

**ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ И УРОВНЯ ВНЕДРЕНИЯ КАРБОНАТИТОВОГО КОМПЛЕКСА
СИЛЛАЙ ПАТТИ, РАЙОН МАЛАКАНД, СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ ПАКИСТАН:
ограничения, накладываемые данными датирования по следам распада**

Н.У. Хаттак, М. Азиф Хан, Н. Али*, С.М. Аббас, Т.К. Тахиркели

National Centre of Excellence in Geology, University of Peshawar, Pakistan

** Physics Division, PINSTECH, P.O Nilore, Islamabad, Pakistan*

В щелочной магматической провинции Пешаварской долины Северного Пакистана карбонатитовый комплекс силлай патти представлен вторым по величине телом карбонатитов. Оно располагается примерно в 20 км к западу от Малаканда, недалеко от пос. Силлай Патти. Здесь карбонатиты приурочены к разлому и залегают в форме пластовой интрузии, имеющей ССВ—ЮЮЗ простирание и падение на юг. Тело карбонатитов длиной 12 км и мощностью 2—20 м внедрено преимущественно по разлому, разделяющему метаосадки и гранитогнейсы, но локально залегают в метаморфизованных осадочных породах.

Для карбонатитового комплекса силлай патти трековым методом получена возрастная датировка 29.40 ± 1.47 млн лет. Близкое сходство определенного трековым методом возраста апатита и трековых, а также других высокотемпературных радиометрических датировок из этого и близлежащих карбонатитовых комплексов щелочного пояса Северного Пакистана указывает на внедрение карбонатитового комплекса силлай патти в верхние горизонты коры и на последующее исключительно быстрое его охлаждение до близповерхностных температур (< 60 °C), необходимое для полного сохранения треков деления в апатите. Данные датирования свидетельствуют о том, что трековый возраст 29.40 ± 1.47 млн лет является временем внедрения карбонатитовой магмы комплекса силлай патти на близповерхностный уровень коры.

Сравнение скоростей денудации, обусловленной поднятием, с мировыми данными однозначно указывает на наличие в регионе постколлизии обстановки растяжения к югу от главного мантийного разлома в олигоценное время. Этот вывод решительно отвергает идею предшественников о формировании карбонатитовых комплексов на площадях Ло Шилман и Силлай Патти вдоль взбросов в олигоценное время.

Датирование по следам распада, стандартный подход, карбонатит, апатит, возраст образования, Северо-Западный Пакистан.

**RECOGNITION OF THE TIME AND LEVEL OF EMPLACEMENT
OF THE SILLAI PATTI CARBONATITE COMPLEX, MALAKAND DIVISION,
NORTHWESTERN PAKISTAN: constraints from fission-track dating**

N.U. Khattak, M. Asif Khan, N. Ali, S.M. Abbas, and T.K. Tahirkheli

The Sillai Patti carbonatite complex represents the second largest carbonatite body of the Peshawar Plain Alkaline Igneous Province of northern Pakistan. It is situated about 20 km west of Malakand, near Sillai Patti Village. Here, the carbonatite occurs along a fault in the form of a sheet striking in the NNE-SSW direction and dipping southward. The carbonatite body is about 12 km long and 2–20 m thick, predominantly intruded along the faulted contact of metasediments and granite gneiss but locally, within the metasediments.

A fission-track age of 29.40 ± 1.47 Ma was obtained for the Sillai Patti carbonatite complex. Close resemblance of the fission-track apatite age of this study with the fission-track as well as other high-temperature radiometric ages from the same and the neighboring carbonatite complexes of the alkaline belt of northern Pakistan suggests emplacement of the Sillai Patti carbonatite complex at higher crustal level and subsequent extremely fast cooling to near ambient temperatures (< 60 °C) required for the complete retention of fission tracks in apatite. The age data also point out that the fission-track age of 29.40 ± 1.47 Ma of this study is the age of intrusion of the carbonatitic magma of the Sillai Patti carbonatite complex to shallow, near-surface level.

