

УДК 551.24:550.343.4(479)

DOI: 10.46698/VNC.2024.52.34.006

Оригинальная статья

Структура консолидированной земной коры и сейсмичность Центрального сегмента Большого Кавказа

В.В. Стогний¹, Г.А. Стогний¹, Н.Л. Пономарева², С.С. Гросс¹¹ Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, Россия,
362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: stogny_vv@mail.ru;² Единая геофизическая служба РАН, Сейсмическая станция «Махачкала», Россия,
367010, г. Махачкала, ул. Ахундова, 136

Статья поступила: 21.10.2024, доработана: 22.11.2024, принята к публикации: 25.11.2024

Резюме: Актуальность работы. Большой Кавказ является сейсмоактивным регионом, при этом гипоцентры сильных землетрясений, как правило, локализируются в пределах консолидированной земной коры, что определяет актуальность исследований связи особенностей ее строения с закономерностями сейсмического процесса. **Цель работы** – изучение связи структур консолидированной коры Центрального сегмента Большого Кавказа, выявленных по материалам анализа и синтеза геолого-геофизических материалов, с характером его сейсмичности. **Методы исследования.** Проведен анализ локализации эпицентров землетрясений Центрального сегмента Большого Кавказа по отношению к разломам и блокам консолидированной коры. По результатам обработки данных каталогов ФИЦ ЕГС РАН за период 2001–2021 гг. Центрального сегмента мегантиклинория Большого Кавказа и близлежащих территорий на основе применения системы ArcGIS построены схемы распределения плотности эпицентров землетрясений с $M_s \geq 2.5$ и выполнен их анализ. Изучены также особенности плотности распределения гипоцентров землетрясений в полосе профиля, пересекающего Центральный сегмент в его восточной части. **Результаты работы.** В результате проведенного анализа установлено, что наиболее активными сейсмогенерирующими структурами Центрального сегмента Большого Кавказа являются высокоплотные блоки консолидированной коры и ограничивающие их межблоковые разломы. При анализе изменений плотности распределения гипоцентров землетрясений в полосе профиля восточной части Центрального сегмента по 5-летним периодам отмечено значительное расхождение в характере этих изменений южной части профиля, представляющей северный фланг Закавказской плиты, и его северной части, представляющей южный фланг Скифской плиты. Зона Сването-Алазанского межплитного разлома на этом участке практически асейсмична.

Ключевые слова: Большой Кавказ, сейсмичность, землетрясение, консолидированная кора, тектонический блок, сейсмогенерирующие структуры, сейсмогенный разлом.

Благодарности: Работа выполнена по госзаданию Геофизического института ВНЦ РАН, код: FMSM-2022-0013.

Для цитирования: Стогний В.В., Стогний Г.А., Пономарева Н.Л., Гросс С.С. Структура консолидированной земной коры и сейсмичность Центрального сегмента Большого Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(4): 54-65. DOI: 10.46698/VNC.2024.52.34.006

DOI: 10.46698/VNC.2024.52.34.006

Original paper

Structure of Earth's consolidated crust and seismicity of the Greater Caucasus Central segment

V.V. Stogny¹, G.A. Stogny¹, N.L. Ponomareva², S.S. Gross¹

¹ Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences,
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation,
e-mail: stogny_vv@mail.ru;

² Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Seismic station "Makhachkala",
136 Akhundova Str., Makhachkala 367010, Russian Federation

Received: 21.10.2024, revised: 22.11.2024, accepted: 25.11.2024

Abstract: Relevance. The Greater Caucasus is a seismically active region, and the hypocenters of strong earthquakes are usually localized within the consolidated Earth's crust, which determines the relevance of the relationship studies between the features of its structure and the patterns of the seismic process. **Aim.** The aim of the work is to study the relationship between the structures of the consolidated crust of the Greater Caucasus Central segment, identified based on the analysis and synthesis of geological and geophysical materials, and the nature of its seismicity. **Methods.** The analysis of the earthquake epicenters localization in the Greater Caucasus Central segment in relation to faults and blocks of the consolidated crust was carried out. Based on the processing of data from the catalogs of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences for the period 2001–2021 of the Greater Caucasus meganticlinorium Central segment and adjacent territories, using the ArcGIS system, the distribution schemes of the density of earthquake epicenters with $M_s \geq 2.5$ were constructed and analyzed. The features of the distribution density of earthquake hypocenters in the profile strip which is crossing the Central segment in its eastern part were also studied. **Results.** As a result of the analysis, it was established that the most active seismogenic structures of the Greater Caucasus are high-density blocks of consolidated crust and interblock faults that limit them. When analyzing the changes in the density of distribution of earthquake hypocenters in the profile strip of the eastern part of the Central segment over 5-year periods, a significant discrepancy was noted in the nature of these changes in the southern part of the profile, representing the northern flank of the Transcaucasian plate, and its northern part, representing the southern flank of the Scythian plate. The Svaneti-Alazani interplate fault zone in this area is practically aseismic.

Keywords: Greater Caucasus, seismicity, earthquake, consolidated crust, tectonic block, seismogenic structures, seismogenic fault.

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., Gross S.S. Structure of Earth's consolidated crust and seismicity of the Greater Caucasus Central segment. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(4): 54-65. DOI: 10.46698/VNC.2024.52.34.006

Введение

Большой Кавказ обладает высокой эндогенной активностью, изучению которой посвящены многочисленные работы [Ананьин, 1977; Заалишвили, Чотчаев, 2022; Лукк, Шевченко, 2019; Рогожин и др., 2014; McClusky et al., 2000; Sosson et al., 2017; Tibaldi et al., 2018; Triep et al., 1995]. В качестве сейсмогенерирующих структур при этом обычно рассматриваются тектонические нарушения [Кафтан и др., 2023;

Маммадли, 2022; Gamkrelidze et al., 1998; Tibaldi et al., 2020; Tseng et al., 2016]. Отмечено, что около 95% гипоцентров землетрясений Большого Кавказа приходится на глубины до 20 км [Tibaldi et al., 2020], а сильные землетрясения обычно происходят в интервале глубин 10–15 км [Габсатарова, 2015] и локализованы в пределах консолидированной земной коры.

