

Анатолий Георгиевич Гурбанов

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), ведущий научный сотрудник, Россия, г. Москва; Владикавказский научный центр Российской академии наук, Комплексный научно-исследовательский отдел, ведущий научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук, Россия, г. Владикавказ, e-mail: ag.gurbanov@yandex.ru

Ян Краль

Геологический институт имени Диониза Штура Словацкой академии наук, ведущий научный сотрудник, кандидат наук, геолого-минералогических наук, Млинска долина 1 817 04, г. Братислава, Республика Словакия

Виктор Магалимович Газеев

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), научный сотрудник, Россия, г. Москва; Владикавказский научный центр Российской академии наук, комплексный научно-исследовательский отдел, старший научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук, Россия, г. Владикавказ, e-mail: gazeev@igem.ru

Алексей Борисович Лексин

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), ведущий программист, Россия, г. Москва, e-mail: lexin@igem.ru.

Александр Яковлевич Докучаев

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), ведущий научный сотрудник, заведующий Рудно-петрографическим сектором-музеем, кандидат геолого-минералогических наук, Россия, г. Москва, e-mail: alexandre-dokuchayev@yandex.ru

Ольга Александровна Гурбанова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, ассистент кафедры минералогии и кристаллохимии, кандидат химических наук, Россия, г. Москва, e-mail: gur_o@mail.ru

Время проявления аплифта на территории Северного Кавказа

Аннотация. Метод фишен-трекового датирования дает возможность реконструкции эволюции поднятий, вызванных тектоническими процессами.

Целью исследований в структурно-формационных зонах (СФЗ) Большого Кавказа (БК) являются: 1) определение диапазона аплифта во времени; 2) выявление зональности во времени проявления аплифта; 3) выяснение связи проявления аплифта с региональными процессами (движения, коллизия и др.). Объекты исследований – кристаллы апатита из гранитоидных и метаморфических пород доальпийского фундамента. Из массивов гранитоидных и метаморфических пород методом сколков отобрано 44 пробы весом до 15 кг каждая с замерах координат и высотных отметок. Флотацией и разделением в тяжелых жидкостях выделены мономинеральные фракции апатита. Из каждой пробы отбиралось 300–500 кристаллов апатита, которые разделялись на две части. В первой части определялась наведенная плотность треков – нагревалась пять часов при 550 °С для удаления самопроизвольных треков, а вторая – не нагревалась. Затем образцы апатита двух частей пробы облучались в ядерном реакторе. После облучения как спонтанные (ps), так и индуцированные трековые (pi) части проб помещались в шашки из эпоксидной смолы и протравливались в одинаковых условиях (1 % HNO₃, 5 минут, 20 °С). Подсчет треков производился на оптическом микроскопе. В результате распределение фишен-трековых (ФТ) возрастов аплифта в СФЗ БК показало, что Эльбрусский поперечный разлом является западной границей зоны Транс-Кавказского поперечного поднятия (ТПП), прослеживающегося вдоль левого борта долины р. Баксан из истоков р. Азау на юге и до Кавминвод на севере, разделяя территорию БК на два блока с разной историей поднятий: западный (от р. Белая на западе до р. Баксан на востоке) и восточный (от долины р. Баксан на западе до долины р. Фиагдон и, возможно, далее на восток).

Важную роль в распределении величин времени аплифта играет Эльбрусский поперечный разлом, имеющий черты рифтообразных структур. Результаты исследований имеют, кроме научного, и практическое значение – они необходимы при выборе безопасных мест для сооружения малых гидроэлектростанций в горных регионах России.

Ключевые слова: фишен-трековый анализ кристаллов апатита, определение времени проявления аплифта, структурно-формационные зоны Большого Кавказа.

Для цитирования: Гурбанов А.Г., Краль Я., Газеев В.М., Лексин А.Б., Докучаев А.Я., Гурбанова О.А. Время проявления аплифта (по данным фишен-трекового датирования апатитов) в различных структурно-формационных зонах Северного Кавказа: расшифровка эволюции тектонических подвижек во времени, тектоническое районирование // Вестник ВНЦ РАН, 2022, № 1. С. 55–68. DOI 10.46698/VNC.2022.47.11.001

Anatoly Georgievich Gurbanov

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), Leading Researcher, Russia, Moscow; Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Integrated Research Department, Leading Researcher, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Russia, Vladikavkaz, e-mail: ag.gurbanov@yandex.ru.

Jan Kral

Dioniz Štúr Geological Institute of the Slovak Academy of Sciences, Leading Researcher, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Mlinska Dolina 1 817 04, Bratislava, Republic of Slovakia.

Victor Magalimovich Gazeev

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), Senior, Russia, Moscow; Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Integrated Research Department, Senior Researcher, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Russia, Vladikavkaz, e-mail: gazeev@igem.ru.

Aleksey Borisovich Leksin

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), Lead Programmer, Russia, Moscow, e-mail: lexin@igem.ru.

Alexander Yakovlevich Dokuchaev

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), Leading Researcher, Head of the Ore-Petrographic Sector-Museum, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Russia, Moscow, e-mail: alexandre-dokuchayev@yandex.ru.

Olga Aleksandrovna Gurbanova

Lomonosov Moscow State University M.V. Lomonosov, Faculty of Geology, Assistant of the Department of Mineralogy and Crystal Chemistry, Candidate of Chemical Sciences, Russia, Moscow, e-mail: gur_o@mail.ru

Time of manifestation of uplift in the territory of the North Caucasus

Abstract. *The fission-track dating method makes it possible to reconstruct the evolution of uplifts caused by tectonic processes. The purpose of research in the structural-formation zones (SFZ) of the Greater Caucasus (GC) are: 1) determination of the range of uplift in time; 2) identification of zoning in the time of manifestation of the uplift; 3) clarification of the connection between the manifestation of uplift and regional processes (thrust, collision, etc.). The objects of research are apatite crystals from granitoid and metamorphic rocks of the pre-Alpine basement.*

Research methodology. 44 samples weighing up to 15 kg each were taken from the massifs of granitoid and metamorphic rocks by the method of chips, with measurements of coordinates and elevations. Monomineral fractions of apatite were isolated by flotation and separation in heavy liquids. From each sample, 300–500 apatite crystals were taken, which were divided into two parts. In one part, the induced track density was determined - it was heated for five hours at 550 °C to remove spontaneous tracks, and the second did not heat up. Then, samples of apatite in two parts were irradiated in a nuclear reactor. After irradiation, both spontaneous (ps) and induced track (pi) portions of the samples were placed in epoxy resin plates and etched under the same conditions (1 % HNO₃, 5 minutes, 20 °C). The tracks were counted using an optical microscope. Results. The distribution of fission-track (FT) uplift ages in the SFZ GC showed that the Elbrus transverse fault is the western boundary of the Trans-Caucasian transverse uplift (T-CTU) zone, which is traced along the left side of the river valley. Baksan from the head of the river Azau in the south and up to Kavminvody in the north, dividing the GC territory into two blocks with different history of uplifts: western (from the Belaya river in the west to the Baksan river in the east) and eastern (from the Baksan river valley in the west to the Ardon river valley and possibly further east). Then, samples of apatite in two parts were irradiated in a nuclear reactor. After irradiation, both spontaneous (ps) and induced track (pi) portions of the samples were placed in epoxy resin plates and etched under the same conditions (1 % HNO₃, 5 minutes, 20 °C). The tracks were counted using an optical microscope. Results. The distribution of fission-track (FT) uplift ages in the SFZ GC showed that the Elbrus transverse fault is the western boundary of the Trans-Caucasian transverse uplift (T-CTU) zone, which is traced along the left side of the river valley. Baksan from the head of the river Azau in the south and up to Kavminvody in the north, dividing the GC territory into two blocks with different history of uplifts: western (from the Belaya river in the west to the Baksan river in the east) and eastern (from the Baksan river valley in the west to the Fiagdon river valley and possibly further east).

An important role in the distribution of uplift times is played by the Elbrus transverse fault, which has features of rift-like structures. The research results have, in addition to scientific and practical importance - they are necessary when choosing safe places for the construction of small hydroelectric power plants in the mountainous regions of Russia.