Comparison of the uplift-induced denudation rates of the region with the world data clearly reflects the presence of a postcollisional extensional environment in the region south of the Main Mantle Thrust during Oligocene time. This strongly negates the idea of the earlier workers of emplacement of the carbonatite complexes of the Loe-Shilman and Sillai Patti areas along thrust faults during the Oligocene.

Fission-track dating, age standard approach, apatite, age, Sillai Patti carbonatite, northwestern Pakistan

ВВЕДЕНИЕ

Датирование геологических образцов по следам распада возможно вследствие того, что большинство таких материалов, в том числе минералы и вулканические стекла, содержат уран в следовых количествах, а также благодаря самопроизвольному делению наиболее распространенного изотопа урана ^{238}U [Fleischer et al., 1975; Durrani, Bull, 1987]. За время существования породы в ней непрерывно происходят процессы деления ядер радиоактивных элементов. Результаты такого радиоактивного деления сохраняются и таким образом фиксируют время, прошедшее с момента консервации этих следов. Количество треков деления, образовавшихся в данном объеме геологического образца, зависит от его возраста и общего содержания урана. Поэтому необходимо измерить содержание урана в датированном образце.

По сравнению с другими системами радиометрического датирования метод датирования возраста по следам распада имеет следующие три преимущества. Во-первых, временной диапазон, к которому применим трековый метод, составляет интервал от менее 100 лет до приблизительно 4.5 млрд лет. Второй важной особенностью метода является возможность выполнения измерений по чрезвычайно мелким образцам, например, по осколкам минералов или обломкам природного стекла. Третьим важным достоинством является то, что каждый минерал датировает последнее событие охлаждения с фиксацией определенной температуры (называемой температурой закрытия или температурой удержания треков), ниже которой в нем консервируются треки распада. Поскольку эта температура отличается для разных минералов, появляется возможность измерить скорость остывания породы путем датирования возраста нескольких минералов, каждый из которых имеет собственную температуру удержания треков или температуру закрытия. Если порода остывает быстро, как в случае вулканической породы или близповерхностной интрузии, трековые датировки будут соответствовать этому событию начального остывания [Wagner, 1981; Wagner, Van den haute, 1992]. Если минерал образовался на глубине либо был погружен на большую глубину после своего формирования, трековый возраст отразит этот последний процесс нагревания и охлаждения.

Карбонатитовый комплекс силлай патти располагается в 60 км к северо-востоку от Ло Шилмана, ~ 70 км к северу от г. Пешавар, около 35 км к западу от Даргая и ~ 20 км к западу от Малаканда, вблизи пос. Силлай Патти, в области Малаканд провинции Хибер Пахтунхва (рис. 1). Это пластообразное тело впервые описано в работе [Ashraf, Chaudhry, 1977]. Оно приурочено к падающей на юг плоскости надвига, разделяющей амфиболиты северного крыла и гранитогнейсы и кристаллические сланцы южного крыла [Le Bas, 2008]. Авторы статьи [Le Bas et al., 1987] предположили, что карбонатитовая интрузия