Цель проведенных исследований заключалась в выявлении особенностей локализации эпицентров сильных землетрясений Центрального сегмента Большого Кавказа в блоково-разломной структуре консолидированной земной коры региона с оценкой пространственно-временных закономерностей сейсмического процесса.

Методология и методы исследований

Типизация сейсмогенерирующих структур зависит как от региона исследований, так и принятой парадигмы [Несмеянов, Воейкова, 2016]. В данной работе, исходя из принятой концепции, в качестве сейсмогенерирующих приняты блоки консолидированной коры различных иерархических уровней и ограничивающие их активные (сейсмогенные) разломы. Тектонические нарушения рассматривались в следующей иерархии: межгеоблоковые, межблоковые, внутриблоковые.

Для изучения закономерностей сейсмичности Центрального сегмента Большого Кавказа и близлежащих территорий на основе системы ArcGIS была выполнена обработка данных по каталогам ФИЦ ЕГС РАН за период 2001–2021 гг. в пределах площади 41° – 45° с.ш., 41° – 47° в.д. с осреднением по площадкам $0.2^{\circ} \times 0.3^{\circ}$. Результатом этой обработки явились схемы плотности распределения эпицентров землетрясений с $M_s \geq 2.5$ и $M_s \geq 3.5$, по которым изучались особенности их локализации относительно тектонических элементов консолидированной коры и выделялись сейсмоактивные разломы.

С целью исследования закономерностей распределения гипоцентров землетрясений в полосе профиля С-СВ направления (41° с.ш., 43° в.д. – 45° с.ш., 45° в.д. $\pm 0.5^{\circ}$), расположенного в восточной наиболее сейсмоактивной части Центрального сегмента, построен разрез плотности распределения гипоцентров землетрясений с $M_s \geq 2.5$ для периода 2001–2021 гг., на который вынесены гипоцентры землетрясений с $M_s \geq 3.5$ и $M_s \geq 4.5$. Для пятилетних интервалов периода 2001–2020 гг. построены также разрезы плотности распределения гипоцентров землетрясений с $M_s \geq 2.5$ с целью оценки пространственно-временной ее изменчивости. При вычислении плотности распределения гипоцентров землетрясений осуществлялось осреднение на площадках 0.2° по широте, 10 км по глубине. В полосе исследуемого профиля расположен профиль ГСЗ Степное-Бакуриани [Павленкова, 2012], по которому на разрезы вынесены контуры (верхняя и нижняя граница) консолидированной коры.

Обоснование сейсмогенерирующих структур и сейсмогенных разломов региона исследований выполнялось на основе анализа и синтеза материалов по структуре кристаллической коры, полученной по результатам интерпретации геофизических полей, с учетом особенностей их проявления в сейсмичности.

Сейсмичность Центрального сегмента Большого Кавказа и характер ее изменчивости

Сейсмическая активность Центрального сегмента Большого Кавказа и близлежащих территорий в первые десятилетия XXI века анализируется на основе схем плотности распределения эпицентров землетрясений с $M_s \geq 2.5$ и $M_s \geq 3.5$, совмещен-

ных со схемой блокового строения консолидированной коры (рис. 1). По этим данным можно отметить следующие особенности.

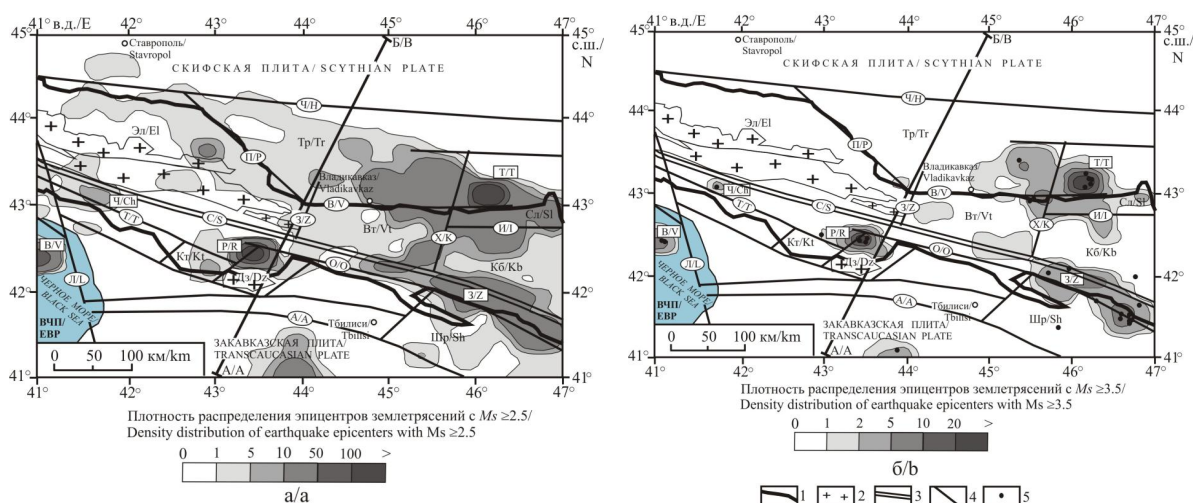


Рис. 1. Схемы сейсмической активности Центрального сегмента за период 2001–2021 гг. для землетрясений с $M_s \geq 2.5$ (а) и с $M_s \geq 3.5$ (б) на схеме блоковой делимости консолидированной коры в соответствии с [Стогний, Стогний, 2023].