Keywords: *fish-track analysis of apatite crystals, determination of the time of uplift manifestation, structural-formational zones of the Greater Caucasus.*

For citation: *Gurbanov A.G., Kral Y., Gazeev V.M., Leksin A.B., Dokuchaev A.Ya. Gurbanova O.A. The time of manifestation of uplift (according to the fission-track dating of apatites) in various structural-formational zones of the North Caucasus: deciphering the evolution of tectonic movements in time, tectonic zoning. // Vestnik Vladikavkaz Scientific Center, 2022, № 1, P. 55–68. DOI...*

ВВЕДЕНИЕ

В конце 60-х гг. прошлого века были получены первые данные о треках деления (фишен-треках – ФТ) во многих регионах мира с различным геологическим строением. Экспериментальными исследованиями апатита из магматических пород, обнажающихся на поверхности и вскрытых скважинами, установлено, что температура сохранения («закрытия») треков деления в апатите составляет 100 °С [38; 39]. Следовательно, при аплифте отдельных блоков земной коры и пересечении ими из ограды 100 °С, в апатитах «включаются ФТ часы», что дало возможность определять время проявления вертикальных тектонических подвижек (аплифта), и апатит стал удобным для изучения истории низкотемпературного остывания горных пород, находившихся ранее на больших глубинах и при более высоких температурах. После того, как Г.А. Вагнер [43] продемонстрировал тектоническую применимость этого метода, он стал использоваться для реконструкции эволюции аплифта, вызванного различными тектоническими процессами (надвигом, коллизией плит) во многих орогенных поясах [47]. Важные данные получены и по пассивным континентальным окраинам, связанным с развитием рифтогенных структур [24; 33; 37; 41]. Потенциал ФТ датирования был увеличен за счет анализа ограниченной и/или прогнозируемой длины пути аплифта конкретных литосферных блоков [23; 46]. Большой Кавказ (БК) является частью Альпийско-Гималайского складчатого пояса, в котором выявлены надвиги, коллизия литосферных плит [42], рифтогенные процессы [15; 9]). Считается, что орогенный пояс БК образовался в результате сокращения коры исходной территории Кавказа в позднем кайнозое [8], а его новейшее (от позднеальпийского до четвертичного) тектоническое развитие контролировалось тремя главными процессами: 1) поддвижением Закавказского массива под БК, начиная с эоцена [21]; 2) континентальной коллизией Понтида с восточной частью Кавказа [42], вызванной открытием рифта Красного моря в период от среднего до позднего миоцена и последующим движением Аравийской плиты на север; 3) развитием транскавказских разломных структур, в том числе и глобального ТПП, представляющих обширные зоны глубинных разломов, с одним из них (с Эльбрусским, в западной части ТПП) связан рифтовый щелочной вулканизм [26; 25; 9].

Основными задачами данной статьи являлись: определение временного диапазона проявления аплифта на территории БК, где обнажается доальпийский фундамент; выявление возможной зональности в характере распределения значений времени проявления аплифта в различных структурно-формационных зонах (СФЗ) БК; выяснение возможной связи возрастов проявления аплифта с крупными тектоническими процессами регионального масштаба. Исходя из геологического строе-

ния БК, мы предполагали, что наиболее молодой аплифт и максимальные скорости аплифта будут приурочены к ТПП, что хорошо выражено в геоморфологическом строении БК (образование каньонообразных долин рек, начиная с р. Баксан и далее на восток до долины р. Терек). Для подтверждения этих предположений было проведено опробование и ФТ датирование апатитов, от долины р. Белой на западе и до долины р. Фиагдон на востоке.

ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА И ПОЗДНЕАЛЬПИЙСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ БК

Большой Кавказ (БК), как сегмент Альпийско-Средиземноморского складчатого пояса, расположен между южной окраиной Восточно-Европейской платформы на севере и Закавказским массивом на юге. Горное сооружение БК простирается в субширотном направлении на 1 300 км от Черного до Каспийского моря. Позднекайнозойские структуры имеют доальпийский фундамент, деформированный вместе с молодым альпийским чехлом [40]. В герцинскую эпоху БК был частью складчатого пояса, образовавшегося во время палеозойской конвергенции Гондваны на юге, Лавразии на севере [20]. Альпийский орогенный период начался на БК с нижнеюрской трансгрессии, связанной с опусканием южного края Скифской платформы шириной 350–400 км. Этот бассейн существовал в западной части БК до позднего эоцена, когда локально началась регрессия. Из-за отсутствия признаков эрозии в осевой зоне БК до олигоцена И.Г. Щербо [14] считал, что до позднего сармата в горной части Кавказа не существовало поднятых сегментов суши. Начиная с позднего сармата, интенсивное поднятие этого региона фиксируется при фациальном анализе. Формирование современной орогенной структуры БК стало результатом значительного сжатия исходной территории БК, обусловленного движением Закавказского массива на север и его поддвижением под антиклинорий БК. В результате произошло утолщение земной коры до 60 км, что привело к быстрому вертикальным движениям [1]. Поднятие проявлялось не синхронно на территории орогена БК [10]: градация неотектонических движений началась в конце миоцена и начале плиоцена (с 5 млн лет) в восточной части БК, и с позднего плиоцена (3 млн лет) до четвертичного времени в центральной и западной частях ТПП. Эти различия, вероятно, вызваны первоначальным столкновением Больше-Кавказской и Аравийской плит, основные эффекты которого сосредоточены в восточной части горного сооружения Центрального Кавказа [42]. Восточная часть Кавказа имеет черты начальной стадии континентальной коллизии (деформация затронула всю его горную часть), тогда как западная часть (с выходом фундамента на поверхность) все еще остается в промежуточном положении, проявляя черты бывшей внутриплитной субдукции, но с другой стороны (деформация со-

средоточена только на его южном склоне).

Все основные структуры БК, сформировавшиеся начиная с палеозоя и до олигоцена, имеют субширотное (З-СЗ – ЮВ) простирание. В связи с продолжающимся с олигоцена сжатием, кроме субширотных, стали формироваться разломы С-В и С-З простираний, а в восточной части Центрального Кавказа сформировалась субмеридиональная структура, выделенная [5] как Транскавказское поперечное поднятие (ТПП). На БК неоген-четвертичный магматизм (позднемиоценовые лакколиты Кавминвод, позднеплиоценовые Верхне-Чегемская кальдера, Эльджуртинский, Сангутидонский, Теплинский гранитоидные массивы, Эльбрусский и Казбекский вулканические центры пространственно ассоциируют с зоной ТПП [4].

В последние 30 лет на территории БК установлены высокие (от 4 до 12 мм в год) скорости апlifта отдельных литосферных блоков, включая доальпийский фундамент, а максимальные скорости апlifта установлены в зоне ТПП [42]. Сопоставление в глобальном масштабе позднеальпийского тектонического развития БК с прилегающими территориями показало, что все значимые молодые орогенные фазы на БК синхронны с временем активизации рифтов Адена и Красного моря с 36 млн лет по настоящее время [1].

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ИССЛЕДУЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ И МЕСТА ОТБОРА ПРОБ

Исследованная часть БК состоит из четырех СФЗ [13; 3] с выходами на поверхность пород фундамента (рис. 1, СФЗ: Б, П, Г, Ю). СФЗ имеют сложную геологическую историю развития [32; 2]. Зона ТПП сформировалась как зона растяжения в области наиболее интенсивного субмеридионального сжатия, характеризующегося максимальным апlifтом доальпийского фундамента, а также интенсивным проявлением современной вулканической, сейсмической активности и повышенным тепловым потоком [1; 11].

Бечасынская СФЗ (Б) на рис. 1 является южной окраиной Скифской платформы. Доальпийский фундамент сложен метаморфическими и гранитоидными породами, прорванными позднепалеозойскими гранитами, перекрытыми нижне-среднеюрскими отложениями чехла. Терригенно-вулканические молассы верхнего карбона-нижней перми сохранились в ряде грабенов. В этой зоне взяты пробы из огнейсованных гранитоидов ранне-го палеозоя и позднепалеозойских гранитов.

СФЗ Передового хребта (П) представлена герцинской эвгеосинклинально с породами офиолитовой ассоциации [32]: диабаз-плагиоориолитовая ассоциация и габбро, тоналиты, плагиограниты до-среднедевонского возраста. Начиная со среднего и позднего девона, офиолитовая ассоциация сменяется вулканическими породами принципиально иной базальт-трахитовой ассоциацией, перекрытой пер-

мо-карбонной вулканогенно-терригенной молассой. Единственная проба в этой СФЗ была взята из плагиогранита.

СФЗ Главного хребта (Г) – наиболее поднятая часть доальпийского фундамента БК с максимумом гранитного магматизма [6]. Метаморфические породы (сланцевые сланцы и гнейсы с огнейсованными гранитоидами), прошедшие несколько этапов догерцинской эволюции, изначально были представлены вулканогенно-осадочной толщей позднего протерозоя-раннего палеозоя. После первого метаморфического события 500 млн лет назад [25] они были прорваны гранитами позднего карбона. В юрский период фундамент южной части СФЗ (Г) вновь подвергся метаморфизму при температурах 300–500 °С [25]. Большинство проб взято в этой СФЗ из позднепалеозойских гранитоидов и раннепалеозойских метаморфических пород.

СФЗ Южного склона (Ю), в которой преобладают слабо метаморфизованные и сильно тектонизированные породы юрской сланцево-диабазовой ассоциации. Пробы из этой зоны не отбирались.

Основным поперечным разломом на исследованной территории является Эльбрусский, пересекающий БК, прилегающий к нему сегмент Скифской платформы и прослеживающийся до района Кавминвод (пунктирная линия на рис. 1). Он представляет собой тектонически сложную структуру с сопряженными левыми и правыми зонами сдвига, что указывает на общее сокращение поверхности территории в С-Ю и расширение в В-З направлениях. На расширение указывает также развитие поперечных горстовых и грабеновых структур [12]. К этой структуре приурочен щелочной магматизм неогенового возраста с рифтовой химической спецификой.

МЕТОДИКИ ОТБОРА ПРОБ, ПРОБОПОДГОТОВКИ И ФИШЕН-ТРЕКОВОГО ДАТИРОВАНИЯ

В СФЗ из разновозрастных магматических и метаморфических пород, обнажающихся на протяжении 400 км к западу и к востоку от Эльбрусского разлома, были отобраны 44 пробы весом до 15 кг каждая. Для проб определены координаты и высотные отметки (таблица 1). Пробы отбирались из массивов пород с площади 100 м² методом сколков. Перепады высот мест опробования составляют более 2 500 м (780–3 320 м над уровнем моря, рис. 3). Пробы дробились и разделялись на классы по размерности: -1.0 +0.5мм; -0.5 +0.25 мм. Затем эти классы разделялись на легкие и тяжелые фракции. В тяжелых фракциях методами флотации и разделения в тяжелых жидкостях выделялись мономинеральные фракции апатитов с чистотой до 95 %. После этого под биноклем чистота фракций апатитов доводилась до 100 %, и из каждой пробы отбиралось 300–500 кристаллов апатита для ФТ датирования.

