

УДК 624.121.54:551.24(479)

DOI: 10.46698/VNC.2024.37.52.001

Оригинальная статья

Глубинное строение и реологическая стратификация земной коры Центрального сегмента Большого Кавказа

В.В. Стогний , Г.А. Стогний 

Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН,
Россия, 362002, ул. Маркова, 93а,
e-mail: stogny_vv@mail.ru

Статья поступила: 05.04.2024, доработана: 24.05.2024, принята к публикации: 26.05.2024

Резюме: Актуальность работы. Глубинное строение Большого Кавказа изучалось различными геофизическими методами. Однако анализ реологического состояния земной коры при обосновании геолого-геофизических моделей Центрального сегмента не выполнялся, поэтому поиск связей особенностей его глубинного строения с реологической стратификацией литосферы данного региона является актуальной проблемой. **Цель работы.** На основе имеющихся материалов глубинного строения Центрального сегмента Большого Кавказа разработать модель реологической стратификации литосферы по одному из региональных профилей и выполнить ее анализ. **Методы и методология исследования.** Методика изучения реологической стратификации литосферы нашла применение при разработке геодинамических моделей земной коры, а методология реологических исследований является теоретической основой парадигмы тектонической расслоенности литосферы. В основу модели реологической стратификации литосферы Центрального сегмента взят глубинный разрез по региональному профилю ГСЗ Степное-Бакуриани, по которому рассчитаны профили обобщенной прочности литосферы для Закавказской плиты, южного крыла и Осевой мегазоны Большого Кавказа и Скифской плиты. **Результаты работы.** Впервые обоснована двухмерная (D2) модель реологической стратификации Центрального сегмента Большого Кавказа. Показано, что переход из хрупкого в пластичное (крип) состояние в разрезе Закавказской плиты происходит в низах верхнего (18–20 км) и нижнего (35–40 км) слоев консолидированной коры, в разрезе южного крыла мегантиклинория Большого Кавказа – только в нижнем слое (42–50 км), в Осевой мегазоне Большого Кавказа – в низах верхнего (12–15 км), среднего (29–33 км) и нижнего (40–48 км) слоев, а в разрезе Скифской плиты – в низах верхнего (15–18 км) и нижнего (33–37 км) слоев. Формирование нижней части земной коры Центрального сегмента происходило за счет реологически подвижных горизонтов нижней части земной коры Закавказской плиты, а его Осевой мегазоны – за счет реологически подвижных горизонтов верхней части Скифской плиты.

Ключевые слова: Большой Кавказ, Скифская плита, Закавказская плита, консолидированная кора, реологическая стратификация.

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

Для цитирования: Стогний В.В., Стогний Г.А. Глубинное строение и реологическая стратификация земной коры Центрального сегмента Большого Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(2): 6–20. DOI: 10.46698/VNC.2024.37.52.001

DOI: 10.46698/VNC.2024.37.52.001

Original paper

Deep structure and rheological stratification of the Earth's crust for the Greater Caucasus Central segment

V.V. Stogny^{ID}, G.A. Stogny^{ID}

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

Received: 05.04.2024, revised: 24.05.2024, accepted: 26.05.2024

Abstract: Relevance. The deep structure of the Greater Caucasus has been studied using various geophysical methods. However, an analysis of the Earth's crust rheological state when substantiating geological and geophysical models of the Greater Caucasus Central segment was not carried out, therefore the search for connections between the features of its deep structure and the rheological stratification of lithosphere is an actual problem. **Aim.** Based on the available materials of the deep structure of the Greater Caucasus Central segment, develop a model of the rheological stratification of the lithosphere along one of the regional profiles and perform its analysis. **Research methods and methodology.** The methodology for studying the rheological stratification of the lithosphere has found application in the development of geodynamic models of the Earth's crust, and the methodology of rheological research is the theoretical basis for the paradigm of the lithosphere tectonic stratification. The model of the lithosphere rheological stratification of Central segment is based on a depth section along the Stepnoe-Bakuriani DSS profile, from which profiles of the generalized strength of the lithosphere were calculated for the Transcaucasian plate, Greater Caucasus southern wing, Axial megazone and Scythian plate. **Results.** For the first time, a two-dimensional (D2) model of rheological stratification of the Greater Caucasus Central segment has been substantiated and it has been shown that the transition from a brittle to a plastic (creep) state in the section of the Transcaucasian plate occurs in the bottoms of the upper (18–20 km) and lower (35–40 km) layers of the consolidated crust, in the section of the southern wing of the Greater Caucasus meganticlinorium – only in the lower layer (42–50 km), in the Axial megazone of the Greater Caucasus – in the lower horizons of the upper (12–15 km), middle (29–33 km) and lower (40–48 km) layers, and in the section of the Scythian plate – at the bottom of the upper (15–18 km) and lower (33–37 km) layers. The formation of the Earth's crust lower part of the Central segment occurred due to the rheologically mobile horizons of the lower part of the Transcaucasian plate Earth's crust, and its Axial megazone – due to the rheologically mobile horizons of the Scythian plate upper part.

Keywords: Greater Caucasus, Scythian plate, Transcaucasian plate, consolidated crust, rheological stratification.

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. Deep structure and rheological stratification of the Earth's crust for the Greater Caucasus Central segment. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2024. 14(2): 6–20. DOI: 10.46698/VNC.2024.37.52.001

Введение

Глубинное строение Большого Кавказа и его Центрального сегмента изучалось различными методами. Так, по данным гравirazведки на основе метода математического моделирования была обоснована общая модель строения земной коры [Шенгелая, 1984]. Для Центрального сегмента строение земной коры охарактеризовано в материалах регионального геофизического профиля глубинных сейсмических зондирований (ГСЗ) Степное-Бакуриани [Павленкова, 2012] и Осетинского профиля микросейсмического зондирования (ММЗ), пересекающих структуры Большого Кавказа [Gorbatikov et al., 2015]. Структура Осевой мегазоны и северного крыла мегантиклинория рассмотрены в материалах профилей Приэльбрусский, Чегемский и Геналдонский [Шемпелев, 2008; Шемпелев и др., 2017, 2020], отработанных методами обменных волн землетрясений (МОВЗ) и глубинных магнитотеллурических зондирований (ГМТЗ) (рис. 1). При изучении глубинного строения Большого Кавказа применялся и комплексный подход к интерпретации материалов гравirazведки, магниторазведки, различных модификаций сейсморазведки и электроразведки [Гонгадзе, 2016; Гонгадзе и др., 2016; Рогожин и др., 2015]. К настоящему времени накоплен представительный материал по изучению глубинного строения Большого Кавказа и его Центрального сегмента различными методами и при различных подходах.

