и сейсмостектоника очага Рачинского землетрясения (Большой Кавказ). // Геотектоника. – 2014. – №6. – С. 55–76.
16. Павленкова Г.А. Строение земной коры Кавказа по профилям ГСЗ Степное-Бакуриани и Волгоград-Нахичевань (результаты переинтерпретации первичных данных). // Физика Земли. – 2012. – №5. – С. 16–23.
17. Папалашвили В.Б., Варазанашвили О.Ш., Гогмачадзе С.А., Заалишвили В.Б., Кипиани Д.Г., Махатадзе Л.Н., Мушадзе Т.Г., Чачава Т.Н., Аивазишвили И.В. Рача-Джавское землетрясение 29 апреля 1991 г. // Землетрясения в СССР в 1991 году. Сборник научных трудов. – М.: ОИФЗ РАН, 1997. – С. 18–25.
18. Рогожин Е.А. Тектоническая позиция, сейсмологические и геологические проявления очага Онийского-II землетрясения 7 сентября 2009 г. на южном склоне Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – №4. – С. 109–115. DOI: 10.23671/VNC.2017.4.9530.
19. Рогожин Е.А., Борисов Б.А., Богачкин Б.М. Рачинское землетрясение (Грузия, 29 апреля 1991г.): материалы геологического обследования. // Докл. АН СССР. – 1991. – Т. 321. №2. – С. 352–358.
20. Рогожин Е.А., Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Овсяченко А.Н., Андреева Н.В., Харазова Ю.В. Структура и современная геодинамика мегаантиклинория Большого Кавказа в свете новых данных о глубинном строении. // Геотектоника. – 2015. – №2. – С. 36–49.
21. Стогний В.В., Заалишвили В.Б., Пономарева Н.Л. Современная геодинамика и сейсмичность Северного Кавказа: проблемы мониторинга. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. Т. 12. №2. – С. 34–52. DOI: 10.46698/VNC.2022.25.32.003
22. Стогний В.В., Стогний Г.А. Локальные сейсмогенерирующие структуры южного склона западного Кавказа. // Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии. / Под ред. В.Б. Заалишвили. – Владикавказ: ГФИ ВНИЦ РАН, 2022. – С. 110–113. DOI: 10.33580/7985904868277_110
23. Стогний Г.А., Стогний В.В. Сейсмичность Большого Кавказа с позиции блоковой делимости земной коры. // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества (ЧЭС). – 2017. – №2. – С. 86–95.
24. Стогний Г.А., Стогний В.В. Сейсмостектоническая модель Северо-Западного Кавказа: геолого-геофизический аспект. // Физика Земли. – 2019. – №4. – С. 124–132. DOI: /10.31857/S0002-333720194124-132
25. Тектоника южного обрамления Восточно-Европейской платформы (Объяснительная записка к тектонической карте Черноморско-Каспийского региона. Масштаб 1 : 2 500 000). / Под ред. В.Е. Хаина, В.И. Попкова. – Краснодар: Кубан. гос. ун-т, 2009. – 213 с.
26. Шевченко В.И., Гусева Т.В., Лукк А.А., Мишин А.В., Прилепин М.Т., Рейлинджер Р.Э., Хамбургер М.У., Шемпелев А.Г., Юнга С.Л. Современная геодинамика Кавказа (по результатам GPS измерений и сейсмическим данным). // Физика Земли. – 1999. – №9. – С. 3–18.
27. Шевченко В.И., Гусева Т.В., Лукк А.А., Прилепин М.Т., Стеблов Г.М., Милуков В.К., Миронов А.П., Кусраев А.Г., Дробышев В.Н., Хубаев Х.М. Неплейттекtonическая GPS-геодинамика Большого Кавказа. // Тектоника, геодинамика и рудогенез складчатых поясов и платформ. Материалы XLVIII Тектонического совещания. Т.2. – М.: ГЕОС. – 2016. – С. 295–299.

