

УДК 550.34:551.1(082)

DOI: 10.46698/VNC.2026.94.56.001

Оригинальная статья

Реологическая стратификация земной коры Восточного сегмента Большого Кавказа по профилю ГСЗ Волгоград-Нахичевань

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

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

² Единая геофизическая служба РАН, Россия, 249035, г. Обнинск,
пр. Ленина, 189

Статья поступила: 14.03.2026; доработана: 20.05.2026; принята к публикации: 22.05.2026

Резюме: Актуальность работы. Реологический подход изучения земной коры является одним из эффективных инструментов при анализе как палеогеодинамики, так и современных геодинамических условий сейсмоактивных регионов, поэтому исследования этого направления актуальны. **Цель работы.** На основе имеющихся материалов глубинного строения Восточного сегмента мегантиклинория Большого Кавказа по региональному профилю ГСЗ Волгоград-Нахичевань разработать его реологическую модель и выполнить ее анализ с позиций палеогеодинамики и современной геодинамики. **Методы и методология исследования.** Методика построения реологической модели литосферы регионального профиля Волгоград-Нахичевань базировалась на выявлении реологических закономерностей отдельных профилей обобщенной прочности и их увязки в соответствии со структурными особенностями глубинного строения разреза. **Результаты работы.** Реологическая модель земной коры по региональному профилю ГСЗ Волгоград-Нахичевань послужила основой разработки геодинамики Осевой мегазоны Большого Кавказа и прилегающих территорий. Показано, что формирование структуры Осевой мегазоны Восточного сегмента Большого Кавказа происходило за счет подтока вещества/энергии Скифской плиты в южном направлении. Этот процесс способствовал компенсационному опусканию границы Мохоровичича (до 60 км) южного фланга Скифской плиты. Обоснована необходимость дальнейших реологических исследований механизма формирования тектонических напряжений на верхнемантийном уровне.

Ключевые слова: Большой Кавказ, Скифская плита, Закавказская плита, консолидированная кора, профиль обобщенной прочности литосферы.

Благодарности: Работа выполнена по госзаданию Геофизического института ВНЦ РАН, рег. № НИОКТР 125022803002-1.

Для цитирования: Стогний В.В., Стогний Г.А., Пономарева Н.Л. Реологическая стратификация земной коры Восточного сегмента Большого Кавказа по профилю ГСЗ Волгоград-Нахичевань. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(2): 8–19. DOI: 10.46698/VNC.2026.94.56.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.94.56.001

Original paper

Rheological stratification of the Earth's crust of the Eastern segment of the Greater Caucasus along the Volgograd-Nakhichevan DSS profile

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

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, 189 Lenina Ave., Obninsk 249035, Russian Federation

Received: 14.03.2026; revised: 20.05.2026, accepted: 22.05.2026

Abstract: Relevance. The rheological approach to studying the Earth's crust is an effective tool for analyzing seismically active regions both the paleogeodynamics and modern geodynamic conditions, making research in this area highly relevant. **Aim.** Based on available data on the deep structure of the Eastern segment of the Greater Caucasus along Volgograd-Nakhichevan regional profile, this study aims to develop a rheological model and analyze it from a paleogeodynamics and modern geodynamics perspective. **Research methods and methodology.** The methodology for constructing a rheological model of the lithosphere along the Volgograd-Nakhichevan regional profile was based on identifying rheological patterns of generalized strength profiles and linking them to the features of the deep structure section. **Results.** The rheological model of the Earth's crust along Volgograd-Nakhichevan regional profile was the basis for developing the geodynamics of the Greater Caucasus Axial Megazone and adjacent territories. It is shown that structure of the Eastern segment Axial Megazone Greater Caucasus was formed due to the matter/energy influx from Scythian Plate from the north. This process contributed to the compensatory subsidence of Mohorovichich (up to 60 km) boundary on the Scythian Plate southern flank. The need for further rheological research to develop a mechanism for the formation of tectonic stresses at the upper mantle level of the southern flank of the Scythian Plate is substantiated.

Keywords: Greater Caucasus, Scythian Plate, Transcaucasian Plate, consolidated crust, generalized lithospheric strength profile.

Acknowledgments: 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, No. 125022803002-1.

For citation: Stogny V.V., Stogny G.A., Ponomareva N.L. Rheological stratification of the Earth's crust of the Eastern segment of the Greater Caucasus along the VolgogradNakhichevan DSS profile. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(2): 8–19. DOI: 10.46698/VNC.2026.94.56.001

Введение

Профили ГСЗ Степное–Бакуриани и Волгоград–Нахичевань, пройденные в 1960-х гг. [Краснопевцева и др., 1967, 1970], содержат важный материал для изучения глубинного строения Большого Кавказа и прилегающих территорий. Переинтерпретация этих материалов с использованием различных программных комплексов и методологических подходов выполнена в работах [Павленкова, 2012; Гонгадзе, 2016; Гонгадзе и др., 2016]. Профиль ГСЗ Степное–Бакуриани пересекает восточную часть Центрального сегмента Большого Кавказа в направлении С-СВ–Ю–ЮЗ, а профиль ГСЗ Волгоград–Нахичевань в субмеридиональном направлении – западную часть

Восточного сегмента. Модель реологической стратификации литосферы по профилю Степное–Бакуриани представлена в [Стогний, Стогний, 2024].

Структура Закавказской и Скифской плит, представленная Спитакским профилем ГСЗ Малого Кавказа и профилями ГСЗ Степное–Бакуриани и Волгоград–Нахичевань Большого Кавказа, охарактеризована методом лучевого моделирования по наблюдаемым годографам *P*- и *S*-волн [Павленкова, 2019]. Отмечено, что земная кора Малого Кавказа имеет такую же мощность (50–55 км), что и кора Большого Кавказа (50–60 км), но отличается более выраженной скоростной неоднородностью, что свидетельствует о разной природе тектонических процессов их формирования.