Для датирования проб апатита методом ФТ был

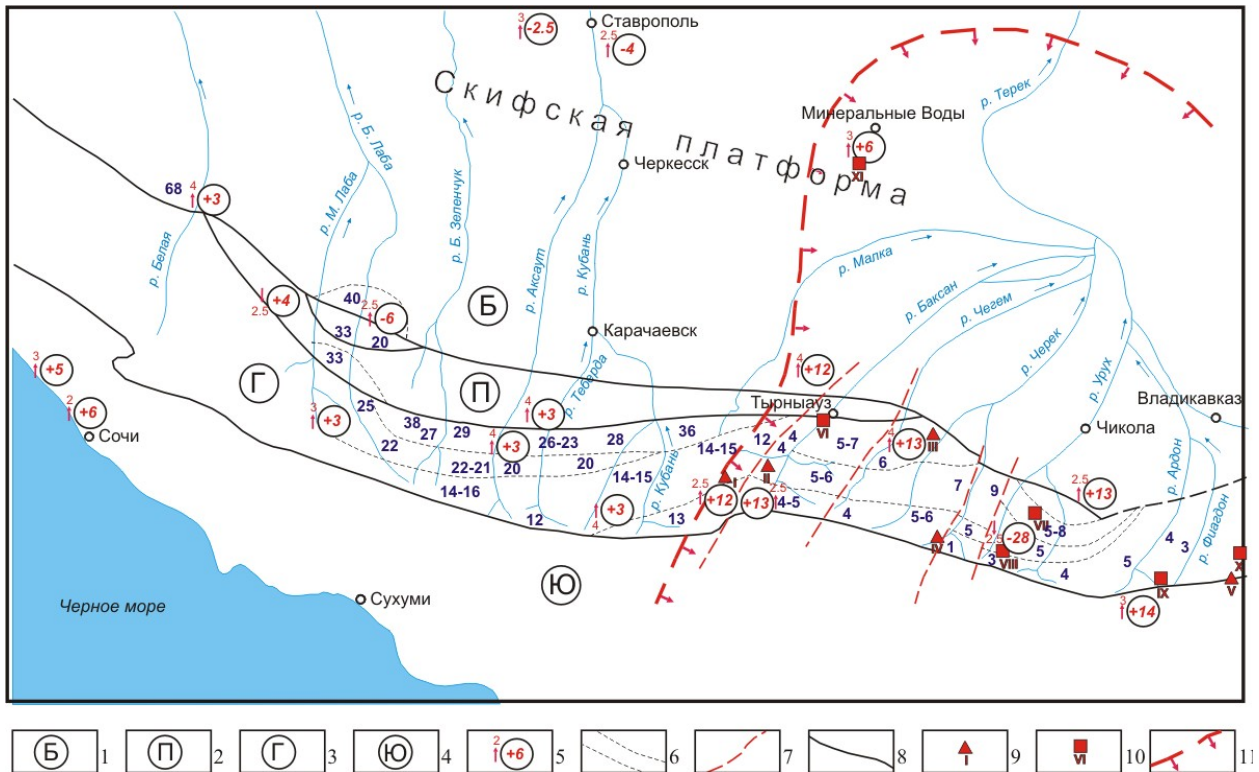


Рис. 1. Схема распределения времени аплифта и современных скоростей вертикальных и горизонтальных перемещений отдельных блоков в структурно-формационных зонах Большого Кавказа по геодезическим (GPS-измерения) и фишен-трековым данным. Составлена А.Г. Гурбановым
Условные обозначения: 1 – Бечасынская структурно-формационная зона (Б); 2 – СФЗ Передового хребта (П); 3 – СФЗ Главного хребта (Г); 4 – СФЗ Южного склона (Ю); 5 – в кружке со знаком +6 – скорость подъема в мм/год, со знаком -28 – скорость опускания, в мм/год (стрелка слева от кружка: направление вверх – горизонтальное смещение в северных румбах, направление вниз – горизонтальное смещение в южных румбах; цифрой у стрелки показана скорость смещения в мм/год); 6 – условные границы блоков, выделенных по времени аплифта; 7 – зоны активных разломов; 8 – границы СФЗ; 9 – места проявления новейшего вулканизма: I – Эльбурская кальдера, II – Верхне-Баксанский вулканический узел, III – Верхнечегемская кальдера, IV – район истоков р. Тютюн-су, V – вулкан Казбек; 10 – неointрузии и их названия: VI – Эльжуртинская, VII – Сангутидонская, VIII – Танадонская, IX – Теплинская, X – Геналдонская, XI – лакколиты Кавминвод; 11 – западная и северная границы Транскавказского поперечного поднятия

Fig. 1. Scheme of the distribution of uplift time and modern speeds of vertical and horizontal displacements of individual blocks in the structural-formation zones (SFZ) of the Greater Caucasus according to geodetic (GPS measurements) and fission-track data. Compiled by A.G. Gurbanov
Legend: 1 – Bechasyn structural-formation zone (B SFZ); 2 – SFZ of the Foremost Ridge (P); 3 – SFZ of the Main Ridge (G); 4 – SFZ of the Southern slope (Y); 5 – in a circle with a +6 sign – ascent rate in mm/year, with a -28 sign – sinking rate in mm/year. The arrow to the left of the circle sharp end up – horizontal displacement in northern points, sharp end down – horizontal displacement in southern points, and the number at the arrow shows the displacement rate in mm/year; 6 – conditional boundaries of blocks allocated by uplift time; 7 – zones of active faults; 8 – boundaries of SFZ; 9 – places of manifestation of the latest volcanism: I – Elbrus caldera, II – Verkhne-Baksan volcanic area, III – Verkhnechegemskaya caldera, IV – region of the headwaters of the river Tyutyun-su, V – Kazbek volcano; 10 – neo-intrusions and their names: VI – Eldzhurtinskaya, VII – Sangutidonskaya, VIII – Tanadonskaya, IX – Teplinskaya, X – Genaldonskaya, XI – Kavminvody laccoliths; 11 – western and northern borders of the Transcaucasian transverse uplift.

Примечание. Данные о скоростях вертикальных и горизонтальных смещений отдельных литосферных блоков (от гордов Геленджик и Туапсе на западе и до долины реки Урух на востоке), приведенные на рис. 1, были получены за две эпохи измерений (06.1993 и 09.1994 гг.) с помощью системы GPS-TRIMBLE в рамках российско-немецкого проекта "WEGENER". Результатам измерений по Проекту будет посвящена отдельная статья в «Вестнике ВНИЦ РАН» (2022. №1). В процессе работ по проекту была установлена 21 станция GPS-TRIMBLE, на которых были проведены измерения. Результаты этих предварительных исследований приведены на рис. 1.

использован популяционный метод [22]. Зерна апатита из каждой пробы разделялись на две части. Одна часть, предназначенная для определения наведенной плотности треков, нагревалась в течение пяти часов при 550 °С для удаления самопроизвольных треков. Вторая часть зерен апатита не нагревалась. Затем образцы апатита двух частей

проб заворачивались в полиэтилен и облучались в тепловой колонне ядерного реактора в городе Сверке (Польша). После облучения как спонтанные (ps), так и индуцированные трековые (pi) части проб помещались в шашки из эпоксидной смолы и полировались, а затем протравливались в одинаковых условиях (1 % HNO₃, 5 минут, 20 °С). Подсчет

Таблица 1. Table 1

Местоположение проб, породы, координаты местопробования
Localization of samples, rocktypes, latitude/longitude of the samples