Методика изучения реологической стратификации литосферы, разработанная Г. Раналли [Ranalli, 1987; Ranalli, Murphy, 1987], нашла широкое применение в геодинамических исследованиях и опробована в различных регионах [Глазнев, 2003; Стогний, Стогний, 2017; Cloetingh et al., 2003; Orug et al., 2019]. Методология реологических исследований является теоретической основой парадигмы тектонической расслоенности литосферы, разработанной в ГИН РАН [Белов и др., 1990]. Опробование данной методики на имеющихся материалах глубинного строения Центрального сегмента Большого Кавказа является актуальной задачей, что определило цель работы.

Цель проведенных исследований заключалась в разработке, на основе имеющихся материалов изучения глубинного строения Центрального сегмента Большого Кавказа, модели реологической стратификации литосферы по одному из региональных профилей и оценке ее влияния на геодинамические процессы формирования тектоники данного региона.

Материалы и методика исследований

Для реализации поставленной цели создания модели реологической стратификации литосферы Центрального сегмента Большого Кавказа в качестве основы был выбран интервал регионального профиля ГСЗ Степное-Бакуриани (рис. 1). В пределах данного интервала точки расчета (1–4) профилей обобщенной прочности литосферы характеризуют основные рассматриваемые структуры: профиль 1 – Закавказская плита, профиль 2 – южный склон мегантиклинория, профиль 3 – Осевая мегазона Большого Кавказа, а профиль 4 – Скифская плита.

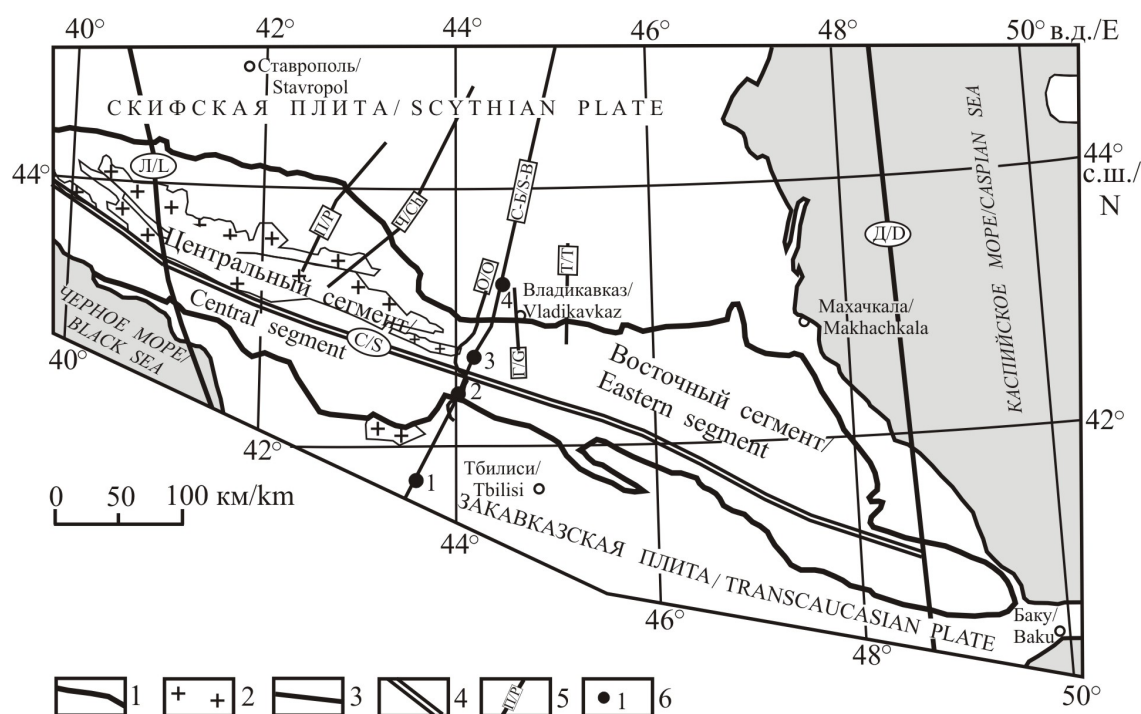


Рис. 1. Схема глубинных геофизических профилей и расположения расчетных реологических профилей обобщенной прочности литосферы Центрального сегмента Большого Кавказа. 1 – границы мегантиклинория; 2 – выходы кристаллических пород Центрального сегмента и Дзирульского массива; 3 – межгеоблоковые разломы: Л – Лаба-Батумский, Д – Дербент-Ленкоранский; 4 – Сването-Алазанский (С) межплитный разлом консолидированной коры [Стогний, Стогний, 2023]; 5 – глубинные геофизические профили: С-Б – Степное-Бакуриани, П – Приэльбрусский, Ч – Чегемский, Г – Геналдонский, Т – Терский, О – Осетинский; 6 – профиль обобщенной прочности литосферы и его номер /

Fig. 1. Scheme of deep geophysical profiles and the location of calculated rheological profiles of the generalized strength of the lithosphere of the Greater Caucasus Central segment.

- 1 – boundaries of the meganticlinorium; 2 – outcrops of crystalline rocks of the Central segment and the Dzirul massif; 3 – intergeoblock faults: L – Laba-Batumi, D – Derbent-Lenkoran; 4 – Svaneti-Alazani (S) interplate fault of the consolidated crust [Stogny, Stogny, 2023]; 5 – deep geophysical profiles: S-B – Stepnoe-Bakuriani, P – Prielbrussky, Ch – Chegemsky, G – Genaldonsky, T – Tersky, O – Ossetian; 6 – profiles and its numbers of the lithosphere generalized strength.

Методология составления профилей обобщенной прочности литосферы (одномерный вариант D_1) базируется на сопоставлении значений разности максимальных и минимальных сжимающих напряжений, рассчитанных при хрупком разрушении согласно закону Кулона-Биерли и криповой прочности, и обоснования типа разрушения и подвижки на соответствующих интервалах профиля, что приводилось во многих опубликованных работах, в том числе учебных пособиях [Стогний, Стогний, 2000]. Вместе с тем, методика таких расчетов в различных регионах и при различных подходах может меняться, что требует дополнительных пояснений.