По [Бубнов и др., 2025], петрологические модели *N-Q* магматизма Кавказского региона свидетельствуют в пользу подобия глубинным «астеносферно-плюмовым» геодинамическим обстановкам его становления на Большом и Малом Кавказе, магматические ассоциации которых являются субдукционно модифицированными (при мезозойских и возможно для Малого Кавказа палеогеновых субдукционных событиях).

В работе [Shempelev et al., 2020] предполагается, что вулканы Северного Кавказа Эльбрус и Казбек возникли в коллизионной обстановке, элементы субдукции не проявляются, а кинематика Главного Кавказского надвига соответствует структуре коллизионного сжатия.

Процесс формирования структуры коллизионного орогена Большого Кавказа отражен в многочисленных публикациях [Большой Кавказ..., 2007; Ершов и др., 2026; Лукк, Шевченко, 2019; Рогожин и др., 2015; Сенин и др., 2022; Phillip et al., 1989; Reilinger et al., 2006].

По [Большой Кавказ..., 2007], в Восточном сегменте Большого Кавказа в альпийский этап не происходило фундаментальной переработки земной коры. Граница M_1 верхней мантии является реликтом более древней подошвы земной коры [Трифонов и др., 2020], вышележащие слои над которой были метаморфически уплотнены до мантийных значений.

Северные тектонические зоны испытали несколько фаз киммерийской эпохи деформаций [Трифонов, 2016]. На Кавказе они начались в позднем байосе, продолжались в бате и достигли максимума перед келловеем. В пределах Центрального Кавказа интенсивные деформации привели к поднятию и выходу на поверхность герцинского фундамента. На Восточном Кавказе, несмотря на интенсивные киммерийские деформации, степень размыва оказалась меньше и отразилась угловым несогласием в основании вышележащих толщ. Ускорение поднятия Центрального сегмента в плиоцен-четвертичное время может быть обусловлено проникновением под него потока разуплотненной и разогретой мантии Африканского (Эфиопско-Афарского) суперплюма [Трифонов, 2026]. Четвертичный подъем Восточного Кавказа происходил быстрее, чем Центрального Кавказа и составил ~60 % от общего поднятия, тогда как на Центральном Кавказе он не превышал 50 %.

Геологическое строение Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа существенно различается. Большая часть площади Осевой мегазоны мегантиклинория Большого Кавказа в пределах горст-антиклинория Восточного сегмента сложена ниже- и среднеюрскими отложениями, выходы метаморфических пород фундамента и магматических комплексов практически отсутствуют.

Цель проведенных исследований заключалась в разработке модели реологической стратификации литосферы по региональному профилю ГСЗ Волгоград–Нахичевань и оценке влияния реологических условий на палеогеодинамические процессы формирования главных структурных особенностей земной коры в полосе данного профиля и современных геодинамических процессов, отражающихся в закономерностях сейсмичности региона.

Материалы и методика исследований

Реологические исследования структуры сейсмоактивных регионов являются одним из актуальных направлений геолого-геофизических исследований и применяются в различных регионах мира [Katayama et al., 2022; Orug et al., 2019].

Основой разработки модели реологической стратификации земной коры Восточного сегмента Большого Кавказа и прилегающих районов северного фланга Закавказской плиты и южного фланга Скифской плиты послужил скоростной разрез профиля ГСЗ Волгоград-Нахичевань в интерпретации Н.И. Павленковой [2012]. Положение профиля дано на схеме строения консолидированной коры Центрального Кавказа (рис. 1).

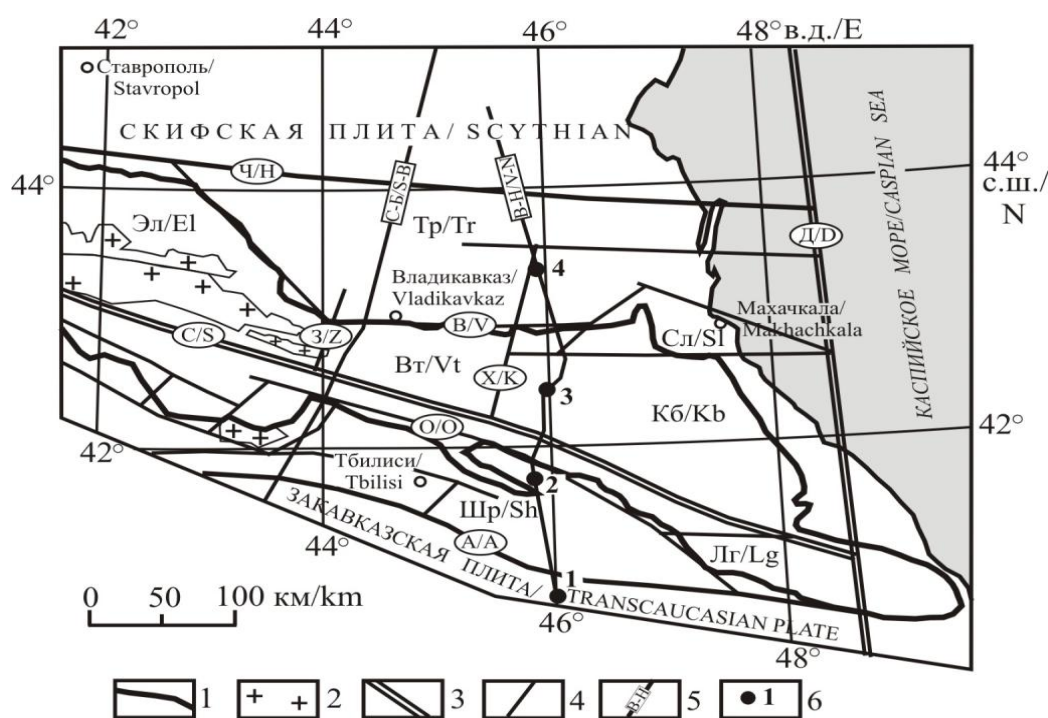


Рис. 1. Положение профиля ГСЗ Волгоград-Нахичевань и расчетных профилей обобщенной прочности литосферы Большого Кавказа на схеме консолидированной коры по [Стогний, Стогний, 2023].