Номер пробы	Местоположение	Тип породы	Координаты	
			С.Ш.	В.Д.
1. Долина реки Белая, долина реки Большая Лаба (The Belaya Rivervalley, the Bolshaya Laba Rivervalley)				
249Б (249B)	Бечасынская зона, река Белая (Bechasyyn zone, Belaya River)	красный гранит (red granite)	44° 06' 45"	40° 02' 17"
216Б (216B)	Бечасынская зона, река Большая Лаба (Bechasyyn zone, Bolshaya Laba River)	Огнейсованный ортоклазовый биотитовый гранит (orthoclase biotite granite with biotite lineation)	43° 56' 26"	40° 57' 20"
217Б (217B)	Бечасынская зона, река Мошчевая - приток реки Большая Лаба (Bechasyyn zone, Moshchevaya, Bolshaya Laba River tributary)	Плагиогранито-гнейс (plagioclase granitic gneiss)	43° 56' 28"	40° 57' 52"
218Б (218B)	Бечасынская зона, река Большая Лаба (Bechasyyn zone, Bolshaya Laba River)	Огнейсованный ортоклазовый биотитовый гранит (orthoclase biotite granite with biotite lineation)	43° 56' 30"	40° 57' 50"
256П (256F)	Зона Передового хребта, река Большой Блыб - приток реки Большая Лаба (Front Range zone, Bolshoy Blyb, Bolshaya Laba River tributary)	плагиогранито-гнейс (plagioclase granitic gneiss)	43° 45' 26"	40° 50' 32"
257Б (257B)	Бечасынская зона, река Бескес - приток реки Большая Лаба (Bechasyyn zone, Beskes River, Bolshaya Laba River tributary)	гранито-гнейс (granitic gneiss)	43° 56' 27"	40° 58' 00"
258Б (258B)		Лейкократовый плагиогранито-гнейс (leucocratic plagioclase granitic gneiss)	43° 56' 29"	40° 57' 54"
260Б (260B)	Бечасынская зона, река Большая Лаба (Bechasyyn zone, Bolshaya Laba River)	Ортоклазовый биотитовый гранит (orthoclase biotite granite)	43° 56' 27"	40° 58' 12"
2. Долины рек Большой Зеленчук, Аксаут и Теберда (The Bolshoi Zelenchuk Rivervalley, the Aksaut Rivervalley, the Teberda Rivervalley)				
215Г (215M)	Зона Главного хребта, р. София - приток реки Большой Зеленчук (Main Range zone, Sophia River, Bolshoi Zelenchuk, River tributary)	биотитовый гранит (biotite granite)	43° 30' 52"	41° 15' 37"
219Г (219M)		Двуслюдяной гранит (two-mica granite)	43° 28' 25"	41° 15' 56"
245Г (245M)	Зона Главного хребта, река Пшиш - приток реки Большой Зеленчук (Main range zone, Pshish River, Bolshoi Zelenchuk tributary)	Двуслюдяной гранит (two-mica granite)	43° 27' 18"	41° 07' 45"
221Г (221M)	Зона Главного хребта, река Аксаут (Main Range zone, Aksaut River)	Двуслюдяной гранит (two-mica granite)	43° 29' 27"	41° 29' 12"
222Г (222M)		Лейкократовый мусковитовый гранит (leucocratic muscovite granite)	43° 28' 30"	41° 29' 24"
223Г (223M)		Двуслюдяной гранит (two-mica granite)	43° 26' 56"	41° 27' 28"
225Г (225M)		Двуслюдяной гранит (two-mica granite)	43° 26' 57"	41° 27' 30"
235Г (235M)		биотитовый гнейс (biotite gneiss)	43° 26' 58"	41° 28' 42"
236Г (236M)		Двуслюдяной гранит (two-mica granite)	43° 26' 56"	41° 28' 40"
237Г (237M)	Зона Главного хребта, река Аксаут (Main Range zone, Aksaut River)	Биотитовый сланец - ксенолит в граните (biotite schist, xenolith in granite)	43° 26' 30"	41° 28' 30"
238Г (238M)		Порфиридовый биотитовый гранит (porphyritic biotite granite)	43° 24' 36"	41° 29' 56"

Продолжение таблицы 1

Номер пробы	Местоположение	Тип породы	Координаты	
			С.Ш.	В.Д.
213Г (213М)	Зона Главного хребта, река Теберда (Main Range zone, Teberda river)	Порфиroidный биотитовый гранодиорит (porphyric biotite granodiorite)	43° 07' 05"	41° 45' 40"
3. Долина реки Кубань (The Kuban River valley)				
201Г (201М)	Зона Главного хребта, р. Кубань, карьер (Main Range zone, Kuban River, quarry)	двуслюдяные граниты (two-mica granite)	43° 22' 40"	42° 00' 47"
231Г (231М)	Зона Главного хребта, река Кубань (Main Range zone, Kuban River)	анатектический двуслюдяной гранит (anatectic two-mica granite)	43° 21' 43"	42° 12' 30"
261Г (261М)		биотитовый гранит (Biotite granite)	43° 23' 45"	42° 02' 21"
262Г (262М)		двуслюдяной гранит (two-mica granite)	43° 20' 50"	42° 12' 18"
4. Долина реки Баксан (The Baksan River valley)				
205Г (205М)	Зона Главного хребта, река Адыл-су – правый приток реки Баксан (Main Range zone, Adyl-su (right tributary of Baksan))	биотитовый гранит (biotite granite)	43° 13' 50"	42° 40' 54"
206Г (206М)	Зона Главного хребта, река Баксан (Main Range zone, Baksan River)	Двуслюдяной гранит (two-mica granite)	43° 19' 36"	42° 46' 00"
207Г (207М)		мигматит (migmatite)	43° 21' 24"	42° 51' 14"
208Г (208М)		биотит-роговообманковый гнейс (biotite-hornblende gneiss)	43° 21' 25"	42° 51' 15"
230Г (230М)	Зона Главного хребта, река Адыл-су – приток реки Баксан (Main Range zone, Adyl-su (right tributary of Baksan))	биотитовый гнейс (biotite gneiss)	43° 12' 44"	42° 41' 52"
232Г (232М)	Зона Главного хребта, река Баксан (Main Range zone, Baksan River)	Порфиroidный биотитовый гранит (porphyric biotite granite)	43° 19' 41"	42° 46' 08"
233Г (233М)		Порфиroidный биотитовый гранодиорит (porphyric biotite granodiorite)	43° 19' 50"	42° 49' 26"
234Г (234М)		Двуслюдяной гранит (two-mica granite)	43° 22' 12"	42° 50' 00"
5. Долина реки Черек Балкарский (The Cherek Balkarski river valley)				
202Г (202М)	Зона Главного хребта, река Черек Балкарский (Main Range zone, Cherek Balkarski River)	Двуслюдяной гранит (two-mica granite)	43° 00' 33"	43° 19' 25"
204Г (204М)		Порфиroidный биотитовый гранодиорит (porphyric biotite granodiorite)	43° 04' 15"	43° 24' 41"
211Г (211М)		Порфиroidный биотитовый гранодиорит (porphyric biotite granodiorite)	43° 04' 58"	43° 25' 30"
212Г (212М)	Зона Главного хребта, река Черек Балкарский (Main Range zone, Cherek Balkarski River)	амфибол-биотитовый гранодиорит (amphibol-biotite granodiorite)	43° 43' 56"	43° 23' 57"
226Г (226М)		Гранодиорит (granodiorite)	43° 03' 41"	43° 22' 46"
228Г (228М)		Лейкократовый огнейсованный гранит (leucocratic gneissose granite)	43° 01' 52"	43° 50' 10"
6. Долина рек Урух и Ардон (The Uruk River valley, the Ardon River valley)				
246Г (246М)	Зона Главного хребта, река Айгамуга – правый приток р. Урух (Main Range zone, Aigamuga River, Uruk tributary)	биотитовый гранит (biotite granite)	42° 58' 27"	43° 46' 52"

Окончание таблицы 1

Номер пробы	Местоположение	Тип породы	Координаты	
			С.Ш.	В.Д.
250Г (250М)	Зона Главного хребта, река Урух (Main Range zone, Uruk River)	биотитовый гранодиорит (biotite granodiorite)	42° 54' 17"	43° 31' 11"
251Г (251М)	Зона Главного хребта, река Айгамуга – правый приток реки Урух (Main Range zone, Aigamuga River, Uruk tributary)	порфировидный гранит (porphyric granite)	42° 55' 20"	43° 50' 20"
252Г (252М)	Зона Главного хребта, река Таймази – приток реки Айгамуга (Main Range zone, Taimazi River, Aigamuga tributary)	порфировидный гранодиорит (porphyric granodiorite)	42° 54' 04"	43° 30' 12"
253Г (253М)	Зона Главного хребта, река Фаснал – приток реки Айгамуги (Main Range zone, Fasnal River, Aigamuga tributary)	биотитовый гранодиорит (biotite granodiorite)	42° 55' 37"	43° 50' 06"
214Г (214М)	Зона Главного хребта, река Ардон (Main Range zone, Ardon River)	гранодиорит-порфир (granodiorite porphyry)	42° 46' 40"	43° 59' 41"

треков производился на оптическом микроскопе (увеличение 800х). Воспроизводимость подсчета ФТ: образцы, в целом демонстрирующие однородное или крайне неоднородное распределение ФТ, были измерены для контроля двумя исследователями. Повторные измерения показали, что разница в плотности ρ_i в однородных образцах составляет 3 %, а в сильно неоднородных – до 16 %. Калибровка по возрасту: стекло NBS 962 облучали вместе с пробами апатита. Полная доза тепловых нейтронов ($2,80 \pm 0,27 \times 10^{15}$ н/см²) определялась из отношения наведенной плотности треков в нашем стекле ($\rho_a = 6,92 \pm 0,66 \times 10^5$) и предварительно облученном стекле NBS 962 [$17, c_{af} = 7,03 \cdot 10^{-17}$ уг⁻¹ с NBS Си дозиметрией. Этот расчет эквивалентен дзета-подходу [29]. Неопределенность возраста выражается как квадратный корень из суммы квадратов доверительных интервалов для среднего значения, определены для плотностей ρ_s , ρ_i , ρ_d . По Й. Бурхарту [16], средние значения были рассчитаны после исключения подсчетов за пределами интервала $\pm 2SD$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Природная изменчивость треков индуцированного деления (однородность концентрации урана) наблюдается как для отдельных зерен одной пробы, так и для средних значений различных исследованных проб БК [35]. Однородность популяции, выражаемая коэффициентом вариации концентрации урана в единичных зернах апатита одной и той же пробы, различна: типичные значения для апатита магматических пород составляют 0,2–0,6; для мигматитов и гнейсов – 0,5–1,8. Для большинства проб апатита характерно примерно логнормальное распределение концентраций урана. Возможно, что изменчивость концентрации урана отражает петрогенетические условия исходного расплава,

существовавшие при кристаллизации апатита [34].