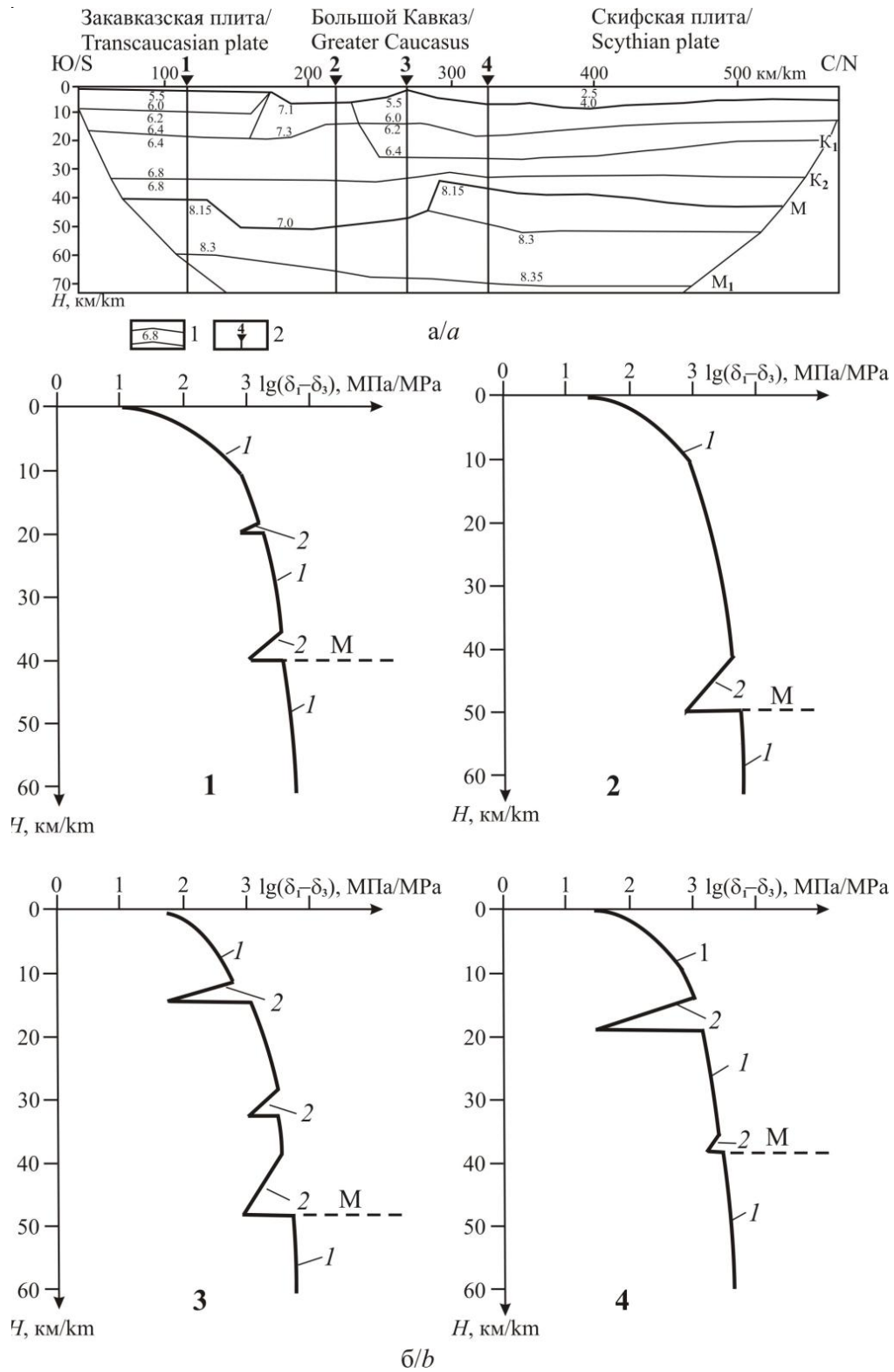


Рис. 2. Строение земной коры Центрального сегмента по профилю ГСЗ Степное-Бакуриани [Павленкова, 2012] (а) и расчетные реологические профили обобщенной прочности литосферы (б). (а): 1 – границы слоев с разными сейсмическими скоростями, цифры – скорости продольных волн, км/с; 2 – профили обобщенной прочности литосферы и их номера (1–4). Границы: K₁, K₂ – кристаллической коры, M – Мохоровичича, M₁ – верхней мантии. (б): кривые обобщенной прочности литосферы (1–4): 1 – при хрупком разрушении, 2 – “криповая” прочность. M – граница Мохоровичича /

Fig. 2. Structure of the earth's crust of the Central segment according to the Stepnoe-Bakuriani DSS profile [Pavlenkova, 2012] (a) and calculated rheological profiles of the lithosphere generalized strength (b). (a): 1 – boundaries of layers with different seismic velocities, numbers – longitudinal wave velocities, km/s; 2 – profiles of the generalized strength of the lithosphere and their numbers (1–4). Boundaries: K_1, K_2 – crystalline crust, M – Mohorovicic, M_1 – upper mantle. (b): lithosphere generalized strength curves (1–4): 1 – during brittle fracture, 2 – “crip” strength. M is the Mohorovičić boundary

Прочностные свойства структурно-вещественных комплексов различных уровней литосферы согласно закону сухого трения Кулона-Биерли определяются уравнением:

$$\delta_1 - \delta_3 \geq \beta \cdot \sum_{i=1}^z \rho_i \cdot \Delta z_i \cdot g, \quad (1)$$

где $\delta_1 - \delta_3$ – разность максимального и минимального сжимающих напряжений; β – параметр, зависящий от типа разрушения и подвижки (при расчетах принят равным 1,2); z – текущий параметр глубины (предельное значение принято равным 70 км); ρ_i и Δz_i – соответственно плотность (в кг/м³) и мощность i -го интервала; g – среднее значение силы тяжести (при расчётах принято равным 9,8 м/с²).

Значения ρ_i структурно-вещественных комплексов земной коры и верхней мантии рассчитывались по корреляционной зависимости плотности ρ (г/см³) от скорости продольных волн V_p (км/с) для Центрального Кавказа [Шенгелая, 1984] (границные и пластовые скорости продольных волн каждого i -го слоя на рис. 2а):

$$\rho_i = 0,3096V_{pi} + 0,792. \quad (2)$$

Разность максимального и минимального сжимающих напряжений ($\delta_1 - \delta_3$) при пластическом режиме деформирования в литосфере в режиме установившейся ползучести (дислокационного крипа) определяется уравнением:

$$\delta_1 - \delta_3 = \left(\frac{U}{A_i} \right)^{1/n_i} \cdot \exp\left(\frac{E_i}{n_i RT(z)} \right), \quad (3)$$

где U – скорость деформации; R – газовая постоянная; A_i, E_i, n_i – реологические параметры каждого отдельного i -го слоя разреза; $T(z)$ – температура Кельвина (z – текущий параметр глубины).