1 – границы мегантиклинория Большого Кавказа; 2 – выходы кристаллических пород Центрального сегмента и Дзирульского массива; 3 – межплитные разломы: Д – Дербент-Ленкоранский, С – Сването-Алазанский; 4 – межблоковые разломы: Ч – Черкесско-Кизлярский, А – Аджаро-Мингечаурский, В – Владикавказский, О – Онийский, З – Згитский, Х – Халкилойский; 5 – геофизические профили ГСЗ: С-Б – Степное-Бакуриани, В-Н – Волгоград-Нахичевань; 6 – расчетные профили обобщенной прочности литосферы и их номера. Блоки консолидированной коры: Эл – Эльбрусский, Кб – Кубачинский, Тр – Терский, Шр – Ширакский, Вм – Верхнетерский, Лг – Лагинский, Сл – Сулакский /

Fig. 1. The position of the Volgograd-Nakhichevan DSS profile and Greater Caucasus lithosphere generalized strength profiles on the consolidated crust scheme according to [Stogny, Stogny, 2023].

1 – Greater Caucasus meganticlinorium boundaries; 2 – outcrops crystalline rocks of the Central segment and Dzirul massif; 3 – interplate faults: D – Derbent-Lenkoransky, S – Svaneto-Alazansky; 4 – interblock faults: Ch – Cherkessko-Kizlyarsky, A – Adzharo-Mingechaursky, V – Vladikavkazsky, O – Oniysky, Z – Zgitsky, Kh – Khalkiloysky; 5 – deep seismic sounding geophysical profiles: S-B – Steptoe-Bakuriany, V-N – Volgograd-Nakhichevan; 6 – generalized strength of lithosphere profiles calculated and their numbers. Blocks of consolidated crust: El – Elbrusky, Kb – Kubachinsky, Tr – Tersky, Shr – Shiraksky, Vt – Verkhnetersky, LG – Laginsky, Sl – Sulaksky /

Для этого регионального профиля, как и при исследовании реологической стратификации земной коры по профилю Степное–Бакуриани [Стогний, Стогний, 2024], выбраны четыре точки расчетных профилей обобщенной прочности литосферы. Местоположение точек (в скобках – их координаты в км) показано на рисунке 2а: 1(120), 2(250), 3(350), 4(440).

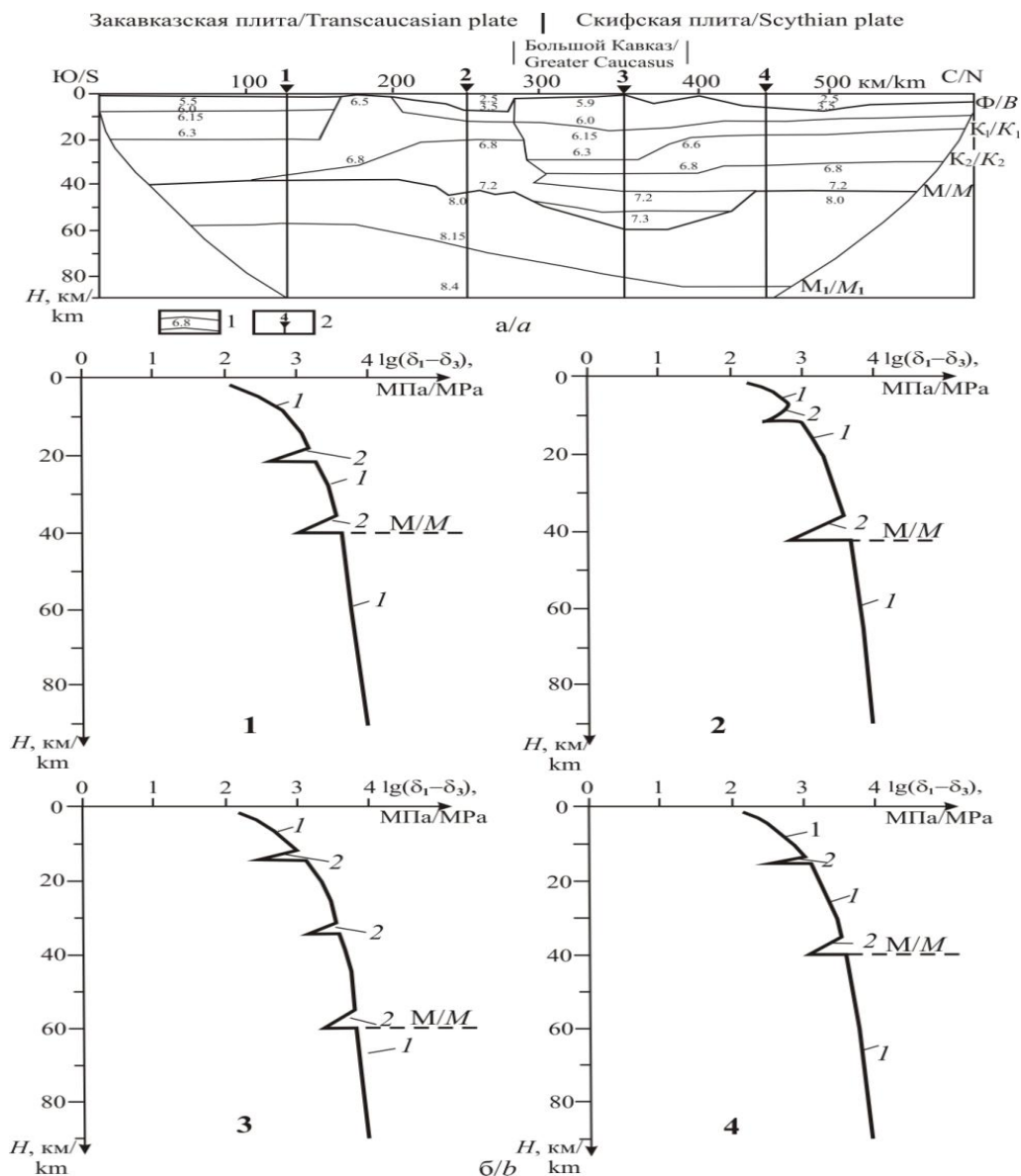


Рис. 2. Скоростной разрез земной коры Восточного сегмента Большого Кавказа по профилю ГСЗ Волгоград–Нахичевань [Павленкова, 2012] (а) и реологические профили обобщенной прочности литосферы (б).