Возраст аплифта (табл. 2) колеблется от 68 млн лет (СФЗ Б, р. Белая) до 1 млн лет (СФЗ Г, р. Черек Балкарский). Наблюдаемый разброс возрастов аплифта можно объяснить проявлением следующих событий: раннего охлаждения после образования породы и / или метаморфизма; фактической высотной отметкой места взятия пробы; латеральным расположением пробы; принадлежностью к СФЗ (Б, П, Г).

Полученные данные позволяют считать, что нет связи между временем формирования породы и временем остывания породы в герцинское время и / или при проявлении юрского метаморфизма, зафиксированных в ряде пород фундамента. На рис. 2 показано распределение ФТ возрастов аплифта на территории БК протяженностью 400 км. Анализ этих данных показал, что Эльбрусский поперечный разлом является западной границей зоны ТПП и прослеживается вдоль левого борта долины р. Баксан от истоков р. Азау на юге, затем в 36 км севернее – через позднеплиоценовый Эльджуртинский гранитный массив и далее на север в пределы Предкавказского краевого прогиба. На западной границе ТПП значения ФТ возрастов аплифта резко изменяются в продольном направлении, разделяя исследованную территорию на два блока: западный (от р. Белая на З-СЗ до рек Малка и Баксан на востоке) и восточный (от долины р. Баксан до долины р. Фиагдон и, возможно, далее на восток). Самая северо-западная проба из долины р. Белая (СФЗ Б) показала наиболее древний возраст (68 млн лет). В долинах рек Большая Лаба, Большой Зеленчук, Аксаут, Теберда и Кубань преобладают ФТ возрасты аплифта, варьирующие от 40 до 13 млн лет назад. Как правило, они уменьшаются в направлении с севера на юг. В то время как проба из долины р. Белая показала время аплифта 68 млн лет назад, остальные пробы из той же СФЗ из

Таблица 2. Table 2

Данные треков деления в апатите из гранитных и метаморфических пород доальпийского фундамента Большого Кавказа (по [35])
 Fission track apatite data from granitic and metamorphic rocks of the pre-Alpine basement of the Great Caucasus [35]

№ пробы (№ sample)	Абс. отм. в метрах (Alt., m)	Спонтанная плотность треков (Spontaneous)		Индукцированная плотность треков (Induced)		ФТ возраст, млн. лет ± доверительный интервал для среднего FT age (Ma) ± cim
		Зерна/Треки Grains/Tracks	p_s ($\times 10^5$)	Зерна/Треки Grains/Tracks	p_i ($\times 10^6$)	
1. Долина реки Белая, долина реки Большая Лаба (The Belaya River valley, the Bolshaya Laba River valley)						
249Б	780	95/1706	5,38	199/1584	1,32	68 ± 7
216Б	980	102/310	0,566	198/2868	0,533	18 ± 2
217Б	850	96/442	0,878	210/2939	0,369	40 ± 4
218Б	2480	99/533	1,35	208/4211	0,558	40 ± 3
256П	1080	95/669	0,828	193/4679	0,425	33 ± 3
257Б	780	98/976	1,26	200/5873	0,682	33 ± 3
258Б	810	98/577	0,805	196/5795	0,672	20 ± 2
260Б	880	105/506	0,747	201/4008	0,500	25 ± 2
2. Долины рек Большой Зеленчук, Аксаут и Теберда (The Bolshoi Zelenchuk, the Aksaut and the Teberda River valley)						
215Г	2750	65/1561	3,63	200/6976	2,17	28 ± 3
219Г	2480	95/2834	5,73	198/8293	2,52	38 ± 4
245Г	2860	95/1385	1,93	203/7914	1,18	27 ± 3
221Г	1850	98/905	1,29	196/7214	1,76	12 ± 1
222Г	1720	99/1707	4,14	200/7982	2,40	29 ± 3
223Г	1930	96/970	2,89	199/8147	2,15	23 ± 2
225Г	1980	96/2747	4,05	196/8959	2,65	26 ± 2
235Г	1740	102/326	0,969	192/3806	1,00	16 ± 2
236Г	1750	98/2364	4,46	195/9974	3,40	22 ± 2
237Г	1770	95/563	0,907	203/5337	1,05	14 ± 1
238Г	2430	95/1356	2,38	191/7819	2,03	20 ± 2
213Г	1520	95/1626	3,85	201/7633	2,27	28 ± 2
3. Долина реки Кубань (The Kuban River valley)						
201Г	1410	96/1256	1,34	95/3634	1,72	13 ± 1
231Г	1640	101/1433	2,05	183/7223	2,29	15 ± 2
261Г	3190	102/2053	3,98	190/4036	1,85	36 ± 3
262Г	1600	95/1405	1,34	200/7846	1,64	14 ± 1
4. Долина реки Баксан (The Baksan River valley)						
205Г	2740	98/939	1,6	193/8580	3,77	7 ± 0,6
206Г	2120	95/188	0,204	200/4920	0,741	5 ± 0,5
207Г	1600	99/298	0,378	201/8067	1,34	5 ± 0,6
208Г	1620	96/151	0,223	201/4597	0,82	5 ± 0,6
230Г	2650	95/379	0,683	183/3461	1,93	6 ± 0,4
232Г	2260	100/330	0,458	196/6833	2,06	4 ± 0,3
233Г	2240	101/572	0,572	196/8797	2,3	4 ± 0,4
234Г	1630	96/281	0,522	197/3920	0,72	12 ± 1
5. Долина реки Черек Балкарский (The Cherek Balkarski River valley)						
202Г	2340	146/633	0,678	193/8197	2,05	6 ± 0,4
204Г	1400	104/580	0,853	191/7667	2,1	7 ± 0,6
211Г	1400	101/1361	1,54	189/7239	3,8	7 ± 0,6
212Г	1480	113/837	0,821	203/8137	1,92	7 ± 0,6
226Г	1500	99/597	0,718	198/9931	2,37	5 ± 0,5
228Г	1600	53/70	0,0764	200/6132	1,27	1 ± 0,1
6. Долина реки Урух и долина реки Ардон (The Uruk River valley, the Ardon River valley)						
246Г	1460	95/1270	2,25	200/7581	2,75	14 ± 1
250Г	1880	105/1058	1,15	194/9635	2,07	9 ± 1
251Г	1660	97/290	0,347	200/6452	1,1	5 ± 0,4
252Г	2780	96/258	0,331	187/9272	1,91	3 ± 0,2
253Г	1480	99/308	0,436	199/7018	0,946	8 ± 0,7
214Г	1120	111/188	0,326	207/5675	1,24	4 ± 0,4

Пояснения. Заглавные буквы указывают структурно-формационную зону, из которой взята проба: Б – Бечасинская, П – Передового хребта, Г – Главного хребта, Ю – Южного склона; доза тепловых нейтронов = $2,80 \pm 0,27 \times 10^{15}$ нейтронов на см⁻²; Альт. – высота точек отбора проб (в м над уровнем моря); Зерна – подсчитанное количество зерен апатита / Треки – количество подсчитанных треков; p_s – спонтанная плотность треков; p_i – индуцированная плотность треков; cim – доверительный интервал для среднего.

Explanations. No – Sample number (See Fig. 2) is indicated by capital letter following the sample number (Б – The Bechasin zone, П – The Front Range zone, Г – The Main Range zone, Ю – The Southern Slope zone); The thermal neutron dose = $2,80 \pm 0,27 \times 10^{15}$ neutrons · cm⁻²; Alt. – altitude of the sample sites (in m above sea level); Grains – The number of the apatite grains counted / Tracks – The number of tracks counted; p_s – spontaneous track density; p_i – induced track density; cim – confidence interval for mean.

Таблица 3. Table 3

Возрастные диапазоны фишен-трекового датирования апатита в зависимости от высотных отметок пробы [35] (в скобках указано количество проанализированных проб)
Age ranges of fission-track dating of apatite depending on the altitude of the sample [according to Kral, Gurbanov, 1996] (the number of analyzed samples is indicated in parentheses)

Высотная отметка пробы (м) Sample elevation (m)	Датировки (млн. лет) Dating (million years)	
	Западный блок Western block	Восточный блок Eastern bloc
700–1200	68–18 (8)	4 (1)
1201–1700	28–13 (4)	14–1 (11)
1701–2200	29–12 (7)	9–5 (2)
2201–2700	38–20 (2)	6–4 (4)
выше 2700	36–27 (3)	7–3 (2)

долины р. Большая Лаба – более молодые и не превышают возраста в 40 млн лет (высота опробованных участков в обеих долинах около 800 м). Такая же тенденция наблюдается в четырех пробах из долин р. Теберда (28 млн лет) и р. Кубань (13–15 млн лет) с высотными отметками мест отбора проб 1 400–1 700 м. В восточном блоке время проявления апплифта варьирует от 14 до 1 млн лет, с максимумом повторяемости от 7 до 4 млн лет. Единственный возраст апплифта был определен другим методом (U-He), по апатиту из долины Теберды [36]. Возрасты, полученные ФТ и (U+Th)/He методами, – 28 и 30 млн лет соответственно. Для образцов, взятых из одних и тех же долин в непосредственной близости друг от друга, не наблюдалось зависимости времени проявления апплифта от высотных отметок отобранных проб. Однако в Альпах выявлена связь между высотными отметками проб и возрастными их апплифта [44; 30]. Таблица № 3 демонстрирует различия в возрастах апплифта между двумя блоками в зависимости от высоты расположения пробы. Результаты на пробах с высот 1 200 и 2 200 м и выше 2 200 м в западном блоке (кроме СФЗ Б) в целом соответствуют концепции зоны частичной устойчивости [43], которая называется зоной частичного отжига (ЗЧО). Пробы с больших высот обычно имеют более древний ФТ возраст (табл. 3). Однако подобная тенденция не наблюдается в пробах из восточного блока, где преобладает противоположная тенденция: возраста проб с высот 1 200–2 200 м, в целом, древнее, чем пробы с высотными отметками более 2 200 м. На рис. 3 видно, что для восточного блока самые молодые возраста апплифта часто приурочены к районам с более высокими высотными отметками дна долины реки. Существует явная разница в возрастах апплифта между пробами, взятыми с одной и той же высоты в обоих блоках. Например, ФТ возраст апплифта проб с высот более 2 200 м колеблется от 7–3 в восточном и до 38–20 млн лет в западном блоке. Значительные различия в ФТ возрасте апплифта четко подтверждают различия в истории позднеальпийского апплифта доальпийского фундамента в этих двух блоках.