1 – границы мегантиклинория Большого Кавказа; 2 – выходы протерозойских метаморфических пород и палеозойских гранитов Центрального сегмента и Дзирульского массива по (Геологическая карта Кавказа. Масштаб 1:500 000. Гл. редактор Д.В. Наливкин. М.: Аэрогеология. 1978);

3 – Сването-Алазанский (С) фрагмент Большекавказского межплитного разлома; 4 – разломы: А – Аджаро-Мингечаурский, Л – Лаба-Батумский,

П – Пятигорский, В – Владикавказский, З – Згитский, И – Известняковый, О – Они-Шекийский, Т – Тиварчелийский, Х – Халкилойский, Ч – Черкесско-Кизлярский; 5 – эпицентры землетрясений с $M_s \geq 4.5$. Блоки консолидированной коры: Дз – Дзирульский, Вт – Верхнетерский, Сл – Сулакский, Кб – Кубачинский, Кт – Кутаисский, Тр – Терский, Шр – Ширакский, Эл – Эльбрусский.

ВЧП – Восточно-Черноморская микроплита. Сейсмически активные зоны: Р – Рача-Джавская, Ч – Чхалта-Тебердинская, В – Восточно-Черноморская, З – Загатальско-Шекинская, Т – Терско-Сулакская. АБ – линия профиля/

Fig. 1. Seismic activity patterns of the Central segment for the period 2001–2021 for earthquakes with $M_s \geq 2.5$ (a); and with $M_s \geq 3.5$ (b) on the block divisibility scheme of the consolidated crust in accordance with [Stogny, Stogny, 2023].

1 – boundaries of the Greater Caucasus meganticlinorium; 2 – outcrops of Proterozoic metamorphic rocks and Paleozoic granites of the Central segment and the Dzirulsky massif according to (Geological map of the Caucasus. Scale 1:500 000. Ch. ed. D.V. Nalivkin. Moscow. Aerogeology. 1978); 3 – Svaneti-Alazani (S) fragment of the Greater Caucasus interplate fault; 4 – faults:

А – Adjara–Mingachevirsky, L – Laba–Batumi, P – Pyatigorsky, V – Vladikavkazsky, Z – Zgitsky, I – Izvestnyakovy, O – Oni–Shekiysky, T – Tivarcheliysky, Kh – Khalkilovsky, Ch – Cherkessko–Kizlyarsky; 5 – epicenters of earthquakes with $M_s \geq 4.5$. Blocks of consolidated crust: Dz – Dzirulsky, Vt – Verkhnetersky, Sl – Sulaksky, Kb – Kubachi, Kt – Kutaisky, Tr – Tersky, Shr – Shiraksky, El – Elbrusky. EBP – East Black Sea microplate. Seismically active zones: R – Racha–Dzhava, Ch – Chkhalt–Teberda, V – East Black Sea, Z – Zakatalsk–Shekiyskaya, T – Tersko–Sulaksky. AB – profile line

В восточной части Черного моря в анализируемый период активизировалась сейсмичность, обусловленная Восточно-Черноморским землетрясением (23.12.2012). В южной части региона исследования (41.0° – 41.5° с.ш., 43.5° – 44.5° в.д.) сейсмическая активность проявилась в пределах структур кристаллической коры Малого Кавказа, северным ограничением которых, по-видимому, является Аджаро-Мингечаурский разлом.

По результатам анализа схем плотности распределения эпицентров землетрясений с $M_s \geq 2.5$ и $M_s \geq 3.5$ за период 2001–2021 гг. Центрального сегмента Большого Кавказа выделены Рача-Джавская и Чхалта-Тебердинская сейсмоактивные зоны.

В очаговой зоне Тебердинского (21.10.1905) и Чхалтинского (16.07.1963) землетрясений были зарегистрированы землетрясения Домбайское-I (26.03.2013, $M_s=4.4$, $H=4$ км) и Домбайское-II (28.05.2013, $M_s=4.4$, $H=5$ км), которые произошли под действием близгоризонтальных напряжений сжатия север-северо-восточного направления, имели близкие параметры и сопровождались афтершоковыми процессами, движение по обоим очагам – взброс с небольшой сдвиговой компонентой [Габсатарова и др., 2019]. Чхалта-Тебердинская сейсмоактивная зона находится в области влияния Сването-Алазанского разлома и с юга контролируется Тиварчеллийским сейсмоактивным разломом.

Сейсмическая активизация Рача-Джавской зоны в начале XXI века связана с разрядкой напряжений, возникших после одного из сильных на Кавказе Рачинского (29.04.1991, $M_w = 6.9$, $H=7$ км) землетрясения. В пределах северной ветви зоны вблизи г. Они 6 февраля 2006 г. произошло землетрясение Онийское-I с $M_s=5.0$, а в нескольких километрах северо-восточнее его эпицентра, примерно в 10 км южнее г. Они 7 сентября 2009 г. зарегистрировано землетрясение Онийское-II с $M_s=5.8$. Рача-Джавская сейсмоактивная зона локализована в пределах северной части Дзирульского высокоплотного массива, северным ее ограничением является Они-Шекский сейсмоактивный разлом, по которому происходит смещение северного контура этой зоны в запад-северо-западном направлении от эпицентра Рачинского землетрясения.