(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: Φ – кристаллического фундамента; K_1 , K_2 – консолидированной коры, M – Мохоровичича, M_1 – верхней мантии. (б): кривые обобщенной прочности литосферы (1–4): 1 – при хрупком разрушении, 2 – «криповая» прочность. M – граница Мохоровичича /

Fig. 2. Velocity section of the Earth's crust in the Greater Caucasus Eastern segment along Volgograd–Nakhichevan profile DSS [Pavlenkova, 2012] (a) and profiles of the generalized strength lithosphere (b).

(a): 1 – boundaries of layers with different seismic velocities, numbers – wave longitudinal velocities, km/s; 2 – generalized strength lithosphere profiles and numbers their (1–4).

Boundaries: F – crystalline basement; K_1 , K_2 – consolidated crust, M – Mohorovičić, M_1 – upper mantle. (b): generalized strength lithosphere curves (1–4): 1 – for brittle failure, 2 – “creep” strength M – Mohorovičić boundary

Согласно скоростному разрезу по профилю ГСЗ в точке 1 мощность земной коры составляет 40 км, в ее верхней части (до 20 км) скорость продольных волн V_p (в км/с) изменяется от 5.5 до 6.3, а в нижней – преимущественно в пределах скоростей среднего слоя ($V_p=6.3-6.8$). В точке 2 верхняя часть разреза представлена осадочными отложениями межгорной впадины (до 7 км, $V_p=2.5-3.5$), а нижняя часть консолидированной коры (20–40 км) имеет скорости, характерные для нижнего слоя ($V_p=6.8-7.2$). В точке 3 Осевого мегазоны Большого Кавказа разрез более дифференцирован, верхняя часть консолидированной коры (до границы K_1 на глубине 30 км) имеет $V_p=5.9-6.3$, средняя с границами K_1 и K_2 – $V_p=6.6-6.8$, а нижняя, с глубиной от 35 до 60 км, представлена тремя слоями с $V_p=6.8-7.2$. В верхней части разреза точки 4 (до глубины 10 км) распространены осадочные отложения Терско-Каспийского прогиба с $V_p=2.5-3.5$, а консолидированная кора представлена типичным трехслойным разрезом с глубиной подошвы 40 км. Глубина границы M_1 верхней мантии с контрастом скоростей от 8.15 до 8.4 км/с в пределах профиля увеличивается с юга на север от 60 до 80 км.

Методика реологических исследований, разработанная Г. Раналли [Ranalli, 1987; Ranalli, Murphy, 1987] и нашедшая применение в обосновании моделей тектонической расслоенности литосферы [Белов и др., 1990], базируется на сопоставлении значений разности максимальных и минимальных сжимающих напряжений, рассчитанных при хрупком разрушении согласно закону Кулона-Биерли и криповой прочности, и обосновании типа разрушения и подвижки на соответствующих интервалах профиля обобщенной прочности литосферы (одномерный вариант D_I). Вместе с тем, методика таких расчетов в различных регионах и при различных подходах может меняться, что требует дополнительных пояснений.

Для закона сухого трения Кулона-Биерли логарифм разности максимального и минимального сжимающих напряжений $\lg(\delta_1 - \delta_3)_i$ каждого i -го интервала m -слояного разреза определяется уравнением:

$$\lg(\delta_1 - \delta_3)_i \geq \beta \cdot \sum_{z=0}^{z_{\max}} \rho_{ij} \cdot \Delta z_i \cdot g, \quad (1)$$

где β – параметр, зависящий от типа разрушения и подвижки (при расчетах для всех слоев принят равным 3,0 – надвиг); z – текущий параметр глубины; ρ_{ij} – плотность (в кг/м³) i -го интервала j -го слоя разреза ($j=1 \dots m$) и Δz_i – мощность i -го интервала разреза (результат вычислений относится к подошве каждого i -го интервала); g – среднее значение силы тяжести (при расчётах принято равным 9,8 м/с²); $z_{\max}$ – предельная глубина исследований (принята равной 90 км в соответствии со скоростным разрезом рис. 2а).

Логарифм разности максимального и минимального сжимающих напряжений $\lg(\delta_1 - \delta_3)_i$ в каждой i -ой точке разреза для пластического режима деформирования в режиме установившейся ползучести (дислокационного крипа) определяется уравнением:

$$\lg(\delta_1 - \delta_3)_i = \left(\frac{U}{A_{ij}} \right)^{1/n_{ij}} \cdot \exp \left(\frac{E_{ij}}{n_{ij} \cdot R \cdot T(z_i)} \right), \quad (2)$$

где U – скорость деформации (принятое значение $U = 10^{-15}$ 1/с); R – газовая постоянная ($R = 8.31441$ Дж/моль·К); A_{ij} , E_{ij} , n_{ij} – материальные реологические константы i -го интервала j -го слоя разреза; $T(z_i)$ – температура Кельвина (z_i – текущий параметр глубины).