Скорость деформации U (1/с) обычно принимается в пределах 10^{-14} – 10^{-16} (при проведении расчетов было принято значение $U = 10^{-15}$ 1/с). Для газовой постоянной принято ее справочное значение ($R = 8.31441$ Дж/моль·К). Реологические параметры A (ГПа·с ^{n}), энергии активации E (КДж·моль⁻¹) и безразмерного коэффициента n экспериментально определены для ограниченного числа геоматериалов, в их числе гранит, кварцит, альбитит, анортозит, кварцевый диорит, диабаз, оливинит [Стогний, Стогний, 2000]. Их значения для каждого i -го слоя разреза (A_i, E_i, n_i) вычислялись путем корреляции между отдельными видами геоматериалов согласно плотности каждого i -го слоя (для A_i и E_i в логарифмическом масштабе). Температура текущей глубины z вычислялась при постоянном ее градиенте из условия, что температура на поверхности Мохоровичича везде постоянна и соответствует 600°С.

Принятые методология и методика исследований позволили рассчитать профили обобщенной реологической прочности литосферы (рис. 2б, 1–4), адаптированные к условиям глубинного разреза (рис. 2а), которые составили основу разработки модели реологической стратификации литосферы Центрального сегмента Большого Кавказа.

Реологическая стратификация литосферы Центрального сегмента по профилю Степное–Бакуриани

Глубинное строение земной коры Большого Кавказа по профилю ГСЗ Степное–Бакуриани (рис. 2а) в интерпретации Г.А. Павленковой [2012] имеет следующие особенности. Скорости продольных волн V_p пород осадочного комплекса изменяются в пределах 2.5–4.0 км/с, увеличиваясь на кровле кристаллического фундамента до 5.5–5.6 км/с. Пределы изменений скорости продольных волн в верхней части консолидированной коры (до границы K_1) от 5.5 до 6.4 км/с, в средней коре (между границами K_1 и K_2) 6.4–6.8 км/с, увеличиваясь в нижнем слое земной коры до 7.0 км/с. На поверхности Мохоровичича (М) скорости продольных волн V_p увеличиваются до 8.15 км/с, а в верхней мантии (на глубине 60–70 км) отчетливо прослеживается граница M_1 со скоростью $V_p = 8.30–8.35$ км/с.

Мощность пород осадочного комплекса Закавказской плиты достигает 2 км (в пределах исследуемого интервала профиля), а южного крыла Большого Кавказа – 7 км. В пределах Осевой мегазоны мегантиклинория породы консолидированной коры выходят на поверхность. Мощность мезозой–кайнозойского комплекса северного крыла Большого Кавказа и Скифской плиты до 9 км. Глубина границы Мохоровичича в пределах Закавказской плиты около 40 км, а Большого Кавказа – до 45–50 км, резко уменьшаясь (от 45 до 35 км) в интервале 280–290 км профиля, и далее к северу увеличиваясь до 40–45 км. Мощность верхней части консолидированной коры Осевой мегазоны существенно (до 25 км) увеличена.

В верхней части консолидированной коры южного крыла мегантиклинория (интервал профиля 160–230 км) расположен высокоскоростной ($V_p = 7.1–7.3$ км/с) блок, по своим свойствам соответствующий нижней коре.

Анализ кривых обобщенной прочности литосферы по рассчитанным профилям (рис. 2б) позволяет отметить следующее. Переход из хрупкого в пластичное состояние в разрезе Закавказской плиты (профиль 1) происходит в низах верхнего (18–20 км) и нижнего (35–40 км) слоев консолидированной коры, в разрезе южного крыла мегантиклинория Большого Кавказа (профиль 2) – только в нижнем слое консолидированной коры (интервал 42–50 км), в Осевой мегазоне Большого Кавказа (профиль 3) – в низах верхнего (12–15 км), среднего (29–33 км) и нижнего (40–48 км) слоев консолидированной коры, а в разрезе Скифской плиты (профиль 4) – в низах верхнего (15–18 км) и нижнего (33–37 км) слоев консолидированной коры. Градиент увеличения обобщенной прочности по закону Кулона–Биерли во всех интервалах разреза возрастает с глубиной.

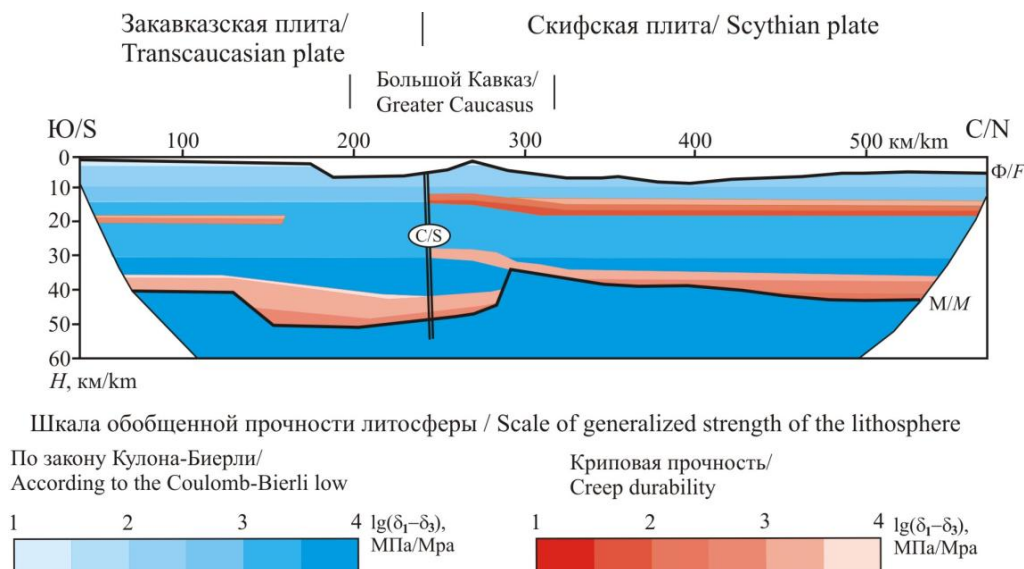


Рис. 3. Разрез реологической стратификации литосферы Центрального сегмента по профилю ГСЗ Степное-Бакуриани. С – Сването-Алазанский межплитный разлом [Стогний, Стогний, 2023]. Границы: Ф – комплексов осадочных пород и консолидированной коры, М – Мохоровичича /
Fig. 3. Section of the lithosphere rheological stratification of the Central segment along the DSS profile Stepnoe-Bakuriani. S – Svaneti-Alazani interplate fault [Stogny, Stogny, 2023]. Boundaries: F – of sedimentary rocks and consolidated crust complexes, M – Mohorovičić.