28. Шевченко В.И., Лукк А.А., Гусева Т.В. Автономная и плейттектоническая геодинамика некоторых подвижных поясов и сооружений. – М.: ГЕОС. – 2017. – 612 с.
29. Fuenzalida H., Rivera L., Haessler H., Legrand D., Philip H., Dorbath L., McCormack D., Arefiev S., Langer C., Cisternas A. Seismic source study of the Racha-Dzhava (Georgia) earthquake from aftershocks and broad-band teleseismic body-wave records: an example of active nappe tectonics. // *Geophys. J. Int.* – 1997. – Vol. 130(1). – pp. 29–46.
30. Gamkrelidze I., Giorgobiani T., Kuloshvili S., Lobjanidze G., Shengelaia G. Active deep faults map and the catalogue for the territory of Georgia. // *Bull. Georgian Acad. Sci.* – 1998. – Vol. 157(1). – pp. 80–85.
31. Reilinger R., McClusky S., Vernant P. et al. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth.* – 2006. – Vol. 111. No.5. Is. B05411. DOI: 10.1029/2005JB004051
32. Sriyayanthi G., Kumar M.R., Gahalaut V.K. A review of seismological research in India during the past five years (2015-2019). // *Proc. Indian Natn. Sci. Acad.* – 2020. – Vol. 86. No.1. – pp. 531–552. DOI: 10.16943/ptinsa/2020/49794
33. Tibaldi A., Tsereteli N., Varazanashvili O., Babayev G., Barth A., Mumladze T., Bonali F.L., Russo E., Kadirov F., Yetirmishli G., Kazimova S. Active stress field and fault kinematics of the Greater Caucasus. // *J. of Asian Earth Sciences.* – 2020. – Vol. 188. – pp. 1–18.
34. Triep E.G., Abers G.A., Lerner-Lam A.L., Mishatkin V., Zakharchenko N., Starovoit O. Active thrust front of the Greater Caucasus: the April 29, 1991, Racha earthquake sequence and its tectonic implications. // *J. Geophys. Res.* – 1995. – Vol. 100(B3). – pp. 4011–4033.
35. Tseng T.-L., Hsu H.-C., Jian P.-R., Huang B.-S., Hu J.-C., Chung S.-L. Focal mechanisms and stress variations in the Caucasus and Northeast Turkey from constraints of regional waveforms. // *Tectonophysics.* – 2016. – Vol. 691. – pp. 362–374.
36. Varazanashvili O., Tsereteli N., Tsereteli E. Historical earthquakes in Georgia (up to 1900): source analysis and catalogue compilation. Monograph. – Tbilisi: Pub. House MVP. – 2011. – 81 p.
37. Yadav R.K., Roy P.N.S., Gupta S.K., Khan P.K. et al. Rupture model of Mw 7.8 2015 Gorkha, Nepal earthquake: Constraints from GPS measurements of coseismic offsets. // *Journal of Asian Earth Sciences.* – 2017. – Vol. 133. – pp. 56–61. DOI: 10.1016/j.jseaes.2016.04.015.
38. 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(2). – pp. 263–272.
39. Zare M., Amini H., Yazdi P., Sasetian K., Demircioglu M.B., Kalafat D., Erdik M., Giardini D., Khan M.A., Tsereteli N. Recent developments of the Middle East catalog. // *J. Seismolog.* – 2014. – Vol. 18(4). – pp. 749–772.

References

1. Adamia Sh.A., Gabunia G.L., Kutelia Z.A. Characteristic features of the tectonics of the Caucasus. *Geodynamics of the Caucasus.* Moscow, Nauka. 1989. pp. 3–15. (In Russ.)
2. Arefiev S.S., Pletnev K.G., Tatevosyan R.E. et al. Racha earthquake of 1991: results of field seismological observations. *Physics of the Solid Earth.* 1993. No. 3. pp. 12–23. (In Russ.)
3. Arefiev S.S., Rogozhin E.A., Bykova V.V., Dorbath C. Deep structure of the Racha earthquake source zone from seismic tomography data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth.* 2006. T. 42. № 1. C. 27–40.
4. Belousov T.P. Racha earthquake of 1991 and its manifestation in the relief of the Greater Caucasus. Moscow, Svetoch Plus, 2009. 208 p. (In Russ.)
5. Gabsatarova I.P. Oni II earthquake on September 7, 2009 with $K_p=14.2$, $M_S=5.8$ (Georgia). *Earthquakes of Northern Eurasia, 2009.* Obninsk, GS RAS. 2015. pp. 325–333. (In Russ.)
6. Gabsatarova I.P., Golovkova L.V., Selivanova E.A. Oni earthquake on February 6, 2006 with $M_S=5.0$, I_{0p} (Georgia). *Earthquakes of Northern Eurasia, 2006.* Obninsk, GS RAS. 2012. pp. 308–313. (In Russ.)