Результаты исследований показали, что на БК в различных СФЗ апплифт происходил (табл. №2 и рис. 1): 1) в южной части Бечасынской СФЗ (долина р. Белой) – 68 млн лет назад; 2) в СФЗ Передового хребта (долины рек Малая и Большая Лаба, Большой Блыб), в ее северной части апплифт был 40 млн лет назад, а в средней и южной частях – 33 и 20 млн лет назад, соответственно; 3) в СФЗ Главного хребта, охарактеризованной большинством проб, выявилась следующая картина: а) по времени про-

явления апплифта установлено «клавишное» строение СФЗ, со значительным омоложением возраста апплифта с севера на юг. Так, в междуречье Большая Лаба – Кубань в строении этой СФЗ выделено 4 блока субширотного простирания, шириной до 8–10 км каждого. Самый северный блок испытал апплифт 38–36 и 29–23 млн лет назад. Расположенный южнее блок – 25–20 млн лет назад. Следующий за ним к югу блок – 16–14 млн лет назад, а самый южный блок – 13–12 млн лет назад; б) начиная с долины р. Малка, но более выразительно с левого борта долины р. Баксан и далее на восток до долин рек Фиагдон и, возможно Терек, описанная (в пункте а) картина резко меняется. Так, если западнее Эльбрусского разлома блоки в СФЗ (Г) были подняты 15–14 и 13–12 млн лет назад, то восточнее него, на продолжении этой же СФЗ (Г), как в левом, так и в правом бортах долины р. Баксан и ее притоков (Адылсу, Адырсу, Кыртык, Ирик, Азау), апплифт был 5–7, 5–6 и 5–4 млн лет назад, т. е. эта часть БК претерпела более молодой апплифт, чем его западная часть. Начиная с долины р. Баксан и восточнее (до долины р. Фиагдон), в северной части, составляющей до 3/4 от ширины СФЗ (Г), апплифт произошел в интервале времени от 9 и до 5 млн лет назад. Исключение здесь составляет самый северный микроблок, расположенный в долине р. Урух севернее устья р. Айгамуга-дон, испытавший подъем – 14 млн лет назад. Выявленный для западной части СФЗ (Г) тренд в омоложении времени апплифта с севера на юг, в восточном блоке выражен менее четко; 4) анализ данных по распределению апплифта в пределах трех СФЗ БК (табл. № 2), показал, что начиная с долины р. Баксан и далее на восток, время апплифта резко омолодилось, что является отражением динамики развития зоны ТПП, обусловленной увеличением в ее пределах объема континентальной коры за счет коллизии и продолжающейся субдукции или за счет плавления пород нижней коры при участии «горячего» линейного мантийного плюма [7]. Отметим, что западная гра-

ница зоны ТПП проходит не через вулкан Казбек, как это считалось ранее [42], а вдоль долины р. Баксан, и что именно к ней приурочены вулкан Эльбрус, деллениты р. Кыртык и Эльджуртинский гранитный массив позднеплейстоценового возраста.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. № 2 и 3 видно, что распределение времени проявления аплифта микроблоков доальпийского фундамента БК сложное, что обусловлено позднеальпийскими преобразованиями в связи с тектонической активизацией, являющейся следствием проявления трех основных процессов: коллизией Аравийской плиты с Большим Кавказом (БК); поддвижением Закавказского массива под структуру БК с раннего палеогена. Эта внутриплитная субдукция вызывает интенсивное сжатие исходной территории БК и образование значительных поперечных разломов [1]; формированием рифтогенной структуры в пределах ТПП [9]. Известно, что стабильность треков деления контролируется температурой. В вертикальной колонне горных пород выделяют три температурно зависимые зоны для апатита [45]. Наиболее глубокая зона с самой высокой температурой, в которой новообразованные треки не могут накапливаться, перекрывается зоной частичной устойчивости, где «выживает» только часть треков. Треки устойчивы в самой верхней (самой холодной) зоне. Мощность зоны частичной устойчивости зависит от геотермического градиента: чем он ниже, тем шире эта зона, чем больше время пребывания апатита в этой зоне, тем больше треков накапливается. Когда такая выборка подвергается поднятию, ФТ возраст не отражает время подъема (т. е. возраст охлаждения ниже температуры закрытия), а является «смешанным» возрастом, потому, что присутствует часть треков, образовавшихся при медленном подъеме до пересечения породой изограды 100 °С. Когда образец быстро поднимается из самой глубокой зоны, ФТ возраст можно интерпретировать как возраст аплифта. Следовательно, в случае несимметричного или несбалансированного аплифта области, будет получен спектр возрастов ФТ датирования. В идеальном случае эти ФТ возраста варьируют от истинных возрастов аплифта до разных степеней смешанных возрастов и до предподъемных возрастов.

Пунктирной линией показан поперечный Эльбрусский разлом, разделяющий, по полученным ФТ данным, территорию БК на два блока с разными историями аплифта и металлогенической специализацией. Так, в восточном блоке локализованы:

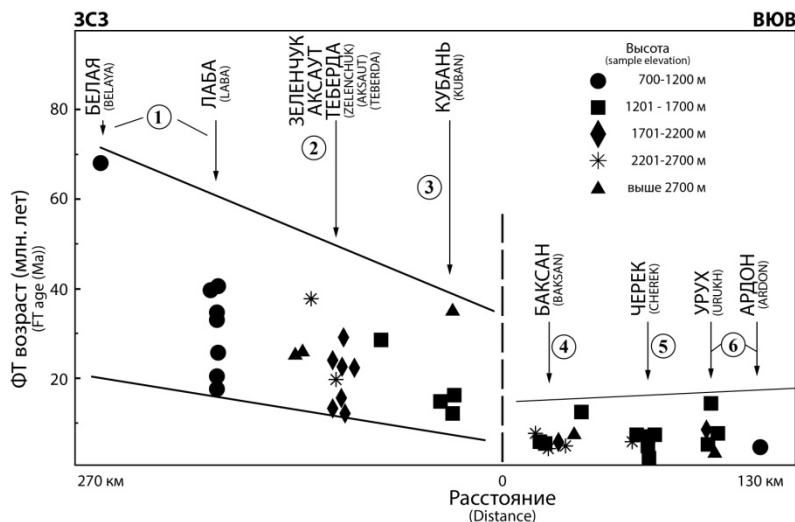


Рис. 2. Зависимость ФТ возраста от продольного положения проб апатитов, отобранных из пород фундамента в десяти районах Большого Кавказа [по 35]

Fig. 2. Dependence of FT age on the longitudinal position of apatite samples taken from basement rocks in ten regions of the Greater Caucasus [after 35]

крупные ранне-среднеюрские полиметаллические месторождения Садонского типа; медно-колчеданное с полиметаллами месторождение Кизил-Дере и раннеюрские золото-мышьяковые с вольфрамом рудопроявления, ассоциирующие с кварцевыми жилами и дайками лиственизированных пикритов (Арсикомская группа); позднеплиоценовые медно-молибден-порфириновые рудопроявления (Сангутидонское, Теплинское и др.). В западном блоке локализованы: крупное вольфрам-молибденовое Тырнаузское месторождение; средние по запасам W месторождения Кти-Тебердинское, ассоциирующее с позднепалеозойскими гранитами, и Больше-Блыбское, ассоциирующее с раннепалеозойскими гранодиоритами и кварцевыми жилами; Тызыльское и Чочу-Кулакское мелкие полиметаллические месторождения, связанные с позднепалеозойскими гранитами; среднедевонские Урупское, Кизилкольское и др. медно-колчеданные с полиметаллами месторождения; Лермонтовское урановое месторождение позднемиоценового возраста, ассоциирующее с лакколитами КМВ. Наиболее древние ФТ возраста аплифта сохранились в гранитоидах фундамента северной части западного блока в СФЗ (Б). В расположенных южнее СФЗ П и Г процессы аплифта фундамента, вызванные надвигами, четко выражены. Полученные значения возраста указывают на то, что поднятие происходило, начиная с олигоцена. Можно предположить, что это поднятие первоначально произошло на всей территории распространения фундамента и что предколлизийные ФТ значения возраста аплифта в восточном блоке были «стерты» коллизийным процессом, широко проявившимся в этой части БК. Коллизия плит в районе Кавказа началась 5 млн лет назад и завершилась усилением деформации 3,5 млн лет назад, что датируется переходом мор-