По результатам полученных реологических профилей обобщенной прочности литосферы (рис. 2) и с учетом строения земной коры и верхней мантии по профилю ГСЗ Степное-Бакуриани построен разрез (рис. 3) его реологической стратификации (модель D2). Исходя из предложенной модели, в процессе формирования чашеобразной структуры нижней части консолидированной коры (до глубины более 50 км) Центрального сегмента Большого Кавказа приток вещества/энергии происходил, вероятно, с юга, со стороны Закавказской плиты, а в пределах среднего и верхнего слоев консолидированной коры – с севера, со стороны Скифской плиты, для которых основным «упором» мог служить Сването-Алазанский межплитный разлом, разграничивающий блоки с различными реологическими свойствами (по их обобщенной прочности). Для верхнего подвижного слоя (криповое состояние) северной части Закавказской плиты таким «упором» мог служить высокоплотный ($V_p = 7.1-7.3$ км/с) блок в ее верхних горизонтах.

Верхний осадочный слой земной коры (на рис. 3 не раскрашен) реологически наиболее подвижен (при соответствующих полях тектонических напряжений), именно в его пределах формируются складчато-надвиговые структуры. Однако его изучение на реологической основе и согласование со скоростью и направлениями движения отдельных пунктов GPS [Лукк, Шевченко, 2019; Reilinger et al., 2006] возможно только при проведении крупномасштабных специализированных работ на отдельных участках.

Предложенная модель реологической стратификации литосферы по профилю Степное-Бакуриани позволяет с новых позиций подойти к рассмотрению глубинного строения Центрального сегмента Большого Кавказа.

Основные черты строения земной коры Центрального сегмента

Рассмотренный в предыдущем разделе сейсмический разрез земной коры по профилю Степное–Бакуриани (рис. 2а) характеризует глубинное строение восточной части Центрального сегмента. Основные черты строения земной коры Осевой мегазоны и северного крыла Центрального сегмента мегантиклинория анализируются по опубликованным материалам МОВЗ и ГМТЗ, отработанным по профилям Приэльбрусский, Чегемский и Геналдонский (рис. 1).

Согласно геолого-геофизическому разрезу по линии Приэльбрусского профиля (вулкан Эльбрус – Минеральные воды), приведенному в [Шемпелев и др., 2020], мощность земной коры Осевой мегазоны достигает 63 км, а северного крыла мегантиклинория – 50 км. На данном разрезе показан фрагмент Главного Кавказского надвига северного падения, разделяющего Скифскую и Закавказскую плиты. Мощность верхнего гранито-гнейсового слоя консолидированной коры, как и нижнего базитового, не превышает 25 км. В материалах ГМТЗ Осевая мегазона проявляется высокоомным блоком.

Линия Чегемского профиля пересекает выходы раннедокембрийских метаморфических пород и палеозойских гранитов Осевой мегазоны (на отрезке 0–30 км), мезозой-кайнозойских осадочных пород северного крыла (30–65 км) мегантиклинория Большого Кавказа и севернее – четвертичных отложений Скифской плиты (рис. 4а). Северный отрезок профиля проходит в 30–50 км восточнее Ставропольского поднятия.

На разрез МОВЗ [Шемпелев и др., 2017] вынесены элементы корреляции амплитуд положительных фаз обменных PS-волн (рис. 4б). Материалы МОВЗ отражают тектоническую расслоенность разреза, где наиболее ярко выраженные границы проявляются коррелируемыми фрагментами больших амплитуд положительных фаз обменных PS-волн. По этому признаку в разрезе выделены три блока: с высокой, средней и нормальной расслоенностью.

Для блока 1, соответствующего Осевой мегазоне Центрального сегмента (рис. 4б), характерна высокая насыщенность больших амплитуд положительных фаз обменных PS-волн станций МОВЗ и субпараллельная коррелируемость их фрагментов, которые до глубины 40 км имеют отчетливо выраженное южное падение, на глубине около 40 км – субгоризонтальное, а с этой глубины и до 60 км – северное. Такой вид расслоенности консолидированной коры отвечает модели формирования Осевой мегазоны, предложенной Л.М. Расцветаевым [Большой Кавказ..., 2007].

Блок 2 разреза проявляется высокой насыщенностью площадок малых амплитуд положительных фаз обменных PS-волн станций МОВЗ с их слабо коррелируемыми фрагментами (рис. 4б), что по нашему мнению отражает разную подвижность слоев консолидированной коры при формировании северного крыла мегантиклинория в коллизионную стадию.

Блок 3 разреза земной коры Скифской плиты имеет следующие особенности: в верхней части разреза хорошо коррелируемые границы больших амплитуд положительных фаз обменных PS-волн станций МОВЗ, идентифицируемые как граница осадочного чехла, граница K_1 подошвы верхней части консолидированной коры, а также идентифицированные границы подошвы средней коры K_2 , Мохоровичича M и верхней мантии M_1 .