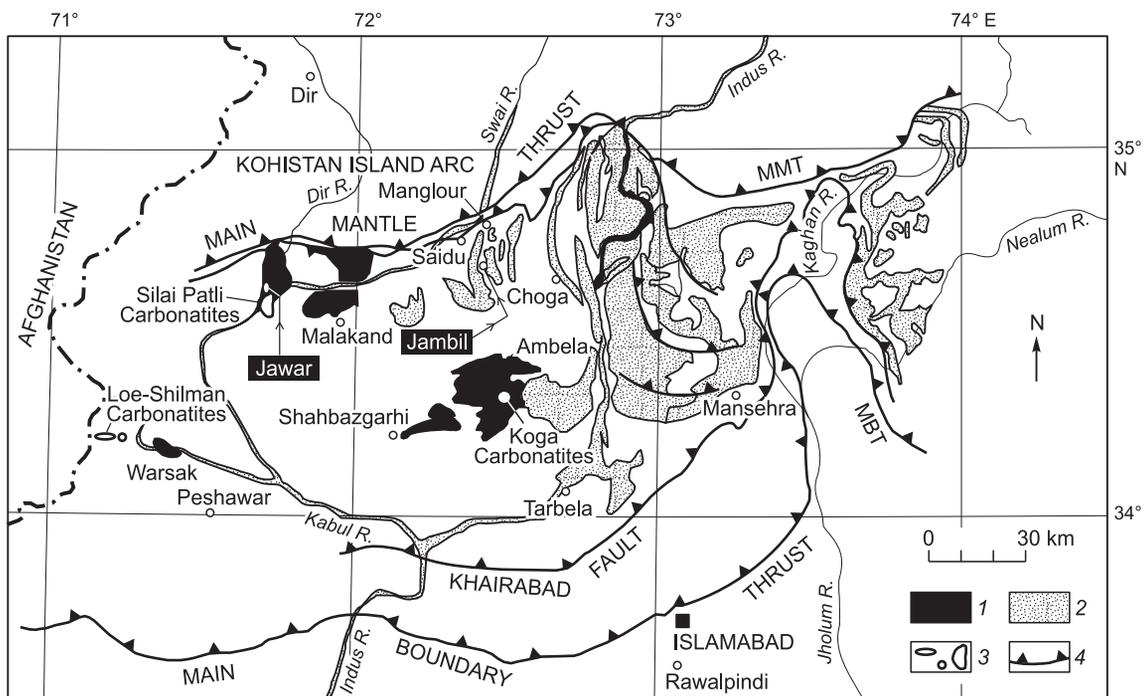


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Северного Пакистана, показывающая положение карбонатитового комплекса силлай патти и других комплексов, а также ассоциирующих щелочных пород щелочного пояса Северного Пакистана, по [Butt, 1983; Khattak et al., 2001].

1, 2 — породы: 1 — щелочные и перщелочные, 2 — известково-щелочные; 3 — карбонатиты; 4 — надвиги.

Силлай Патти внедрилась по плоскости разлома в форме пластового тела длиной 12 км и мощностью 2—20 м. В работе [Butt et al., 1989] утверждается, что так называемая карбонатитовая пластовая интрузия Силлай Патти внедрилась либо в метаосадки, либо по контакту между метаосадками и гранитогнейсами, который, по-видимому, представляет собой надвиг.

Карбонатитовый магматический комплекс силлай патти слагает второе по величине тело карбонатитов щелочного пояса Северного Пакистана. До сих пор спорными остаются вопросы времени внедрения и тектонической обстановки становления (сжатия или растяжения?) карбонатитового комплекса силлай патти.

В статье предпринята попытка решить эти вопросы с использованием трекового метода датирования апатита, выделенного из трех образцов карбонатитов комплекса.

Результаты исследования сравниваются с ранее опубликованными датировками, в том числе с K-Ar датировками биотитов [Le Bas et al., 1987] и трековыми датировками цирконов [Qureshi et al., 1991] из этого карбонатитового тела, а также с другими высокотемпературными радиометрическими датировками минералов, отобранных из близлежащих карбонатитовых и щелочных комплексов, входящих в состав щелочного пояса Северного Пакистана. Тектоническая обстановка интерпретируется в свете скоростей денудации, обусловленной поднятием породных комплексов региона.

РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ

Геологию Северного Пакистана определяет коллизионная тектоника с участием трех тектонических блоков (с юга на север): Индийской плиты, террейна островной дуги Кохистан и Евразийской плиты [Tahirikheli, 1979]. Индская сутура (названная главным мантийным надвигом (ММТ) в Пакистанских Гималаях) отделяет Индийскую плиту от террейна Кохистан, а граница между последним и Евразийской плитой выражается зоной сочленения Шиок или главным Каракорумским надвигом (МКТ). К югу от ММТ северная оконечность Индийской плиты входит в состав внутренней зоны Гималаев [Coward et al., 1988] и сложена преимущественно докембрийскими породами фундамента Индийской плиты с локально встречающимися в зоне надвига останцами осадочных пород нижнепалеозойского до эоценового возраста. Наряду с преобладающими метаморфическими породами внутренняя зона Индийской плиты характеризуется широким развитием магматических пород. Они разделяются на две большие возрастные группы: кембрийские и более древние и пермокарбонатовые и более молодые. Вторая группа магматических пород включает рифтогенные базиты (например, панжальские вулканы и ассоциирующиеся с ними интрузии и дайки), а также интрузивные породы щелочного уклона (нефелиновые сиениты, перщелочные граниты и карбонатиты), из которых последние наиболее распространены в западных частях Индийской плиты к северу от г. Пешавар в лежачем борту ММТ. Авторы работы [Kemper, Jan, 1980] включили щелочные породы в состав щелочной магматической провинции Пешаварской долины (РАИР) третичного возраста. На основе радиометрического датирования [Le Bas et al., 1987] магматиты щелочной магматической провинции Пешаварской долины были разделены на две группы: пермокарбонатового (нефелиновые сиениты и карбонатиты района Кога) и среднетриасового (карбонатиты участков Ло Шилман и Силлай Патти) возрастов. Позже такое двухчленное деление было дополнительно обосновано детальными геологическими данными, а также дополнительными радиометрическими датировками [Qureshi et al., 1991; Tilton et al., 1998; Khattak et al., 2004, 2008]. Обсуждаемый в данной работе карбонатитовый комплекс силлай патти является продуктом более молодого щелочного магматизма, проявленного в РАИР.

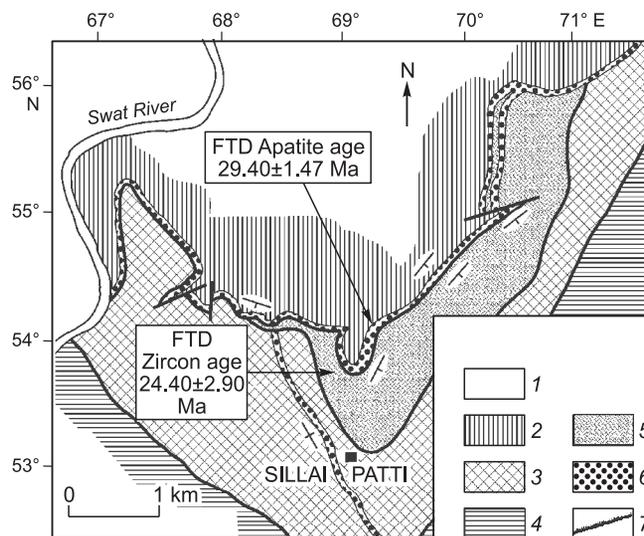
ЛОКАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

Карбонатиты комплекса силлай патти приурочены к плоскости разлома и залегают в виде пластово-образной интрузии, имеющей ССВ—ЮЮЗ простирание и общее падение на юг (рис. 2). В кровле интрузии карбонатиты находятся в контакте преимущественно с малакандскими гранитогнейсами [Le Bas et al., 1987; Butt et al., 1989]. Тело карбонатитов Силлай Патти сложено пластом биотит-апатитовых карбонатитов белого цвета и более поздним пластом амфибол-апатитовых карбонатитов коричневого цвета большей мощности. В непосредственном контакте с перекрывающими гранитогнейсами и в виде ксенолитов метасоматизированных гранитов в карбонатитах обнаружены фениты [Butt et al., 1989; Le Bas et al., 1987].

Согласно [Le Bas, 2008], тела биотитовых карбонатитов, мощностью редко превышающие 20 м, наиболее распространены на востоке, где с ними связывается K-метасоматоз перекрывающих гранитогнейсов. Вблизи контакта с карбонатитами гнейсы приобретают среднекрупнозернистую структуру, сильно рассланцованы, но при этом хрупкие и выветрелые. Начало K-фенитизации отмечается по исчезновению в породе кварца и мусковита, сланцеватость наблюдается по ориентированному расположению кристаллов калишпата, биотита и Fe-оксидов. Размер зерен минералов увеличивается с приближением к контакту, при этом кристаллы калишпата (Or_{88-96}) достигают размера 2×3 см и обычно приурочены к скоплениям мелких зерен альбита (Ab_{99}).

Рис. 2. Геологическая карта карбонатитового комплекса силлай патти, участок Малаканд, по [Le Bas et al., 1987] с изменениями.