ских отложений в континентальные в бассейне р. Куры [31] и их последующим деформированием. Было доказано влияние коллизии плит на интенсивное поднятие и его последующее ускорение, что подтверждено гипсометрическими изменениями поверхностей выравнивания [10]. ФТ возраст аплифта в восточном блоке варьирует в пределах от 7 до 4 млн лет, что близко к началу коллизии, поэтому не исключена связь между этими процессами. Отсутствие более древних возрастов по данным ФТ датирования указывает на то, что аплифт, в целом, был сильным, а поднятая часть фундамента пребывала прежде ниже зоны частичного отжига (ЗЧО) или в ее нижней части. Это доказывает, что восточный блок сложен частями фундамента, которые были подняты с более глубоких уровней, где до подъема спонтанные треки не могли сохраниться или их доля незначительна. Ю. Хесс с соавторами [27] показали, что за последние 2 млн лет скорость аплифта составляла 4 мм в год для части фундамента в долине р. Баксан (на границе СФЗ П и Г). Для сравнения приводим данные об увеличении скорости аплифта с 0,07 до 4,4 мм в год в Южном Тибете во временном интервале 20–17 млн лет назад, обусловленной индийско-азиатской коллизией плит [18]. Судя по возрастным различиям, установленным в обоих блоках, развитие Эльбурского разлома и ТПП контролируется динамикой и темпами поднятий в более подвижной (восточный блок) и более жесткой (западный блок) частях фундамента БК. Установленные времена аплифта четко ограничивают время, когда эта система разломов была очень активной. По данным Ю. Хесса с соавторами [26], с Эльбурсским субмеридиональным разломом ассоциируют тела щелочных трахириолитов позднемиоценового возраста (8,3–8,2 млн лет), свидетельствующие о дивергентных движениях плит на начальной стадии развития. Такой процесс может служить объяснением характерного снижения возраста в западном блоке в сторону Эльбурского разлома и ТПП. Начальная стадия континентального рифтогенеза обычно сопровождается такими явлениями, как сильное поднятие окраин рифта, вызывающее быструю эрозию и седиментацию. Возможность тесной связи ФТ возрастов аплифта с периодом раскола континентов вдоль рифтовых окраин континентов была предложена [24] и доказана во многих рифтогенных структурах мира [24; 33; 41]. Как показали [24], ФТ возрасты аплифта обычно увеличиваются по сравнению с рифтовыми краями в глубине континента. Распределение ФТ возрастов в западном блоке БК соответствует этой тенденции. Есть два варианта интерпретации этого эффекта. Согласно модели [37], увеличение возраста аплифта с увеличением расстояния от рифтовой окраины могло происходить из-за все большей части сохранившихся треков с более раннего времени. Это означало бы, что апатиты западного блока, особенно из долин Кубани, Теберды, Аксаута и Большого Зеленчука,

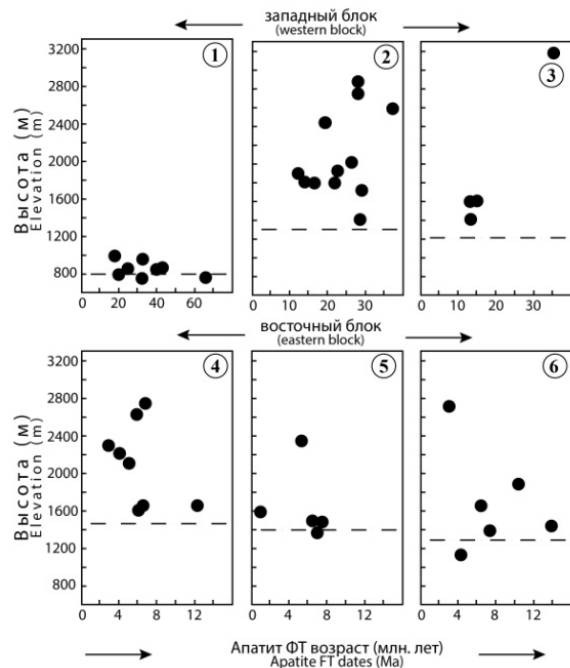


Рис. 3. Зависимость возраста аплифта (по ФТ данным) от высотной отметки места взятия проб апатита [по 35]

Примечания. Горизонтальными пунктирными линиями отмечены средние значения высоты дна долин рек на участках опробования. Следует обратить внимание на то, что шкалы осей возраста меняются слева направо, указывая на разные диапазоны возрастных ФТ дат в двух выделенных блоках, примыкающих к зоне Эльбурского разлома. Самые древние даты, полученные методом ФТ датирования по апатитам (более 30 млн лет) находятся на высотах выше 2 600 м в областях 2 и 3; самые низкие (менее 4 млн лет) – в областях 4 и 5

Fig 3. Dependence of the uplift age (according to FT data) on the altitude of the place where apatite samples were taken [after 35]

Notes. The horizontal dashed lines mark the average values of the bottom of the river valleys at the sampling sites. It should be noted that the scales of the age axes change from left to right, indicating different ranges of age FT dates in the two identified blocks adjacent to the Elbrus fault zone. The earliest dates obtained by FT dating for apatites (more than 30 million years) are at altitudes above 2 600 m in areas 2 and 3; the lowest (less than 4 million years) are in regions 4 and 5.

вероятно, имеют смешанный возраст и являются результатом охлаждения во время несбалансированного, асимметричного подъема с разных глубин. Аналогичный эффект мог быть достигнут при термическом восстановлении исходного возраста апатита (отжиг исходной самопроизвольной плотности треков) до различной степени за счет увеличения теплового потока вдоль развивающейся границы рифтогенной структуры. Для всей исследуемой территории геотермические градиенты не определялись, за исключением Эльджуртинских гранитов в долине р. Баксан, где значения геотермического градиента порядка 43–45 °С/км за последние 2 млн лет были рассчитаны по данным $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ и ФТ датирования [27].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования помогли: 1) установить временной диапазон (от 68 и до 1 млн лет) проявления аплифта в различных СФЗ Большого Кавказа (БК). «Древние» возрасты аплифта, установленные в С-З части западного блока, фиксируют раннеолигоценый этап поднятия, вызванный надвигом Закавказской плиты под структуру БК. Самый «древний» (68 млн лет) аплифт установлен в Бечасынской СФЗ (Б), являющейся наиболее стабильным сегментом исследуемой территории БК и примыкающей к южной границе Скифской платформы; 2) выделить на территории БК два крупных блока: западный (от долины р. Белой на западе и до долины р. Баксан на востоке) и восточный (от долины р. Баксан на западе и до долины р. Фиадон на востоке) с разной историей тектонического развития и металлогенической специализацией; 3) выявить определенную зональность в характере распределения значений времени проявления

аплифта. Особую роль в этом распределении играет динамика Эльбрусского разлома, имеющего черты рифтообразных структур. Этот разлом разделяет территорию БК на два вышеуказанных блока. Более молодой (поздний миоцен-плиоцен) аплифт восточного блока был обусловлен коллизией Аравийской плиты с Малокавказской микроплитой. Поднятие в восточном блоке было настолько быстрым, что обнажений с сохранившимися доколлизийными плотностями «старых» треков уже не обнаружено; 4) обосновать возможную связь возрастов проявления аплифта с крупными тектоническими процессами регионального масштаба (надвиги, коллизия Аравийской плиты с Малокавказской микроплитой); 5) результаты ФТ датирования времени аплифта имеют, кроме научного, и практическое значение, так как полученные данные необходимы при выборе безопасных мест для строительства малых ГЭС в горных регионах, при реализации Федеральной Программы по малым ГЭС.

Благодарности. Работа выполнена по плану НИР ВНЦ РАН при финансовой поддержке НИОКТР КНИО ВНЦ РАН (регистрационный № АААА-А19-119040190054-8) и в рамках Базовой темы Лаборатории петрографии ИГЕМ РАН «Петрология и минерогения магматизма конвергентных и интратиплитных обстановок: история формирования крупных континентальных блоков» Регистрационный № ЕГИСУ НИОКТР 121041500222-4

Acknowledgments. The work was carried out according to the research plan of the VSC RAS with the financial support of the R&D KNIIO VSC RAS (registration No. АААА-А19-119040190054-8) and within the framework of the Basic theme of the Laboratory of Petrography IGEM RAS "Petrology and minerageny of magmatism in convergent and intraplate environments: history formation of large continental blocks" Registration No. EGISU R&D 121041500222-4