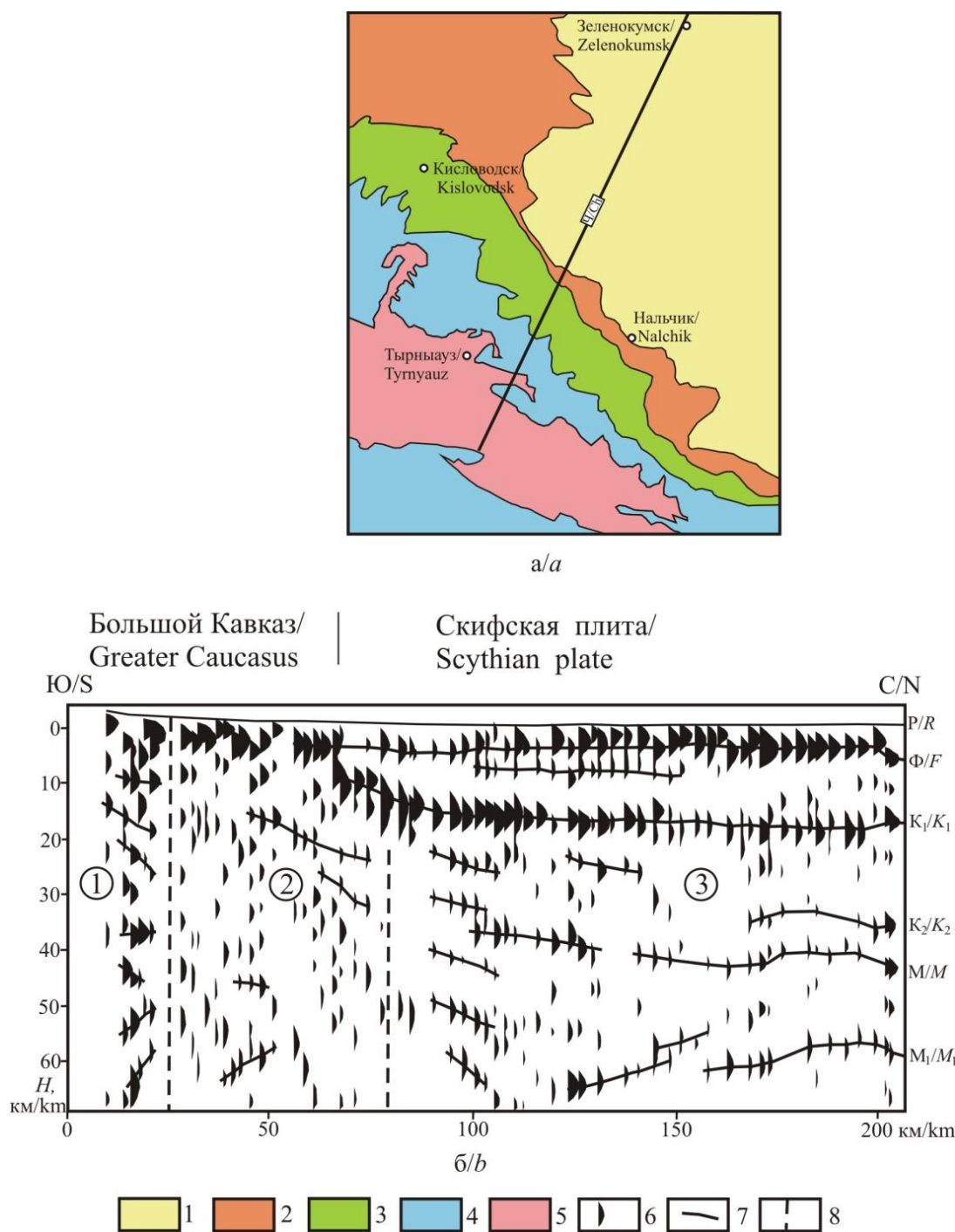


Рис. 4. Схема геологического строения района исследования (а) (по «Геологическая карта Кавказа. Масштаб 1:500 000 / Гл. редактор Д.В. Наливкин. М.: Аэрогеология, – 1978» с упрощением) и модель раслоенности земной коры по материалам МОВЗ (б).

1 – четвертичные отложения; 2–4 – осадочные породы: 2 – палеоген-неогеновые, 3 – меловые, 4 – юрские; 5 – раннедокембрийские метаморфические породы и палеозойские граниты; 6 – амплитуды положительных фаз обменных PS-волн [Шемпелев и др., 2017]; 7 – оси корреляции положительных фаз обменных PS-волн (идентифицированные границы: Ф – кристаллического фундамента, K₁ и K₂ – соответственно верхней и нижней границы средней консолидированной коры, М – Мохоровичича, М₁ – сейсмическая граница верхней мантии); 8 – блоки (1–3 в кружочках) консолидированной коры с различной степенью тектонической раслоенности: 1 – высокой, 2 – средней, 3 – нормальной; Р – линия рельефа /

Fig. 4. Scheme of the geological structure of the study area (a) (according to «Geological map of the Caucasus. Scale 1:500 000. Ch. ed. D.V. Nalivkin. Moscow. Aerogeology. 1978» with simplification) and model of the earth's crust layering based on the materials of the Earthquake Converted-Wave Method (ECWM) (b). 1 – Quaternary sediments; 2–4 – sedimentary rocks: 2 – Paleogene-Neogene, 3 – Cretaceous, 4 – Jurassic; 5 – Early Precambrian metamorphic rocks and Paleozoic granites; 6 – amplitudes of positive phases of converted PS-waves [Shempelev et al., 2017]; 7 – correlation axes of positive phases of converted PS-waves (identified boundaries: F - crystalline basement, K₁ and K₂ - upper and lower boundaries of the middle consolidated crust, respectively, M - Mohorovičić, M₁ - seismic boundary of the upper mantle); 8 – blocks (1–3 in circles) of consolidated crust with varying degrees of tectonic layering: 1 – high, 2 – medium, 3 – normal; R – relief line.

Аналогичные особенности разреза прослеживаются в материалах профиля МОВЗ Ейск-Ставрополь-Каспийское море [Егоркин и др., 2007], пересекающего Чегемский профиль в районе г. Буденновск. Мощность земной коры Скифской плиты по данному профилю не превышает 43 км, граница М₁ прослежена на глубине 46–48 км, а границы К₁ и К₂ соответственно на глубинах 15–22 км и 30–32 км.

Осевая мегазона в разрезе Чегемского профиля по данным ГМТЗ выделяется высокоомным блоком с кажущимися сопротивлениями в пределах до $n \cdot 10^2$ – $n \cdot 10^3$ Ом·м с подошвой на глубине 50 км.

Максимальная мощность земной коры Осевой мегазоны по Геналдонскому профилю (северный склон г. Казбек–Осетинская впадина Терско-Каспийского прогиба) оценивается в 49 км за счет предполагаемого удвоения толщины базитового слоя [Шемпелев, 2008]. В разрезе Геналдонского профиля по данным ГМТЗ Осевой мегазоны на глубине 7–40 км соответствует высокоомный блок.

Линия Терского профиля пересекает в северном направлении Агвали-Хивскую зону и зону Известнякового хребта Большого Кавказа. Мощность земной коры данных зон находится на уровне 45–50 км [Энна и др., 2021].

По материалам метода микросейсмического зондирования Осетинского профиля (Аргылах–Цхинвал) выделено два блока (глубинных объема) консолидированной коры: субвертикальный низкоскоростной, расположенный под северным крылом и осевой частью мегантиклинория Большого Кавказа, и высокоскоростной – под его южным крылом [Gorbatikov et al., 2015].