Выходы раннедокембрийских метаморфических пород Дзирульского блока закартированы в его южной части (Грузинская глыба). Локальные тектонические напряжения в области Дзирульского блока имеют сложный характер. В пределах его северной части наблюдается тенденция к вращательному движению блока против часовой стрелки при северо-восточном основном тренде Закавказской плиты [Стогний и др., 2023]. В такой геодинамической обстановке сейсмическая активность Рача-Джавской зоны будет определяться интенсивностью колебательных движений и кинематикой тектонических напряжений Дзирульского блока консолидированной коры, которые во многом формируют как условия накопления энергии очага землетрясения, так и ее рассеивания.

Юго-западнее Рача-Джавской зоны начала формироваться сейсмоактивная зона, приуроченная к Кутаисскому высокоплотному блоку (рис. 1а). Землетрясения с $M_s \geq 3.5$ за исследуемый период здесь не зафиксированы, однако судя по тенденции развития в ближайшие десятилетия в ее пределах возможны землетрясения по интенсивности соизмеримые с Онийскими.

В северной части Эльбрусского и Терского блоков выделяется региональная аномальная зона слабой сейсмичности, субпараллельная Черкесско-Кизлярскому разлому.

В пределах Эльбрусского блока Центрального сегмента Большого Кавказа, ограниченного с юга и севера соответственно Сването-Алазанским и Черкесско-Кизлярским разломами, с запада Лаба-Батумским, а с востока Згитским и Пятигорским разломами, в XX веке произошло порядка 10 землетрясений с $M \geq 5.0$. В первые десятилетия XXI века этот блок характеризуется слабой сейсмичностью,

отмечается лишь один район повышенной сейсмичности в его восточной части в зоне слабой сейсмичности, субпараллельной Пятигорскому разлому.

Верхнетерский блок Центрального сегмента, ограниченный с юга и севера соответственно Сването-Алазанским и Владикавказским разломами, а с запада и востока Згитским и Халкилойским разломами, в первые десятилетия XXI века характеризуется более высокой (по сравнению с Эльбрусским блоком) сейсмической активностью, наиболее интенсивно проявленной в его восточной части. В зоне Владикавказского сейсмогенного разлома произошло Хаталдонское (11.05.2008, $K_p=10,2$, $I_0=4$) землетрясение [Габсатарова и др., 2015], облако афтершоков которого имеет форму эллипса, вытянутого вдоль этого разлома.

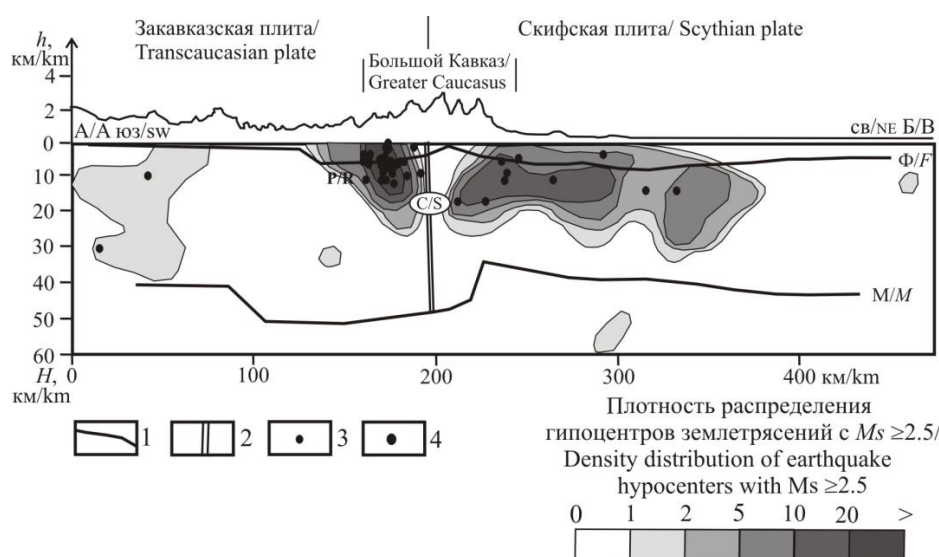


Рис. 2. Плотность распределения гипоцентров землетрясений с $M_s \geq 2.5$ по разрезу земной коры профиля А-Б за 2001–2021 гг. 1 – границы консолидированной коры по [Павленкова, 2012]: Ф – кристаллический фундамент, М – Мохо; 2 – Сването-Алазанский (С) межплитный разлом; 3, 4 – гипоцентры землетрясений: 3 – с $M_s \geq 3.5$, 4 – с $M_s \geq 4.5$. Р – Рача-Джавская сейсмически активная зона /

Fig. 2. Distribution density of earthquake hypocenters with $M_s \geq 2.5$ along the A-B crustal section for 2001–2021. 1 – boundaries of the consolidated crust according to [Pavlenkova, 2012]: F – crystalline basement, M – Moho; 2 – Svaneti-Alazani (S) interplate fault; 3, 4 – earthquake hypocenters: 3 – with $M_s \geq 3.5$, 4 – with $M_s \geq 4.5$. R – Racha-Dzhava seismically active zone

На рис. 2 по профилю А-Б (местоположение профиля показано на рис. 1) приведена плотность распределения гипоцентров землетрясений с $M_s \geq 2.5$ за период 2001–2021 гг., а на рис. 3 представлены разрезы плотности распределения гипоцентров землетрясений за временные интервалы (года) в пять лет: 2001–2005 (рис. 3а), 2006–2010 (рис. 3б), 2011–2015 (рис. 3в), 2016–2020 (рис. 3г).

В 2021 г. за короткий промежуток времени (с 7 августа по 10 октября) в пределах полосы юго-западной части исследованного профиля АБ (интервал 0–70 км профиля) было зарегистрировано 10 землетрясений с магнитудой $M_s \geq 2.5$, два из которых имели магнитуду $M_s \geq 3.5$ (07.08.2021, $M_s=3.8$, $H=10$ км и 17.08.2021, $M_s=3.5$, $H=30$ км). Следует отметить, что за предшествующий довольно длительный период времени (2001–2020 гг.) землетрясений с магнитудой $M_s \geq 2.5$ в этой части профиля не зафиксировано.