Значения плотности слоев структурно-вещественных комплексов земной коры и верхней мантии ρ_j (кг/м³) рассчитывались согласно корреляционной зависимости плотности ρ от скорости продольных волн V_p (км/с) для Центрального Кавказа [Шенгеля, 1984]. Реологические параметры A_j , E_j , n_j отдельных слоев выбирались по методике, принятой в [Стогний, Стогний, 2024]. Расчет температуры каждой точки

глубины z_i разреза выполнялся исходя из условия, что температура на поверхности Мохоровичича везде постоянна и соответствует 600 °С.

Профили 1–4 логарифма разности максимального и минимального сжимающих напряжений обобщенной прочности литосферы, полученные по принятой методике (рис. 2б), составили основу при разработке модели реологической стратификации профиля Волгоград-Нахичевань.

Результаты исследований и их обсуждение

Реологическая модель профиля Волгоград-Нахичевань, построенная на основе интерполяции и увязки профилей обобщенной прочности литосферы, приведена на рисунке 3. На разрез вынесены также гипоцентры землетрясений (с $M_s \geq 3.5$), зарегистрированные в полосе профиля $46 \pm 0.3^\circ$ в.д. за период 2011–2024 гг.

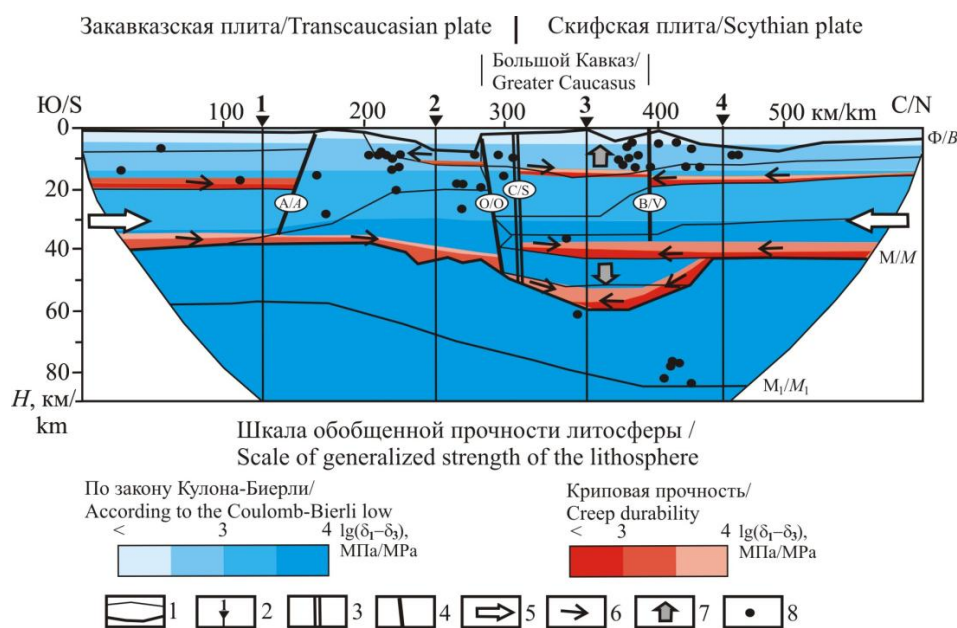


Рис. 3. Разрез реологической стратификации литосферы Восточного сегмента по профилю ГСЗ Волгоград-Нахичевань.

1 – границы слоев с разными сейсмическими скоростями [Павленкова, 2012]:

Ф – консолидированной коры, М – Мохоровичича, М₁ – верхней мантии; 2 – профили обобщенной прочности литосферы и их номера (1–4); 3 – межплитный разлом:

С – Сването-Алазанский; 4 – межблоковые разломы: А – Аджаро-Мингечаурский,

В – Владикавказский, О – Онийский; 5 – региональный тренд тектонических напряжений;

6 – направления движения вещества/энергии в горизонтах пластических течений (крипа);

7 – тренды орогенических движений Осевой мегазоны; 8 – гипоцентры землетрясений с $M_s \geq 3.5$

(по материалам ФИЦ ЕГС РАН по линии профиля Волгоград-Нахичевань /

Fig. 3. Lithosphere rheological stratification Eastern segment along the Volgograd-Nakhichevan DSS profile.

1 – different seismic velocities layers boundaries [Pavlenkova, 2012]: F – consolidated crust,

M – Mohorovičić, M₁ – upper mantle; 2 – curves of lithosphere generalized strength and their numbers

(1–4); 3 – interplate fault: S – Svaneto-Alazansky; 4 – interblock faults: A – Adzharo-Mingechaursky,

B – Vladikavkazsky, O – Oniysky; 5 – tectonic stress trend regional; 6 – matter/energy movement

directions in plastic flow horizons (creep); 7 – movement Axial Megazone orogenic trends; 8 – earthquake hypocenters with $M_s \geq 3.5$ (based on GS RAS data along the Volgograd-Nakhichevan DSS profile)

Региональный профиль ГСЗ Волгоград-Нахичевань пересекает южный фланг Скифской плиты и северный фланг Закавказской плиты, разделенные Сването-Алазанским разломом (рис. 1). Земная кора северного фланга Закавказской плиты содержит два слоя пластического (крипового) состояния. Реологическим упором для первого

слоя на глубине 18–20 км в низах верхней части земной коры в интервале профиля 0–150 км служит Аджаро-Мингечаурский разлом. Второй слой, приуроченный к границе Мохоровичича на глубине от 35 до 40–50 км, ограничен с севера реологическим упором Онийского разлома. На подошве верхнего слоя земной коры на глубине 8–10 км в интервале профиля 200–280 км локализован слой пластического состояния.

В интервале 390–600 км профиля южного фланга Скифской плиты содержится два слоя пластических течений (крипа). Верхний из них (16–18 км) локализован в низах верхнего слоя консолидированной земной коры с реологическим упором Владикавказского регионального разлома. Второй слой пластических течений приурочен к подошве земной коры (35–40 км).