Таким образом, мощность земной коры Осевой мегазоны Центрального сегмента в юго-восточном направлении изменяется по материалам МОВЗ от 65 км (Приэльбрусский профиль) до 49 км (Чегемский профиль). Осевая мегазона в материалах ГМТЗ проявляется высокоомным коровым блоком. Это может быть как блок раннедокембрийской консолидированной коры, неизменный в процессе тектонической эволюции Большого Кавказа, так и испытывавший высокоградный метаморфизм в раннеальпийскую (киммерийскую) эпоху, что привело к уменьшению электропроводности пород.

Обсуждение результатов

Согласно принятым методологии и методике исследований рассчитаны профили обобщенной реологической прочности литосферы по профилю ГСЗ Степное–Бакуриани, на основе которых разработана модель реологической стратификации литосферы Центрального сегмента Большого Кавказа. Показано, что переход из хрупкого в пластичное состояние в разрезе Закавказской плиты происходит в низах верхнего (18–20 км) и нижнего (35–40 км) слоев консолидированной коры, в раз-

резу южного крыла мегантиклинория Большого Кавказа – только в нижнем слое земной коры (42–50 км), в Осевой мегазоне Большого Кавказа – в низах верхнего (12–15 км), среднего (29–33 км) и нижнего (40–48 км) слоев консолидированной коры, а в разрезе Скифской плиты – в низах верхнего (15–18 км) и нижнего (33–37 км) слоев.

В соответствии с представленной моделью реологической стратификации литосферы Центрального сегмента мегантиклинория процесс его формирования на коллизионной стадии проходил нелинейно. В пределах слоев пластического течения (крипа) формировались реологические ячейки с подтоком вещества/энергии в нижних, наиболее подвижных их горизонтах и движением в противоположном направлении после реологического «упора». В результате этого процесса на этапах наибольшей активности в пределах Осевой мегазоны были сформированы слои интенсивной расслоенности, отчетливо проявляющиеся максимальными коррелируемыми амплитудами фаз обменных PS-волн станций МОВЗ, перемежающиеся со слоями без ярко выраженной расслоенности, формировавшиеся в более длительные этапы нормальной и пониженной активности.

Данный механизм формирования земной коры ядра мегантиклинория Большого Кавказа, который реализовывался за счет высокой подвижности (крипового состояния) в низах верхнего и нижнего слоев консолидированной коры, являлся главным фактором увеличения его мощности (на 10–20 км) по сравнению с мощностью земной коры Закавказской и Скифской плит.

Выводы

Разработана двухмерная (D2) модель реологической стратификации Центрального сегмента Большого Кавказа, базирующаяся на материалах профиля ГСЗ Степное–Бакуриани. В слоях консолидированной коры Закавказской плиты, Большого Кавказа и Скифской плиты выделены интервалы перехода из хрупкого в пластичное состояние.

Показано, что процесс формирования Центрального сегмента на коллизионной стадии проходил нелинейно. На этапах наибольшей активности в Осевой мегазоне возникли слои интенсивной расслоенности, отчетливо проявляющиеся максимальными коррелируемыми амплитудами фаз обменных PS-волн. В слоях пластического течения (крипа) формировались реологические ячейки с подтоком вещества/энергии в нижних, наиболее подвижных их горизонтах и движением в противоположном направлении после реологического «упора».

Согласно предложенной модели, формирование нижней части земной коры Центрального сегмента происходило за счет реологически более подвижных горизонтов Закавказской плиты, а его Осевой мегазоны – за счет более подвижных горизонтов верхней части Скифской плиты, для которых реологически более «жесткие» структуры Закавказской плиты являлись упором.

Литература

1. Белов А.А., Буртман В.С., Зенкевич В.П. и др. Тектоническая расслоенность литосферы и региональные геологические исследования / Отв. ред. Ю.М. Пушаровский, В.Г. Трифонов. М.: Наука, – 1990. 293 с.
2. Большой Кавказ в альпийскую эпоху / Под ред. Ю.Г. Леонова. – М.: ГЕОС, – 2007. 368 с.

3. Глазнев В.Н. Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии. – Апатиты: ЗАО «КазМ», – 2003. 252 с.
4. Гонгадзе С.А. Глубинное строение Большого Кавказа на основе геофизических данных по новым технологиям. Ч. 1. Гравиметрия, магнитометрия, локальная сейсмотомография и микросейсмозондирование. // Геофизический журнал. – 2016. – Т. 38. № 3. – С. 145–154.
5. Гонгадзе С.А., Челидзе Т.Л., Миндели П.Ш., Глонти Н.Я., Кирия Д.К., Яволовская О.В. Основные сечения земной коры и верхней мантии Большого Кавказа по новым технологиям. 2. Сейсмотомография по профилям глубинного сейсмического зондирования. // Геофизический журнал. – 2016. – Т. 38. № 4. – С. 100–112.
6. Егоркин А.В., Золотов Е.Е., Недядько В.В., Ракитов В.А. Региональные особенности глубинного строения Предкавказья по данным профиля МОВЗ Ейск-Ставрополь-Каспийское море. // Геофизика. – 2007. – № 5. – С. 22–25.
7. Лукк А.А., Шевченко В.И. Сейсмичность, тектоника и GPS-геодинамика Кавказа. // Физика Земли. – 2019. – № 4. – С. 99–123.
8. 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.
9. 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.
10. Стогний В.В., Стогний Г.А. Реологические модели в сейсмологических исследованиях Северо-Западного Кавказа. // Коллективная монография: Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. – 2017. Т. VII. Ч. 2. – М.: ИИЕТ РАН. – С. 173–180.
11. Стогний В.В., Стогний Г.А. Физика Земли: Учеб. пособие. – Якутск: Изд-во ЯГУ, – 2000. 190 с.
12. 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.
13. Шемпелев А.Г., Заалишвили В.Б., Чотчаев Х.О., Шамановская С.П., Рогожин Е.А. Тектоническая раздробленность и геодинамический режим вулканов Эльбрус и Казбек (Центральный Кавказ, Россия): результаты глубинных геофизических исследований. // Геотектоника. – 2020. – № 5. – С. 55–69. DOI: 10.31857/S0016853X20050082.
14. Шемпелев А.Г., Чотчаев Х.О., Кухмазов С.У. Данные глубинных геофизических исследований вдоль Чегемского профиля (Центральный блок, Большой Кавказ). // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – № 2. – С. 129–134. DOI: 10.23671/VNC.2017.2.9497.
15. Шемпелев А.Г. Результаты глубинных геофизических исследований вдоль Геналдонского профиля. // Коллективная монография: Опасные природные и техногенные процессы на горных и предгорных территориях Северного Кавказа. Владикавказ: ГФИ ВНЦ РАН, – 2008. – С. 457–463.
16. Шенгелая Г.Ш. Гравитационная модель земной коры Кавказа. М.: Наука, – 1984. 128 с.
17. Энна Н.Л., Лаврищев В.А., Шишов В.С., Письменская Г.А. Основные результаты геологосъемочных работ в пределах листа К-38-Х (Грозный). // Коллективная монография: Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Т. XI. М.: ИИЕТ РАН, – 2021. – С. 162–171.
18. Cloetingh S., Spadini G., Van Wees J.D., Beekman F. Thermo-mechanical modelling of Black Sea Basin (de)formation. // *Sedimentary Geology*. – 2003. – Vol. 156. – pp. 169–184.
19. Gorbatikov A.V., Rogozhin E.A., Stepanova M.Y., Kharazova Y.V., Andreeva N.V., Perederin F.V., Dzeboev B.A., Zaalishvili V.B., Melkov 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.