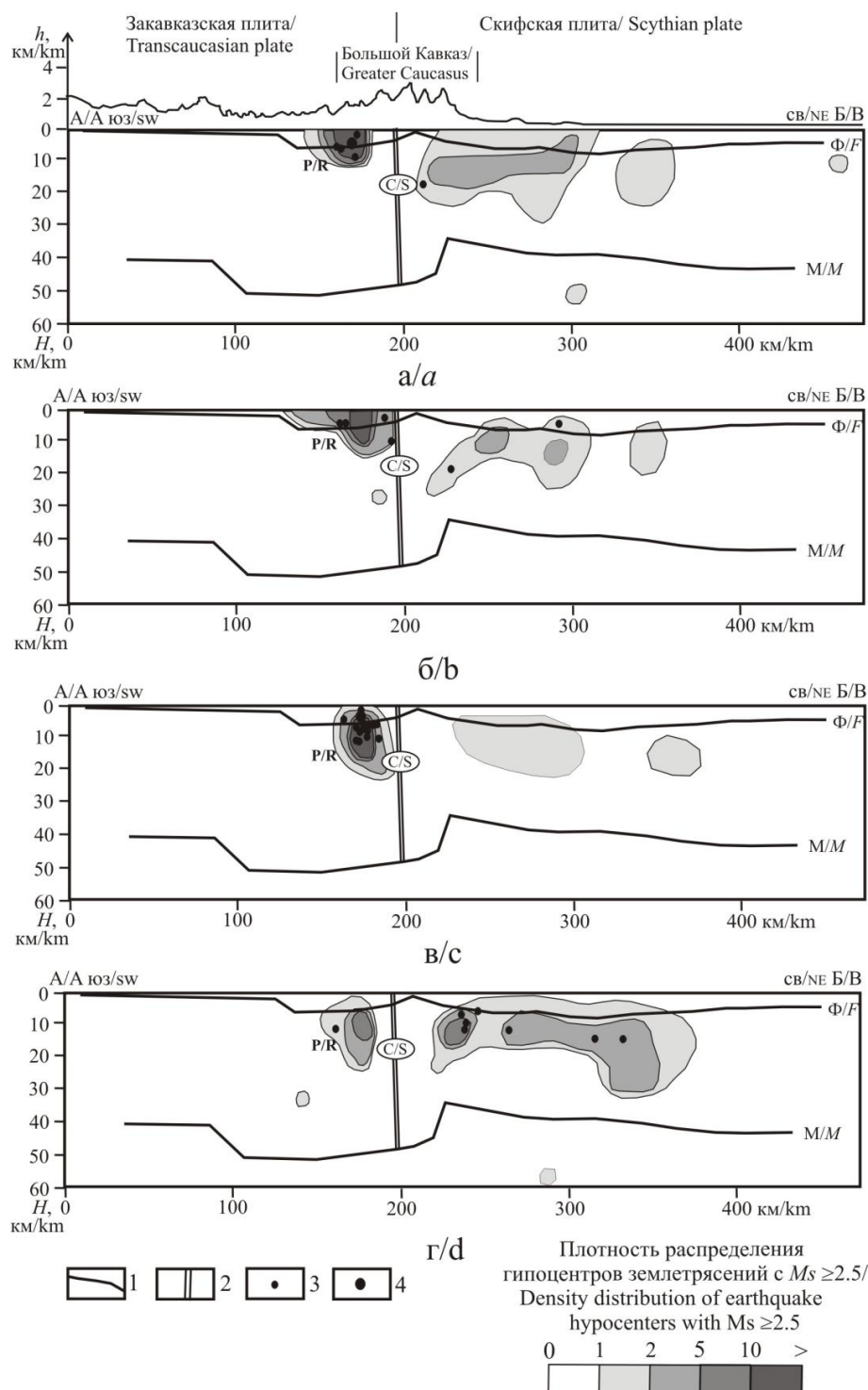


Рис. 3. Плотность распределения гипоцентров землетрясений с $M_s \geq 2.5$ по разрезу земной коры профиля А-Б за временные интервалы (годы): а – 2001–2005, б – 2006–2010, в – 2011–2015, г – 2016–2020. 1 – границы консолидированной коры по [Павленкова, 2012]; Ф – кристаллический фундамент, М – Мохо; 2 – Сването-Алазанский (С) межплитный разлом; 3, 4 – гипоцентры землетрясений: 3 – с $M_s \geq 3.5$, 4 – с $M_s \geq 4.5$. Р – Рача-Джавская сейсмически активная зона /

Fig. 3. Distribution density of earthquake hypocenters with $M_s \geq 2.5$ along the earth's crustal section of profile A-B for time intervals (years): а – 2001–2005, б – 2006–2010, в – 2011–2015, д – 2016–2020. 1 – boundaries of the consolidated crust according to [Pavlenkova, 2012]; F – crystalline basement, M – Moho; 2 – Svaneti-Alazani (S) interplate fault; 3, 4 – earthquake hypocenters: 3 – with $M_s \geq 3.5$, 4 – with $M_s \geq 4.5$. R – Racha-Dzhava seismically active zone

Выделенная группа землетрясений (см. рис. 2) довольно растянута по профилю и по глубине гипоцентров (от 1 до 34 км). Данная сейсмическая зона, активизировавшаяся на довольно короткий промежуток времени, имеет северным ограничением, по-видимому, Аджаро-Мингечаурский разлом.