В разрезе земной коры (интервал 310–390 км профиля) Скифской плиты выделено три слоя пластического (крипового) состояния на глубинах 12–15, 32–35 и 55–60 км, соответствующих подошве верхнего, среднего и нижнего слоев консолидированной коры. Южным реологическим упором для них служит межплитный Сването-Алазанский разлом со сменой направления пластического течения (крипа) с южного на северное. Наиболее активным, по-видимому, являлся слой на подошве земной коры, что обеспечило приращение его мощности (до 20 км) и формирование чашеобразной структуры нижней части Осевой мегазоны Большого Кавказа (глубиной 40–60 км по границе Мохоровичича). Одновременно происходило погружение структурно-вещественных комплексов в более плотные слои верхней мантии. Это вызвало «всплывание» комплексов Осевой мегазоны, создающих обратную нагрузку. Таким образом, процессы наращивания мощности земной коры, с одной стороны, и поверхностной эрозии (в соответствии с вещественным и структурно-тектоническим строением ВЧР), с другой стороны, обеспечивают некоторое динамическое равновесие этой системы (в геологическом масштабе времени).

Изучение структурно-надвиговых комплексов осадочных пород мегантиклинория Большого Кавказа на реологической основе возможно только при проведении специализированных исследований и в настоящей статье не рассматривается.

Современные геодинамические процессы находят отражение в закономерностях сейсмичности данного региона.

В пределах южного фланга Закавказской плиты тектонические напряжения, создаваемые слоем крипового состояния в подошве верхнего слоя консолидированной коры (интервал 0–150 км профиля), на реологическом упоре Ширакского блока, южным ограничением которого является Аджаро-Мингечаурский разлом, проявляются отдельными гипоцентрами землетрясений. Южнее разлома, в комплексах высокоплотных пород, напряженно-деформированное состояние также проявляется единичными очагами землетрясений. Сейсмическая активность отмечается в высокоплотных комплексах пород (интервал 200–230 км профиля), граничащих с относительно низкоплотным слоем, расположенным южнее. По-видимому, тектонические напряжения в этой части профиля возникали в результате действий в направлении север–юг, со стороны Онийского разлома, компенсируясь на реологическом упоре высокоплотных пород. При этом тектонические напряжения передаются через верхний слой консолидированной коры, в подошве которого расположен пластичный слой (интервал 200–280 км профиля).

Высокой сейсмической активностью проявляется зона Онийского разлома – реологического упора тектонических напряжений северного тренда, южным ограничением которой является реологический упор Сването-Алазанского межплитного разлома.

На южном фланге Скифской плиты сейсмической активностью проявляется зона Владикавказского разлома (интервал 370–440 км профиля), который представляет собой реологический упор для тектонических напряжений южного тренда, создаваемых при напоре пластичного слоя в подошве верхнего слоя консолидированной коры. В северной части Осевой мегазоны единичные гипоцентры зарегистрированы

в низах среднего слоя и в зоне подошвы земной коры, что также может свидетельствовать об их геодинамической активности при формировании структуры. В интервале профиля 370–440 км зарегистрированы землетрясения на глубине 70–80 км, приуроченные к границе M_1 верхней мантии.

В зонах разломов происходит смена реологических свойств, что способствует накоплению тектонических напряжений и их разрядке в виде землетрясений [Николаевский, Шаров, 1985]. В области Сването-Алазанского разлома можно отметить Кахетинское (Грузино-Дагестанское) землетрясение 17.09.2013 г. с $M=5.5$ и глубиной гипоцентра 15 км, которое возникло под действием напряжений сжатия, ориентированных в субмеридиональном направлении, и напряжений растяжения, ориентированных в субширотном направлении, тип движения – правосторонний сдвиг с компонентами взброса [Етирмишли и др., 2019]. Возможная природа верхнемантийных землетрясений Терско-Каспийского прогиба рассмотрена в [Стогний, Стогний, 2025]. Для реологического обоснования верхнемантийной геодинамики, отражающей соответствующей сейсмичностью, необходимы специальные исследования.

Анализ модели реологической стратификации земной коры профиля Волгоград-Нахичевань и расположенного к западу от него профиля Степное-Бакуриани позволяет отметить следующее. В разрезе профиля Степное-Бакуриани формирование структуры Осевой мегазоны происходило преимущественно за счет подтока вещества/энергии Закавказской плиты в северном направлении, а профиля Волгоград-Нахичевань – Скифской плиты в южном направлении. То есть, реологические условия являлись определяющими при формировании структуры земной коры мегантиклинория Большого Кавказа и прилегающих территорий.

Проведенные исследования реологического строения регионального профиля ГСЗ Волгоград-Нахичевань позволяют сформулировать следующие выводы.

Выводы

1. Предложена модель реологической стратификации литосферы по профилю ГСЗ Волгоград-Нахичевань, на основе которой проведен анализ реологической подвижности слоев земной коры при становлении Восточного сегмента Большого Кавказа.
2. Показано, что на коллизионном этапе формирования структуры Восточного сегмента Большого Кавказа и прилегающих территорий определяющим условием являлась реологическая стратификация земной коры.
3. В геодинамической обстановке «жесткой» коллизии Скифской и Закавказской плит в пределах Восточного сегмента преобладал подток вещества/энергии Скифской плиты в южном направлении, с формированием структуры Осевой мегазоны.
4. Проведен анализ современной сейсмичности западной части Восточного сегмента Большого Кавказа с учетом предложенной модели реологической стратификации земной коры регионального профиля Волгоград-Нахичевань.