ЛИТЕРАТУРА

1. Адамия Ш., Беридзе М.А., Кипиани Я.Р. и др. Проблемы Альпийской геодинамики Большого Кавказа // Геология и минеральные ресурсы Большого Кавказа (под ред. Е.Е. Милановского и Н.В. Короновского). – М.: Наука, 1987. С. 55–61.
2. Баранов Г.И., Островский А.Б. Геологический очерк // Кавказ и Восточный Донбасс. – М.: Наука, 1984. С. 3–28.
3. Белов А.А. Тектоническое развитие Альпийской складчатой области в палеозое. – М.: Наука, 1981. 212 с.
4. Борсук А.М. Мезозойские и кайнозойские магматические формации Большого Кавказа. – М.: Наука, 1979. 300 с.
5. Гамкрелидзе И.П., Гиоргобиани Т.В. Проблемы Альпийских деформаций Большого Кавказа и прилегающих территорий. // Геология и минеральные ресурсы Большого Кавказа (под ред. Е.Е. Милановского и Н.В. Короновского). – М.: Наука, 1987. С. 35–40.
6. Гурбанов А.Г., Аретц И. Критерии вольфрамоносности гранитов позднепалеозойской диорит-гранитной формации, Северный Кавказ // Петрология, 1996. Т. 4. № 4. С. 386–406.
7. Карта рельефа подошвы литосферы СССР и сопредельных территорий. Ред. В.В. Соловьёв. – Л.: ВСЕГЕИ, 1986.
8. Короновский Н.В., Белов А.А. Геология Большого Кавказа, прогнозируемые результаты и проблемы. // Геология и минеральные ресурсы Большого Кавказа (под ред. Е.Е. Милановского и Н.В. Короновского). – М.: Наука, 1987. С. 5–21.
9. Лавёров Н.П., Коваленко В.И., Ярмолюк В.В. и др. Новейший вулканизм Северной Евразии: районирование и обстановки формирования // Докл. РАН, 2006. Т. 410. № 4. С. 498–502.
10. Лукина Н.В. Оценка интенсивности и ритмики четвертичного аплифта Большого Кавказа с помощью анализа поверхностей выравнивания, речных и морских терасс. // Геология и минеральные ресурсы Большого Кавказа (под ред. Е.Е. Милановского и Н.В. Короновского). – М.: Наука, 1987. С. 239–246.
11. Новейший и современный вулканизм на территории России (отв. ред. Н.П. Лавёров). – М.: Наука, 2005. 604 с.
12. Расцветаев Л.М., Бирман А.С., Курдин Н.Н. и др. Парагенетический анализ альпийских дизъюнктивов в районе Минеральных Вод // Геология и минеральные ресурсы Большого Кавказа (под ред. Е.Е. Милановского и Н.В. Короновского). – М.: Наука, 1987. С. 96–106.
13. Хаин В.Е. Региональная геотектоника // том 4. Альпийский Средиземноморский пояс. – М.: Недра. 1984. 378 с.
14. Щербо И.Г. Кайнозойские олистостромы Альпийской складчатой области // Геотектоника, 1983. № 6. С. 90–106.
15. Ярмолюк В.В., Богатиков О.А., Коваленко В.И. Позднекайнозойские трансконтинентальные структуры и магматизм Евро-Африканского сегмента земли и геодинамика их формирования // ДАН, 2004. Т. 395. № 1. С. 91–95.
16. Burchart J. Evaluation of uncertainties in fission-track dating: Some statistical and geochemical problems // Nucl. Tracks, 1981. № 5. P.87–92.
17. Carpenter B.S. National Bureau of Standards, Certificate, Standard Reference Material // I 962, 1974. P. 1–2.
18. Copeland P., Harrison T.M., Kidd W.S.F. et al. Rapid early Miocene acceleration of uplift in the Gangdese Belt, Xizang (Southern Tibet) and its bearing on accommodation mechanism of the India-Asia collision // Earth and Planet. Sci. Lett, 1987. 86. P. 240–252.

19. **Fitzgerald P.G., and Gleadow A.J.W.** Fission-track geochronology, tectonics and structure of the Transantarctic mountains in northern Victoria Land, Antarctica // *Chem. Geol.*, 1988. 73. P.169–198
20. **Franke W.** Variscan plate tectonics in Central Europe - current ideas and open questions // *Tectonophysics*, 1989. 169. P. 222–228.
21. **Gamkrelidze I.P.** Geodynamic evolution of the Caucasus and adjacent areas in Alpine time // *Tectonophysics*, 1986. 127. P.261–275.
22. **Gleadow A.J.W.** Fission track dating method: what are the real alternatives? // *Nucl. Tracks.*, 1981. 5. P. 3–14.
23. **Gleadow A.J.W., Duddy I.R., Green P.F., and Lowering J.F.** Conformed fission track length in apatite: a diagnostic tool for thermal history analysis // *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1986. 94. P.405–415.
24. **Gleadow A.J.W., and Lowering J.F.** Fission track geochronology of King Island, Bass Strait, Australia: Relationship to continental rifting // *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 1978. 37. P. 429–437.
25. **Hanel M., Lippolt H.J., Kober B. et al.** Early Paleozoic age of metagranodiorites in the Main Range Zone of the Greater Caucasus // *Petrology*, 1993b. № 1. P. 429–439.
26. **Hess J.C., Lippolt H.J., and Borsuk A.M.** The Neogene volcanism of the Northern Great Caucasus: isotope and age studies on rift-related alkali rhyolites // *N. J. Mineral. Abh.* 1986. 156. P.63–80.
27. **Hess J.C., Lippolt H.J., Gurbanov A.G., and Michalski I.** The cooling history of the late Pliocene Eldzhurtinskiy granite (Caucasus, Russia) and the thermochronological potential of the grain-size/age relationship // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1993a. 117. P. 393–406.
28. **Hess J.C., Pohl J.R., Kober B., and Borsuk A.M.** Origin and petrogenesis of Miocene A-type trachyrhyolites from the Northern Great Caucasus // *Chem. Erde.* 1993b. 50. P. 185–200.
29. **Hurford A.J., and Green P.F.** The zeta calibration of fission track dating // *Isot. Geosci.*, 1983. 1. P. 285–317.
30. **Hurford A.J., Flisch M., and Jager E.** Unravelling of thermo-tectonic evaluation of the Alps: A contribution from fission track analysis and mica dating // *Alpine tectonics (M.P. Coward, D. Dietrich and R.G. Park, eds., 1 ed.)* // Blackwell Sci. Pub. Oxford, 1989. P.369–398.
31. **Khain V.E., and Milanovski E.E.** Structure tectonique du Caucase d'apres les donnees modernes // *Volume in Honor of Prof. Paul Fallot* // *Mem Soc. Geol. Fr.* 1963. V. II. P. 663–703.
32. **Khain V.E.:** Structure and main stages in the tectono-magmatic development of the Caucasus: an attempt at geodynamic interpretation // *Am. J. Sci.*, 1975, 275-A, Pp.131–156.
33. **Kohn B.P., and Eyal M.** History of uplift of the crystalline basement of Sinai and its relation to opening of the Red sea as revealed by fission track dating of apatites. // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1981. 52. P.129–141.
34. **Kral J., and Burchart J.** Dispersion of uranium in accessory apatite in crystalline rocks and its possible petrogenetic meaning // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1983. 63. P. 34–40.
35. **Kral J., and Gurbanov A.G.** Apatite fission track data from the Great Caucasus pre-Alpine basement // *Chem. Erde*, 1996. 56. P. 177–192.
36. **Lippolt H.J., Leitz M., Wernicke R.S., and Hagedorn B.** (Uranium + thorium) / helium dating of apatite: experience with samples from different geochemical environments // *Chem. Geol. (Isot. Geosc. Sec.)*, 1994. 112. P. 179–191.
37. **Moore M.E., Gleadow A.J.W., and Lowering J.F.** Thermal evolution of rifted continental margins: new evidence from fission tracks in basement apatites from south-eastern Australia // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1986. 78. P. 255–270
38. **Naeser C.W.** The fading of fission tracks in geologic environment: Data from drill holes // *Nucl. Tracks*, 1981. 5. P. 248–250.
39. **Naeser C.W., and Faul H.** Fission track annealing in apatite and sphene // *J. Geophys. Res.*, 1969. 74. P. 705–710.
40. **Nikishin A.M., Ziegler P.A., Panov D.I. et al.** Mesozoic and Cenozoic evolution Scythian Platform – Black Sea – Caucasus domain // *P.A. Ziegler, W. Cavazza and A.H.F. Robinson. S. Grasquin-Soleau (eds.). Pri-Tethys Memoir 6. Pri-Tethys Rift / Wrench Basins and Passive Margins, Memoires du Museum natural d'Histoire naturelle / Paris, 2001. V. 186. P. 296–346.*
41. **Omar G.I., Steckler M.S., Buck W.R., and Kohn B.P.** Fission track analysis of basement apatites at the western margins of the Gulf of Suez rift, Egypt: Evidence for synchronicity of uplift and subsidence // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1989. 94. P. 316–328.
42. **Philip H., Cisternas A., Gvishiani A., and Gorshkov A.** The Caucasus: An actual example of the initial stages of continental collision // *Tectonophysics*. 1989. 161. P. 1–21.
43. **Wagner G.A., and Reimer G.M.** The tectonic interpretation of fission track ages. // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1972. 14. P. 263–268.
44. **Wagner G.A., Reimer G.M., and Jager E.** Cooling ages derived by apatite fission track, mica Rb-Sr and K-Ar dating: the uplift and cooling history of the Central Alps // *Mem. Inst. Geol. Miner. Univers.* 1977. 30. P. 1–27.
45. **Wagner G.A.** Correction and interpretation of fission track ages. // *Lectures in isotope geology*, (E. Jager and J.C. Hunziker eds. 1 ed.). Springer, New York, 1979. P. 170–177.
46. **Wagner G.A.** Apatite fission-track geochrono-thermometer to 60°C: projected length studies // *Chem. Geol.*, 1988. 72. P. 145–153.
47. **Wagner G.A., and Van Den Haute P.** Fission-track dating. (1, ed., Ferdinand Enke Verlag). Stuttgart, 1992. 280 p.