1 — незакартированная площадь; 2—4 — сланцы: 2 — пелитовые, 3 — псаммитовые, 4 — гранат-слюдистые; 5 — гранитогнейсы; 6 — карбонаты; 7 — разлом.



Автор статьи [Le Bas, 2008] отмечает, что вблизи контакта между гранитогнейсами и коричневым пластом амфиболовых карбонатитов на участке Силлай Патти карбонатитовые жилы, секущие К-фенитизированные гнейсы, залегают в эгириновых призмах, что указывает на просачивание в этих участках более поздних натровых флюидов. Вблизи карбонатитового пласта гнейсы также перекристаллизованы и приобретают фенитовый до сиенитового состав. В непосредственном контакте с карбонатитами фениты обогащены полевым шпатом и ориентированными призматическими кристаллами и агрегатами темно-зеленого эгирин-авгита. В грубозернистых разностях фенитов альбит и калишпат встречаются в соотношении 2:1, а в более мелкозернистых разностях это отношение возрастает до 3:1. Эти непостоянные соотношения не обнаруживают связи с расстоянием от контакта, но полевые наблюдения позволяют предположить наличие зависимости между расстоянием до контакта и ранними ослабленными зонами в гнейсах, по которым могли мигрировать флюиды [Le Bas, 2008].

Карбонатиты комплекса силлай патти имеют порфиритовую до субпорфиритовую структуру и сложены неравномерно распределенными кальцитом (обычно от 50 до 90 %), арфведсонитом, сидеритом, ильменитом/магнетитом, вермикулитом, апатитом, хлоритом и калишпатом [Кемре, Jan, 1980]. Карбонатитам свойственна тонкосреднезернистая структура. Кальцит встречается в виде ксеноморфных кристаллов, а биотит и амфибол в основном представлены ксеноморфными и гипидиоморфными кристаллами [Butt et al., 1989]. Карбонатит содержит агрегаты встроенных пластинчатых кристаллов кальцита, в которые заключены кристаллы апатита и чешуйки биотита [Le Bas, 2008]. Кристаллы апатита обычно имеют хорошо выраженную огранку и местами полностью включены в кристаллы кальцита [Butt et al., 1989].

Вмещающие породы на участке Силлай Патти в третичное время испытали региональный метаморфизм, по крайней мере, биотитовой фации, но до образования надвигов. Максимальное метаморфическое преобразование породы региона испытали до надвигообразования и, следовательно, до интрузии карбонатитов [Le Bas et al., 1987]. Эта точка зрения также подтверждается выводами авторов [Maluski, Matte, 1984], которые считают, что пик термального барровийского метаморфизма в регионе пришелся на время 42 ± 2 млн л.н. и что образование надвигов произошло после регионального метаморфизма.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Карбонатиты Силлай Патти представляют собой весьма перспективное сырье на редкоземельные элементы. Из вмещающего пластового тела карбонатитов было отобрано и проанализировано 17 проб на содержание редкоземельных элементов с использованием метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS). Результаты анализа представлены в табл. 1, из которой видно, что карбонатиты Силлай Патти содержат (г/т) La (39—795, ср. 519), Ce (100—1354, ср. 915), Pr (9—153, ср. 97), Nd (29—493, ср. 314), Sm (5—52, ср. 35), Eu (2—19, ср. 11), Gd (5—50, ср. 34), Tb (1—6, ср. 4), Dy (4—21, ср. 16), Ho (1—4, ср. 3), Er (2—19, ср. 9), Tm (0—1, ср. 0.9), Yb (2—8, ср. 6) и Lu (0—1, ср. 0.9). Такие достаточно высокие содержания некоторых REE в карбонатитовом теле Силлай Патти заслуживают проведения дополнительных детальных исследований для обоснования его пригодности для промышленной эксплуатации в качестве месторождения редкоземельных элементов.