Литература

1. Белов А.А., Буртман В.С., Зенкевич В.П. и др. Тектоническая расслоенность литосферы и региональные геологические исследования / Отв. ред. Ю.М. Пуцаровский, 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. Бубнов С.Н., Кондрашов И.А., Гольцман Ю.Г., Олейникова Т.И. Основные черты обогащенного литосферного источника неоген-четвертичного магматизма Кавказа // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Т. XV. М: ИИЕТ РАН, 2025. – С. 240–248.
4. Гонгадзе С.А. Глубинное строение Большого Кавказа на основе геофизических данных по новым технологиям. Ч. 1. Гравиметрия, магнитометрия, локальная сейсмо-

мография и микросейсмозондирование // Геофизический журнал. – 2016. – Т. 38. № 3. – С. 145–154.

5. Гонгадзе С.А., Челидзе Т.Л., Миндели П.Ш., Глonti Н.Я., Кирия Д.К., Явловская О.В. Основные сечения земной коры и верхней мантии Большого Кавказа по новым технологиям. Ч. 2. Сейсмотомография по профилям глубинного сейсмического зондирования // Геофизический журнал. – 2016. – Т. 38. № 4. – С. 100–112.

6. Ершов А.В. Коротаев М.В., Никитин М.Ю. Модель воздымания и эрозии Восточного Кавказа на неотектоническом этапе // Тектоника и геодинамика Земной коры и мантии: фундаментальные проблемы – 2026. Материалы LVII Тектонического совещания. М: ГЕОС, 2026. – С. 172–176.

7. Етирмишли Г.Д., Маммадли Т.Я., Рогожин Е.А., Сысолин А.И. Сейсмическая активизация восточной части южного склона Большого Кавказа в конце XX – начале XXI в. // Геофизические процессы и биосфера. – 2019. – Т. 18. – С. 15–29.

8. Краснопевцева Г.В., Матушкин Б.А., Попов Е.А. Геофизические исследования на региональном профиле Волгоград–Нахичевань // Известия Академии наук СССР. Серия геологическая. – 1967. – № 12. – С. 43–51.

9. Краснопевцева Г.В., Матушкин Б.А., Шевченко В.И. Новая интерпретация данных ГСЗ по профилю Степное–Бакуриани на Кавказе // Советская геология. – 1970. – № 8. – С. 113–120.

10. Лукк А.А., Шевченко В.И. Сейсмичность, тектоника и GPS-геодинамика Кавказа // Физика Земли. – 2019. – № 4. – С. 99–123.

11. Николаевский В.Н., Шаров В.И. Разломы и реологическая расслоенность земной коры // Физика Земли. – 1985. – № 1. – С. 16–28.

12. 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.

13. Павленкова Г.А. Структура земной коры Малого Кавказа по данным глубинного сейсмического зондирования // Геофизические исследования. – 2019. – Т. 20. № 1. – С. 65–79.

14. Рогожин Е.А., Горбатилов 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.

15. Сенин В.В., Керимов В.Ю., Мустаев Р.Н., Леончик М.И. Структурно-геодинамические системы фундамента Черноморско-Каспийского региона и их эволюция в позднем палеозое–кайнозое // Геотектоника. – 2022. – № 1 – С. 27–50.

16. Стогний В.В., Стогний Г.А. Глубинное строение и реологическая стратификация земной коры Центрального сегмента Большого Кавказа // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 6–20. DOI: 10.46699/VNC.2024.37.52.001.

17. Стогний Г.А., Стогний В.В. Верхнемантийные землетрясения Терско-Каспийского прогиба Крымско-Кавказского сейсмического пояса: геолого-геофизический аспект // Ученые записки Крымского Федерального университета им. В.И. Вернадского. – 2025. – Т. 11(77). № 4. – С. 163–172.

18. 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.

19. Трифонов В.Г. Возраст новейшего поднятия Большого Кавказа в разных его сегментах // Тектоника и геодинамика Земной коры и мантии: фундаментальные проблемы – 2026. Материалы LVII Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2026. – С. 509–512.

20. Трифонов В.Г. Коллизия и горообразование // Геотектоника. – 2016. – № 1. – С. 1–23.

21. Трифонов В.Г., Соколов С.Ю., Соколов С.А., Хессами Х. Мезозойско-кайнозойская структура Черноморско-Кавказско-Каспийского региона и ее соотношение со строением верхней мантии // Геотектоника. – 2020. – № 3. – С. 55–81.

22. Шенгелая Г.Ш. Гравитационная модель земной коры Кавказа. М.: Наука, 1984. – 128 с.
23. Katayama J., Yoshida M., Hirauchi K.I. Effects of rheological stratification and elasticity of lithosphere on subduction initiation // *Frontiers in Earth Sciences*. – 2022. – Vol. 10. DOI: 10.3389/feart.2022.988320.
24. 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.
25. Phillip H., Cisternal A., Gvishiani A., Gorshkov A. The Caucasus: an actual example of the initial stage of continental collision // *Tectonophysics*. – 1989. – Vol. 161. – pp. 1–21.
26. Ranalli G. *Rheology of the Earth*. London: Allen and Unwin, 1987. – 336 p.
27. Ranalli G., Murphy D.C. Rheological stratification of the lithosphere // *Tectonophysics*. – 1987. – Vol. 132. – pp. 281–295.
28. Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R., Ozener H. 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.
29. Shempelev A.G., Zaalishvili V.B., Chotchaev K.O., Rogozhin E.A., Shamanovskaya S.P. 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.