7. Gamkrelidze P.D., Gamkrelidze I.P. Tectonic covers of the southern slope of the Greater Caucasus. Tbilisi, Metsniereba. 1977. 82 p. (In Russ.)
8. Geological map of Russia and neighboring states (within the borders of the former USSR). Scale 1:5 000 000. Ed. R.I. Sokolova. Saint Petersburg, VSEGEI, 1992. 2 sheets. (In Russ.)
9. Geological map of the Caucasus. Scale 1:500,000. Ch. editor D.V. Nalivkin. Moscow, NPO "Aerogeology". 1978. (In Russ.)
10. Giorgobiani T.V. Is the Black Sea–Transcaucasian microcontinent moving under the Greater Caucasus? General and regional problems of tectonics and geodynamics. Moscow, GEOS. 2008. pp. 188–194. (In Russ.)
11. Gorbatikov A.V., Rogozhin E.A., Stepanova M.Y., Kharazova Y.V., Andreeva N.V., Perederin F.V., Dzeboev B.A., Zaalishvili V.B., Mel'kov D.A., Dzeranov B.V., Gabaraev A.F. The pattern of deep structure and recent tectonics of the Greater Caucasus in the Ossetian sector from the complex geophysical data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2015. Vol. 51. No. 1. pp. 26–37. DOI: 10.1134/S1069351315010073
12. Gravimetric map of the USSR. Scale 1:2,500,000. Ch. editors: P.P. Stepanov, M.A. Yakushevich. Moscow, Geophysics. 1990. (In Russ.)
13. Zaalishvili V.B., Bondyrev I.V. Geomorphology and paleogeography of Racha. In: Proc. Dang. Nat. and techn. Proc. in the mount. and foothill areas of the North Caucasus. Vladikavkaz, 2010. pp. 105–138. (In Russ.)
14. Lukk A.A., Shevchenko V.I. Seismicity, tectonics, and GPS geodynamics of the Caucasus. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2019. Vol. 55. № 4. pp. 626–648. DOI: 10.1134/S1069351319040062.
15. 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. Vol. 48. No. 6. pp. 440–458. DOI: 10.1134/S0016852114050057
16. Pavlenkova G.A. Crustal structure of the Caucasus from the Stepnoe-Bakuriani and Volgograd-Nakhichevan DSS profiles (reinterpretation of the primary data). *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2012. T. 48. № 5. C. 375–384. DOI: 10.1134/S1069351312040040
17. Papalashvili V.B., Varazanashvili O.Sh., Gogmachadze S.A., Zaalishvili V.B., Kipiani D.G., Mahatadze L.N., Mushadze T.G., Chachava T.N., Aivazishvili I.V. Racha-Java earthquake April 29, 1991. Earthquakes in the USSR in 1991. Proceedings of scientific papers. Moscow: UIPE RAS, 1997. pp. 18–25. (In Russ.)
18. Rogozhin E.A. Tectonic position, seismological and geological manifestations of the focus of the September 7, 2009 Oni II earthquake on the southern slope of the Greater Caucasus: *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2017. No. 4. P. 109–115.
19. Rogozhin E.A., Borisov B.A., Bogachkin B.M. Racha earthquake (Georgia, April 29, 1991): materials of geological survey. *Doklady. Academy of Sciences of the USSR*. 1991. Vol. 321. No. 2. pp. 352–358. (In Russ.)
20. Rogozhin E.A., Gorbatikov A.V., Stepanova M.Y., Ovsyuchenko A.N., Andreeva N.V., Kharazova Y.V. The structural framework and recent geodynamics of the greater Caucasus meganticlinorium in the light of new data on its deep structure. *Geotectonics*. 2015. Vol. 49. No. 2. pp. 123–134. DOI: 10.1134/S0016852115020053.
21. Stogny V.V., Zaalishvili V.B., Ponomareva N.L. Modern geodynamics and seismicity of the North Caucasus: problems of monitoring. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2022. V.12(2). pp. 34–52.
22. Stogny V.V., Stogny G.A. Local seismogenic structures of the southern slope of the Western Caucasus. In: Proc. Dang. Nat. and techn. Proc. in the mount. regions: models, systems, technologies. Vladikavkaz, 2022. pp. 110–113. (In Russ.)
23. Stogny G.A., Stogny V.V. Seismicity of the Greater Caucasus from the standpoint of the block divisibility of the earth's crust. *Ecological Bulletin of Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation (BSEC)*. 2017. No. 2. pp. 86–95. (In Russ.)
24. Stogny G.A., Stogny V.V. Seismotectonic model of the Northwest Caucasus: geological-

geophysical aspect. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2019. Vol. 55. No. 4. pp. 649–656. DOI: 10.1134/S1069351319040116. DOI: 10.1134/S1069351319040116.