В полосу профиля АБ (интервал 130–190 км профиля) попала восточная часть Рача-Джавской сейсмически активной зоны, глубина гипоцентральной области которой находится в интервале 0–25 км (рис. 2.). За исследуемый период (2001–2021 гг.) в ее пределах произошло 23 сейсмических события с $M_s \geq 3.5$, три из которых имели магнитуду $M_s \geq 4.5$. По характеру изменения плотности гипоцентров (рис. 3) можно отметить увеличение глубины гипоцентральной области с 12 км в период 2001–2005 гг. до 25 км в 2011–2020 гг. Ее расширение в 2006–2010 гг. связано с проявлением землетрясений Онийское-I (06.02.2006) и Онийское-II (07.09.2009), сопровождавшихся большой серией афтершоков. Отмечается также некоторое уменьшение плотности распределения гипоцентров землетрясений в период 2006–2010 гг. по сравнению с предыдущим периодом (2001–2005 гг.), активизация восточной части зоны в период 2011–2015 гг., когда произошло 9 сейсмических событий с $M_s \geq 3.5$ и одно с $M_s \geq 4.5$, и значительное их уменьшение в период 2015–2020 гг. Эти пространственно-временные особенности связаны, по-видимому, с процессами накопления и разрядки напряжений в данной области пространства восточной части Рача-Джавской зоны.

Зона Сването-Алазанского межплитного разлома (интервал 190–210 км профиля АБ) практически асейсмична. Далее в полосу профиля АБ попадают области межблокового Згитского разлома мегантиклинория Большого Кавказа и Терского блока Терско-Каспийского прогиба Скифской плиты, характеризующиеся довольно рассеянной сейсмичностью (интервал 210–380 км профиля АБ), с глубиной ее проявления от 0 до 25–35 км (рис. 2). За исследованный период (2001–2021 гг.) в пределах этой области концентрации гипоцентров произошло 10 землетрясений с $M_s \geq 3.5$, четкой границы в проявлении сейсмичности между структурами Большого Кавказа и Терско-Каспийского прогиба нет. Максимальная глубина гипоцентров землетрясений в области межблокового Згитского разлома мегантиклинория до 25 км, в пределах Терского блока – до 35 км. Вместе с тем, при детальном рассмотрении, особенно по пятилетним периодам (рис. 3), отчетливо видно, что эта область концентрации гипоцентров состоит из трех участков, каждый из которых имеет свое автономное развитие. Самый северный из них (интервал 320–380 км профиля АБ), проявляется локальным максимумом плотности распределения гипоцентров землетрясений, а южный (интервал 210–260 км профиля АБ), приурочен к Верхнетерскому блоку с максимумом плотности концентрации гипоцентров в зоне его южного ограничения – Владикавказского сейсмогенного разлома.

При анализе характера изменения сейсмичности можно отметить значительное уменьшение сейсмической активности этой области (севернее Сването-Алазанского разлома) в период 2010–2015 гг. по сравнению с предшествующими периодами (2001–2005 и 2006–2010 гг.) с резким увеличением ее активности в период 2016–2020 гг., когда в ее пределах произошло 7 землетрясений с $M_s \geq 3.5$.

Таким образом, Верхнетерский блок восточной части Центрального сегмента проявляется значительно более высокой сейсмической активностью по сравнению с Эльбрусским блоком. Повышенной сейсмической активностью при этом отмечается Пятигорский разлом северо-западного направления, представляющий со-

бой западное ограничение Эльбрусского блока, и Владикавказский разлом, являющийся северным ограничением Верхнетерского блока, а зона Сването-Алазанского межплитного разлома (в полосе профиля) практически асейсмична. Следует также отметить значительную изменчивость сейсмической активности по пятилетним периодам, которая проявляется специфическим образом в южной (северный фланг Закавказской плиты) и северной (южный фланг Скифской плиты) частях в пределах полосы исследованного профиля.

Обсуждение результатов

Проведенный анализ плотности распределения эпицентров землетрясений Центрального сегмента Большого Кавказа и близлежащих территорий (за период 2001–2021 гг.) с $M_s \geq 2.5$ (рис. 1а) и $M_s \geq 3.5$ (рис. 1б) позволил выделить Рача-Джавскую, Чхалта-Тебердинскую, Загатальско-Шекинскую и Терско-Сулакскую сейсмоактивные зоны. В Эльбрусском блоке Центрального сегмента в этот период повышенной сейсмической активностью отмечалась зона в его северной части, субпараллельная Черкесско-Кизлярскому сейсмогенному разлому, и в его восточной части, в зоне влияния Пятигорского разлома. Общая сейсмичность Эльбрусского блока была при этом на значительно более низком уровне, чем расположенного восточнее Верхнетерского, что укладывается в общую закономерность – блоки с более высокой плотностью (в данном случае Верхнетерский), как правило, являются более сейсмически активными (при прочих равных условиях). Для Верхнетерского блока в исследованный период сейсмическая активность наиболее отчетливо проявилась в его восточной, северо-восточной и юго-восточной частях, соответственно в зонах влияния Халкилойского, Владикавказского и Сването-Алазанского разломов.