References

1. Belov A.A., Burtman V.S., Zenkevich V.P. et al. Tectonic layering of the lithosphere and regional geological studies. Eds. Yu.M. Pushcharovsky, V.G. Trifonov. Moscow. Nauka. 1990. 293 p. (In Russ.)
2. The Greater Caucasus during the Alpine Period. Ed. Yu.G. Leonov. Moscow. GEOS. 2007. 368 p. (In Russ.)
3. Bubnov S.N., Kondrashov I.A., Goltsman Yu.G., Oleynikova T.I. Main features of the enriched lithospheric source of the Neogene-Quaternary magmatism of the Caucasus. In: *Modern problems of Geology, Geophysics and Geoecology of the North Caucasus*. Vol. XV. Moscow. IIET RAS. 2025. pp. 240–248. (In Russ.)
4. Ghonghadze S.A. The Deep structure of the Greater Caucasus based on geophysical data obtained using new technologies. Part 1: gravimetry, magnetometry, local seismic tomography, and microseismic 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. Cross-sections of the Earth's crust and upper mantle in the Greater Caucasus using new technologies. Part 2: Seismic tomography based on deep seismic sounding profiles. *Geophysical Journal*. 2016. Vol. 38. No. 4. pp. 100–112. (In Russ.)
6. Ershov A.V., Korotaev M.V., Nikitin M.Yu. Model of Eastern Caucasus stageuplift and erosion at the neotectonic. In: *Tectonics and Geodynamics of the Earth's Crust and Mantle: Fundamental Problems – 2026*. Materials of the LVII Tectonic Meeting. Moscow. GEOS. 2026. pp. 172–176. (In Russ.)
7. Etirmishvili G.D., Mammadli T.Ya., Rogozhin E.A., Sysolin A.I. Seismic activation of the eastern part of the southern slope of the Greater Caucasus in the late 20th – early 21st centuries. *Geophysical Processes and Biosphere*. 2019. Vol. 18. pp. 15–29. (In Russ.)
8. Krasnopevtseva G.V., Matushkin B.A., Popov E.A. Geophysical research on the Volgograd-Nakhichevan regional profile. *Izvestiya Akademii Nauk USSR. Seriya Geologicheskaya*. 1967. No. 12. pp. 43–51. (In Russ.)
9. Krasnopevtseva G.V., Matushkin B.A., Shevchenko V.I. New interpretation of deep seismic sounding data along the Steпноe–Bakuriani profile in the Caucasus. *Sovetskaya Geologiya*. 1970. No. 8. pp. 113–120. (In Russ.)

10. Lukk A.A., Shevchenko V.I. Seismicity, tectonics and GPS geodynamics of the Caucasus. *Physics of the Earth*. 2019. No. 4. pp. 99–123. (In Russ.)
11. Nikolaevsky V.N., Sharov V.I. Faults and rheological stratification of the Earth's crust. *Physics of the Earth*. 1985. No. 1. pp. 16–28. (In Russ.)
12. Pavlenkova G.A. Crustal structure of the Caucasus from the Stepnoe-Bakuriani and Volgograd-Nakhichevan DSS profiles (reinterpretation of the primary data). *Physics of the Earth*. 2012. No. 5. pp. 16–23. (In Russ.)
13. Pavlenkova G.A. The Earth crust structure of the Lesser Caucasus from deep seismic sounding data. *Geophysical Research*. 2019. Vol. 20. No. 1. pp. 65–79. (In Russ.)
14. Rogozhin E.A., Gorbatiykov A.V., Stepanova M.Yu., Ovsyuchenko A.N., Andreeva N.V., Kharazova Yu.V. The structural framework and recent geodynamics of the Greater Caucasus meganticlinorium in the light of new data on its deep structure. *Geotectonics*. 2015. No. 2. pp. 36–49. (In Russ.)
15. Senin V.V., Kerimov V.Yu., Mustaev R.N., Leonchik M.I. Structural–geodynamic systems of the basement of the black Sea–Caspian Sea region: evolution in the late Paleozoic–Cenozoic. *Geotectonics*. 2022. No. 1. pp. 27–50. (In Russ.)
16. Stogny V.V., Stogny G.A. Deep structure and rheological stratification of the Earth's crust for the Greater Caucasus Central segment. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 6–20. DOI: 10.46699/VNC.2024.37.52.001. (In Russ.)
17. Stogny G.A., Stogny V.V. Upper mantle earthquakes of the Crimean-Caucasian seismic belt Terek-Caspian trough: geological and geophysical aspect. *Scientific Notes of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University*. 2025. Vol. 11(77). No. 4. pp. 163–172. (In Russ.)
18. Stogny G.A., Stogny V.V. The Scythian plate southern boundary in the system of block divis-ibility 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.)
19. Trifonov V.G. The age of the latest uplift of the Greater Caucasus in its different segments. In: *Tectonic and Geodynamics of the Earth's Crust and Mantle: Fundamental Problems – 2026. Materials of the LVII Tectonic Meeting*. Moscow. GEOS. 2026. pp. 509–512. (In Russ.)
20. Trifonov V.G. Collision and orogenesis. *Geotectonics*. 2016. No. 1. pp. 1–23. (In Russ.)
21. Trifonov V.G., Sokolov S.Yu., Sokolov S.A., Hessami H. Mesozoic-Cenozoic structure of the Black Sea-Caucasus-Caspian region and its relationship with the structure of the upper mantle. *Geotectonics*. 2020. No. 3. pp. 55–81. (In Russ.)
22. Shengelaya G.Sh. Gravity model of the Caucasus crust. Moscow. Nauka. 1984. 128 p. (In Russ.)
23. Katayama J., Yoshida M., Hirauchi K.I. Effects of rheological stratification and elasticity of lithosphere on subduction initiation. *Frontiers in Earth Sciences*. 2022. Vol. 10. DOI: 10.3389/feart.2022.988320.
24. 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.
25. Phillip H., Cisternal A., Gvishiani A., Gorshkov A. The Caucasus: an actual example of the initial stage of continental collision. *Tectonophysics*. 1989. Vol. 161. pp. 1–21.
26. Ranalli G. *Rheology of the Earth*. London. Allen and Unwin. 1987. 336 p.
27. Ranalli G., Murphy D.C. Rheological stratification of the lithosphere. *Tectonophysics*. 1987. Vol. 132. pp. 281–295.
28. Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R., Ozener H. 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.
29. Shempelev A.G., Zaalishvili V.B., Chotchaev K.O., Rogozhin E.A., Shamanovskaya S.P. 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.