20. Orug B., Ulutaf E., Pamukgu O., Haluk Selim H., Sonmez T. Rheological stratification and spatial variations in the effective elastic thickness of the lithosphere underneath the central Anatolian region, Turkey. // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2019. – Vol. 176. – pp. 1–7.

21. Ranalli G. *Rheology of the Earth*. London. Allen and Unwin, – 1987. 336 p.

22. Ranalli G., Murphy D.C. Rheological stratification of the lithosphere. // *Tectonophysics*. – 1987. – Vol. 132. – pp. 281–295.

23. Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S. 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.

References

1. Belov A.A., Burtman V.S., Zenkevich V.P. et al. Tectonic layering of the lithosphere and regional geological studies. Rep. eds. Yu.M. Pushcharovsky, V.G. Trifonov. Moscow. Nauka. 1990. 293 p. (in Russ.)

2. *Alpine History of the Great Caucasus*. Ed. Yu.G. Leonov. Moscow. GEOS. 2007. 368 p. (in Russ.)

3. Glaznev V.N. Complex geophysical models of the Fennoscandia lithosphere. Apatity. ZAO KaeM. 2003. 252 p. (in Russ.)

4. Ghonghadze S.A. The deep structure of the Greater Caucasus on the basis of geophysical data according to new technologies. 1. Gravimetry, magnetometry, local seismic tomography and micro seismic sounding. *Geophysical journal*. 2016. Vol. 38. No. 3. pp. 145–154. (in Russ.)

5. Ghonghadze S.A., Chelidze T.L., Mindeli P.Sh., Ghlonti N.I., Kiria J.K., Yavolovskaya O.N. Main sections of the Earth crust and upper mantle of the Greater Caucasus by new technologies. 2. Deep seismic sounding, micro seismic sounding. *Geophysical journal*. 2016. Vol. 38. No. 4. pp. 100–112. (in Russ.)

6. Egorkin A.V., Zolotov E.E., Nedyadko V.V., Rakitov V.A. Regional features of the Ciscaucasia deep structure according to the profile data MOVZ Eysk-Stavropol-Caspian Sea. *Geophysics*. 2007. No. 5 pp. 22–25. (in Russ.)

7. 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.)

8. 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.)

9. Rogozhin E.A., Gorbatikov A.V., Stepanova M.Yu., Ovsyuchenko A.N., Andreeva N.V., Kharazova Yu.V. Structure and modern geodynamics of the meganticlinorium of the Greater Caucasus in the light of new data on the deep structure. *Geotectonics*. 2015. No. 2. pp. 36–49. (in Russ.)

10. Stogny V.V., Stogny G.A. *Physics of the Earth: Textbook*. Yakutsk. YSU Publishing House. 2000. 190 p. (in Russ.)

11. Stogny V.V., Stogny G.A. Rheological models in seismological studies of the North-West Caucasus. Collective monograph: Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus. Vol. VII. Part 2. Moscow. IIET RAS. 2017. pp. 173–180. (in Russ.)

12. 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.)

13. Shempelev A.G., Zaalishvili V.B., Chotchaev K.O., Shamanovskaya S.P., Rogozhin E.A. Tectonic fragmentation and geodynamic regime of Elbrus and Kazbek volcanoes (Central

Caucasus, Russia): results of the deep geophysical research. *Geotectonics*. 2020. No. 5. pp. 652–664. DOI: 10.31857/S0016853X20050082. (in Russ.)

14. Shempelev A.G., Chotchaev H.O., Khuhmazov S.U. Data of deep geophysical surveys along Chegem profile (Central block, Greater Caucasus). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2017. No. 2. pp. 129–134. DOI: 10.23671/VNC.2017.2.9497. (in Russ.)

15. Shempelev A.G. Results of deep geophysical research along the Genaldon profile. In: *Proc. Dang. natural and man-made processes in the mount. and foothill ter. of the North Caucasus*. Vladikavkaz. GPI VNS RAS. 2008. pp. 457–463. (in Russ.)

16. Shengelaya G.Sh. Gravity model of the Caucasus Earth's crust. Moscow. Nauka. 1984. 128 p. (in Russ.)

17. Enna N.L., Lavrishchev V.A., Shishov V.S., Pismenskaya G.A. Main results of geological survey work within the K-38-X map sheet (Grozny). In: *Proceedings Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus*. Vol. XI. Moscow. IIET RAS. 2021. pp. 162–171. (in Russ.)

18. Cloetingh S., Spadini G., Van Wees J.D., Beekman F. Thermo-mechanical modelling of Black Sea Basin (de)formation. *Sedimentary Geology*. 2003. Vol. 156. pp. 169–184.

19. Gorbatikov A.V., Rogozhin E.A., Stepanova M.Y., Kharazova Y.V., Andreeva N.V., Perederin F.V., Dzeboev B.A., Zaalishvili V.B., Melkov 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.

20. Orug B., Ulutaf E., Pamukgu O., Haluk Selim H., Sonmez T. Rheological stratification and spatial variations in the effective elastic thickness of the lithosphere underneath the central Anatolian region, Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2019. Vol. 176. pp. 1–7.

21. Ranalli G. *Rheology of the Earth*. London. Allen and Unwin. 1987. 336 p.

22. Ranalli G., Murphy D.C. Rheological stratification of the lithosphere. *Tectonophysics*. 1987. Vol. 132. pp. 281–295.

23. Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S. 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.