Изучение плотности распределения гипоцентров землетрясений (за период 2001–2021 гг.) в полосе профиля северо-восточного направления, пересекающего Верхнетерский блок в его западной части (в полосе профиля расположен профиль ГСЗ Степное-Бакуриани) позволило установить, что основная часть гипоцентров локализована в пределах консолидированной коры, и только немногие из них находятся в осадочном чехле. Рача-Джавская сейсмоактивная зона, восточная часть которой попадает в полосу профиля, при анализе распределения гипоцентров землетрясений по 5-летним периодам имеет отчетливую тенденцию увеличения ее глубины с 12 км (2001–2005 гг.) до 25 км (2015–2020 гг.). Зона Сването-Алазанского межплитного разлома практически асейсмична. Изменение сейсмической активности в различных частях профиля позволяет предположить возможный их квазипериодический характер с периодом 12-летнего Солнечного цикла [Куликова и др., 2005; Ривин, 1989]. Значительное расхождение в периодах ее наибольшей активности в южной (северный фланг Закавказской плиты) и северной (южный фланг Скифской плиты) частях может объясняться различиями в характере сейсмичности регионального и локального уровня. Их причины можно установить только при проведении специализированных исследований.

Выводы

1. По результатам анализа распределения плотности эпицентров землетрясений с $M_s \geq 2.5$ и $M_s \geq 3.5$ за период 2001–2020 гг. Центрального сегмента Большого Кавказа выделены Рача-Джавская и Чхалта-Тебердинская сейсмоактивные зоны. Сейс-

мическая активность Рача-Джавской зоны определяется интенсивностью колебательных движений и кинематикой тектонических напряжений Дзирульского блока северного фланга Закавказской плиты. Чхалта-Тебердинская сейсмоактивная зона находится в области влияния Сването-Алазанского и Тиварчелийского разломов. Формирование очага сильного землетрясения данной зоны определяется геодинамическими напряжениями, создаваемыми Скифской, Закавказской и Восточно-Черноморской плитами.

2. Рассмотрена динамика 5-летних циклов гипоцентральной области Рача-Джавской сейсмоактивной зоны за период 2001–2020 гг. в полосе профиля ГСЗ Степное-Бакуриани. Максимум плотности гипоцентров землетрясений с $M_s \geq 2.5$ по разрезу земной коры в период 2001–2010 гг. находился в интервале 1–12 км. С 2011 г. происходит увеличение его глубины (10–25 км), что связано с активизацией Рача-Джавской зоны после Онийского-II (07.09.2009, $M_s = 5.8$) землетрясения.

3. При анализе изменений плотности распределения гипоцентров землетрясений в 5-летних циклах за период 2001–2020 гг. в полосе профиля ГСЗ Степное-Бакуриани, пересекающего Центральный сегмент, отмечено значительное расхождение в их характере южной части профиля, представляющей северный фланг Закавказской плиты, и его северной части, представляющей южный фланг Скифской плиты. Для определения их возможной квазипериодичности необходимо проведение специализированных исследований.

Литература

1. Ананьин И.В. Сейсмичность Северного Кавказа. М.: Наука, 1977. – 148 с.
2. Габсатарова И.П. Современная сейсмичность Северного Кавказа. // В сборнике: Геодинамика, сейсмичность и экзогенные геологические процессы природного и техногенного характера на Кавказе. Владикавказ: ВНИЦ РАН, 2015. – С. 11–22.
3. Габсатарова И.П., Королецки Л.Н., Малянова Л.С. Дуплет Домбайских землетрясений 2013 г. в очаговой зоне Чхалтинского землетрясения 1963 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2019. – Вып. 22 (2013 г.). – С. 362–369. DOI: 10.35540/1818-6254.2019.22.32.
4. Габсатарова И.П., Погода Э.В., Головкова Л.В. Хаталдонское землетрясение 11 мая 2008 г. с $K_p=10.2$, $I_0=4$ (Северная Осетия-Алания). // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. – 2015. – С. 60–97.
5. Заалишвили В.Б., Чотчаев Х.О. Влияние геодинамических процессов на геоэкологическое состояние высокогорных территорий. Владикавказ: ГФИ ВНИЦ РАН, 2022. – 263 с.
6. Кафтан В.И., Маневич А.И., Татаринов В.Н. Современные подъемы земной коры, сейсмичность и тектоника Кавказа. // Материалы XXIII Всероссийской международной конференции «Структура, вещественный состав, свойства, современная геодинамика и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных регионов». Воронеж: Изд. дом ВГУ, 2023. – С. 95–99.
7. Куликова В.В., Куликов В.С., Бычкова Я.В., Бычков А.Ю. История Земли в галактических и солнечных циклах. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2005. – 250 с.
8. Лукк А.А., Шевченко В.И. Сейсмичность, тектоника и GPS-геодинамика Кавказа. // Физика Земли. – 2019. – № 4. – С. 99–123.
9. Маммадли Т.Я. Анализ сейсмической активности глубинных разломов с использованием метода определения сейсмогенерирующих зон: оценка зон сейсмической опасности территории Азербайджана. // Геотектоника. – 2022. – № 2. – С. 95–104.
10. Несмеянов С.А., Воейкова О.А. К проблеме типизации сейсмогенерирующих структур Восточно-Европейской платформы. // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический – 2016. – Т. 91. Вып. 4–5. – С. 27–39.