25. Tectonics of the southern framing of the East European Platform (Explanatory note to the tectonic map of the Black Sea-Caspian region. Scale 1:2,500,000). Ed.: V.E. Khaina, V.I. Popkov. Krasnodar, KSU, 2009. 213 p. (In Russ.)

26. Shevchenko V.I., Guseva T.V., Lukk A.A., Mishin A.V., Prilepin M.T., Reilinger R.E., Hamburger M.U., Shempelev A.G., Yunga S.L. Modern geodynamics of the Caucasus (according to the results of GPS measurements and seismic data). *Physics of the Solid Earth*. 1999. No. 9. pp. 3–18. (In Russ.)

27. Shevchenko V.I., Guseva T.V., Lukk A.A., Prilepin M.T., Steblov G.M., Milyukov V.K., Mironov A.P., Kusraev A.G., Drobyshev V.N., Khubaev Kh.M. Non-platetectonic GPS geodynamics of the Greater Caucasus. In: Proc. of XLVIII of the Tectonic Conference Tectonics, geodynamics and ore genesis of folded belts and platforms. Vol.2. Moscow, GEOS. 2016. pp. 295–299. (In Russ.)

28. Shevchenko V.I., Lukk A.A., Guseva T.V. Autonomous and platetectonic geodynamics of some mobile belts and structures. Moscow. GEOS. 2017. 612 p. (In Russ.)

29. Fuenzalida H., Rivera L., Haessler H., Legrand D., Philip H., Dorbath, L., McCormack D., Arefiev S., Langer C., Cisternas A. Seismic source study of the Racha-Dzhava (Georgia) earthquake from aftershocks and broad-band teleseismic body-wave records: an example of active nappe tectonics. *Geophys. J. Int.* 1997. Vol. 130. Issue 1. pp. 29–46.

30. Gamkrelidze I., Giorgobiani T., Kuloshvili S., Lobjanidze G., Shengelaia G. Active deep faults map and the catalogue for the territory of Georgia. *Bull. Georgian Acad. Sci.* 1998. Vol. 157. Issue 1. pp. 80–85.

31. Reilinger R., McClusky S., Vernant P. et al. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2006. Vol. 111. No.5. Issue B05411. DOI: 10.1029/2005JB004051.

32. Sriyayanthi G., Kumar M.R., Gahalaut V.K. A review of seismological research in India during the past five years (2015-2019). *Proc. Indian Natn. Sci. Acad.* 2020. Vol. 86. No. 1. pp. 531–552. DOI: 10.16943/ptinsa/2020/49794.

33. Tibaldi A., Tsereteli N., Varazanashvili O., Babayev G., Barth A., Mumladze T., Bonali F.L., Russo E., Kadirov F., Yetirmishli G., Kazimova S. Active stress field and fault kinematics of the Greater Caucasus. *J. of Asian Earth Sciences*. 2020. Vol. 188. pp. 1–18.

34. Triep E.G., Abers G.A., Lerner-Lam A.L., Mishatkin V., Zakharchenko N., Starovoit O. Active thrust front of the Greater Caucasus: the April 29, 1991, Racha earthquake sequence and its tectonic implications. *J. Geophys. Res.* 1995. Vol. 100 (B3). pp. 4011–4033.

35. Tseng T.-L., Hsu H.-C., Jian P.-R., Huang B.-S., Hu J.-C., Chung S.-L. Focal mechanisms and stress variations in the Caucasus and Northeast Turkey from constraints of regional waveforms. *Tectonophysics*. 2016. Vol. 691. pp. 362–374.

36. Varazanashvili O., Tsereteli N., Tsereteli E. Historical earthquakes in Georgia (up to 1900): source analysis and catalogue compilation. Monograph. Tbilisi, Pub. House MVP. 2011. 81 p.

37. Yadav R.K., Roy P.N.S., Gupta S.K., Khan P.K. et al. Rupture model of Mw 7.8 2015 Gorkha, Nepal earthquake: Constraints from GPS measurements of coseismic offsets. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2017. Vol. 133. pp. 56–61. DOI: 10.1016/j.jseaes.2016.04.015.

38. 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(2). pp. 263–272.

39. Zare M., Amini H., Yazdi P., Sesetian K., Demircioglu M.B., Kalafat D., Erdik M., Giardini D., Khan M.A., Tsereteli N. Recent developments of the Middle East catalog. *J. Seismolog.* 2014. Vol. 18 (4). pp. 749–772.