11. 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.
12. Ривин Ю.Р. Циклы Земли и Солнца. М.: Наука, 1989. – 165 с.
13. Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Лутиков А.И., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Горбатилов А.В. Эндогенные опасности Большого Кавказа. М.: ИФЗ РАН, 2014. – 256 с.
14. Стогний В.В., Стогний Г.А., Пономарева Н.Л. Сейсмотектоника южной части Центрального сегмента Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 1. – С. 76–95. DOI: 10.46698/VNC.2023.45.94.006.
15. Стогний Г.А., Стогний В.В. Южная граница Скифской плиты в системе блоковой делимости консолидированной коры Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 6–18. DOI: 10.46698/VNC.2023.96.83.001.
16. Gamkrelidze I., Giorgobiani T., Kuloshvili S., Lobjanidze G., Shengelaia G. Active deep faults map and the catalogue for the territory of Georgia. // Bulletin of the Georgian Academy of Sciences. – 1998. – Vol. 157. No. 1. – pp. 80–85.
17. McClusky S., Balassanian S., Barka A. et al. Global positioning system constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. // Journal of Geophysical Research. – 2000. – Vol. 105. – pp. 5695–5719. DOI: 10.1029/1999 JB900351.
18. Sosson M., Stephenson R.A., Adamia S.A. Tectonic evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus: An introduction. // Geological Society London Special Publication. – 2017. – Vol. 428. No. 1. – 368 p.
19. Tibaldi A., Bonali F.L., Russo E., Pasquare Mariotto F.A. Structural development and stress evolution of an arcuate fold-and-thrust system, southwestern Greater Caucasus, Republic of Georgia. // Journal of Asian Earth Sciences. – 2018. – Vol. 156. – pp. 226–245.
20. 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. // Journal of Asian Earth Sciences. – 2020. – Vol. 188. – pp. 1–18.
21. 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. // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 1995. – Vol. 100. Issue B3. – pp. 4011–4033.
22. 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.

References

1. Ananyin I.V. Seismicity of the North Caucasus. Moscow. Nauka. 1977. 148 p. (In Russ.)
2. Gabsatarova I.P. Modern seismicity of the North Caucasus. In: Proceedings Geodynamics, seismicity and exogenous geological processes of natural and anthropogenic character in the Caucasus. Vladikavkaz. VSC RAS. 2015. pp. 11–22. (In Russ.)
3. Gabsatarova I.P., Koroletsky L.N., Malyanova L.S. Doublet of the 2013 Dombai earthquakes in the focal zone of the 1963 Chkhalt'a earthquake. Earthquakes of Northern Eurasia. 2019. Issue 22 (2013). pp. 362–369. DOI: 10.35540/1818-6254.2019.22.32. (In Russ.)
4. Gabsatarova I.P., Pogoda E.V., Golovkova L.V. Khatal'don earthquake of 11 May 2008 with $K_p=10.2$, $I_0=4$ (North Ossetia-Alania). Earthquakes of Northern Eurasia, 2008. 2015. pp. 60–97. (In Russ.)
5. Zaalishvili V.B., Chotchaev Kh.O. Influence of geodynamic processes on the geo-ecological state of high-mountain territories. Vladikavkaz. GPI VSC RAS. 2022. 263 p. (In Russ.)
6. Kaftan V.I., Manevich A.I., Tatarinov V.N. Modern uplifts of the Earth's crust, seismicity and tectonics of the Caucasus. In: Proceedings of the All-Russian International Conference

“Structure, material composition, properties, modern geodynamics and seismicity of platform territories and adjacent regions”. Voronezh. VSU. 2023. pp. 95–99. (In Russ.)

7. Kulikova V.V., Kulikov V.S., Bychkova Ya.V., Bychkov A.Ju. Earth history through galactic and solar cycles. Petrozavodsk. Karelian Scientific Center of RAS. 2005. 250 p. (In Russ.)

8. Lukk A.A., Shevchenko V.I. Seismicity, tectonics, and GPS geodynamics of the Caucasus. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2019. No. 4. pp. 99–123. (In Russ.)

9. Mammadli T.Ya. Determination of seismogenic zones for analysis of seismotectonic activity of deep faults: seismic hazard assessment for the territory of Azerbaijan. *Geotectonics*. 2022. No. 2. pp. 95–104. (In Russ.)

10. Nesmeyanov S.A., Voeikova O.A. On the problem of typification of seismogenic structures of the East European platform. *Bulletin of the Moscow Society of Naturalists. Geological Department*. 2016. Vol. 91. Issue 4–5. pp. 27–39. (In Russ.)

11. 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. No. 5. pp. 16–23. (In Russ.)

12. Rivin Yu.R. Earth and solar cycles. Moscow. Nauka. 1989. 165 p. (In Russ.)

13. Rogozhin E.A., Ovsyuchenko A.N., Lutikov A.I., Sobisevich A.L., Sobisevich L.E., Gorbatiykov A.V. Endogenous hazards of the Greater Caucasus. Moscow. IPE RAS. 2014. 256 p. (In Russ.)

14. Stogny V.V., Stogny G.A., Ponomareva N.L. Seismotectonics of the southern part of the Greater Caucasus Central segment. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 1. pp. 76–95. DOI: 10.46698/VNC.2023.45.94.006. (In Russ.)

15. Stogny G.A., Stogny V.V. The Scythian plate southern boundary in the system of block divisibility consolidated crust of the Greater Caucasus Central and Eastern segments. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 6–18. DOI: 10.46698/VNC.2023.96.83/001. (In Russ.)

16. Gamkrelidze I., Giorgobiani T., Kuloshvili S., Lobjanidze G., Shengelaia G. Active deep faults map and the catalogue for the territory of Georgia. *Bulletin of the Georgian Academy of Sciences*. 1998. Vol. 157. No. 1. pp. 80–85.

17. McClusky S., Balassanian S., Barka A. et al. Global positioning system constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research*. 2000. Vol. 105. pp. 5695–5719. DOI: 10.1029/1999 JB900351.

18. Sosson M., Stephenson R.A., Adamia S.A. Tectonic evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus: An introduction. *Geological Society London Special Publication*. 2017. Vol. 428. No. 1. 368 p.

19. Tibaldi A., Bonali F.L., Russo E., Pasquare Mariotto F.A. Structural development and stress evolution of an arcuate fold-and-thrust system, southwestern Greater Caucasus, Republic of Georgia. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2018. Vol. 156. pp. 226–245.

20. 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. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2020. Vol. 188. pp. 1–18.

21. 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. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1995. Vol. 100. Issue B3. pp. 4011–4033.

22. 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.