МЕТОДИКА ДАТИРОВАНИЯ ПО СЛЕДАМ РАСПАДА

Чистые зерна апатита из трех проб карбонатитов Силлай Патти, отобранных приблизительно с одного горизонта, помещались в специальный изолирующий материал. Подготовленные таким способом препараты затем полировались и протравливались в 5%-й азотной кислоте в течение 35 с для выяв-

Таблица 1. Содержания редкоземельных элементов (г/т) в породах карбонатитового комплекса силлай патти

№ пробы	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE
SP-2	586	1063	111	378	43	12	43	5	19	4	10	1	7	1	2283
SP-3	39	100	9	29	5	2	5	1	4	1	2	0	2	0	199
SP-4	134	304	27	111	17	5	16	2	4	1	4	1	3	1	630
SP-5	646	1191	123	413	46	13	17	5	21	4	10	1	7	1	2498
SP-6	636	1042	117	402	43	13	48	4	21	4	10	1	8	1	2350
SP-8	559	941	108	368	40	12	41	5	20	3	9	1	7	1	2115
SP-10	672	1285	135	460	50	14	50	6	23	4	11	1	8	1	2720
SP-13	795	177	16	59	11	2	11	2	7	1	4	1	3	1	1090
SP-15	375	722	78	197	31	9	30	4	14	2	7	1	4	1	1475
SP-17	559	1074	109	359	38	11	39	4	19	3	10	1	8	1	2235
SP-19	309	644	75	197	32	9	31	4	15	2	7	1	5	1	1332
SP-23	535	998	107	368	38	11	38	3	18	3	9	1	7	1	2137
SP-24	256	1005	101	237	35	19	36	2	17	3	8	1	6	1	1727
SP-26	631	1183	127	436	45	13	45	4	20	4	10	1	7	1	2527
SP-30	715	1275	130	433	44	13	46	5	21	4	11	1	8	1	2707
SP-32	765	1354	153	493	52	16	39	6	19	3	12	1	6	1	2920
SP-35	605	1191	123	397	29	9	36	4	18	4	19	0	5	0	2440
Среднее	519	915	97	314	35	11	34	4	16	3	9	0.9	6	0.9	1965

Примечание. Анализ выполнен методом ICP-MS в лаборатории Geo-science Labs, г. Исламабад, аналитик Ч. Шахзад.

ления древних следов деления в зернах апатита. В кристаллах апатита подсчитывались треки самопроизвольного деления ядер (N_i), при этом наведенные треки (N_s) — с использованием внешнего детектора. Вначале подсчитывались треки самопроизвольного деления ядер. Для определения плотности наведенных треков препараты с зернами апатитов Силлай Патти (а также препарат апатитов Дюранго) облучались совместно со стандартной эталонной пробой (SRM-612) в пакистанском исследовательском реакторе-1 (PARR-1) вместе с прикрепленными лексановыми детекторами. Пробы подвергались облучению в течение 200 с на газодиффузионной станции (RS-2) при мощности источника тока 10 МВт. После облучения предварительно отделенные от препаратов и эталонной пробы лексановые детекторы подвергались обработке в 6.5-молярном растворе NaOH в течение 45 мин при 50 °С. После этого лексановые детекторы исследовались в проходящем свете под микроскопом фирмы Цейс при общем увеличении 1000X для определения плотности наведенных треков.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Трековый возраст зерен апатита, выделенного из проб карбонатитов Силлай Патти, рассчитывался методом внешнего детектора (EDM) и методом возрастных стандартов (ζ -метод). В подходе с использованием возрастных стандартов вначале определялся калибровочный коэффициент ζ для апатита Дюранго с использованием процедуры, описанной в работах [Fleischer et al., 1975; Wagner, Van den haute, 1992]. Калибровочный коэффициент ζ рассчитывался по следующему уравнению [Hurford, 1990; Wagner, Van den haute, 1992]:

$$\zeta = \frac{(e^{\lambda} D t_s - 1)}{\lambda_D (\rho_s / \rho_i)_s G \rho_m}, \quad (1)$$

где ζ — калибровочный коэффициент, λ_D — постоянная полного распада урана ($1.55125 \cdot 10^{-10}$ лет $^{-1}$), t_s — возраст используемого стандарта (апатит Дюранго), $(\rho_s / \rho_i)_s$ — отношение количества спонтанных к количеству наведенных треков в стандарте, G — геометрический коэффициент ($G = 0.5$ или 1 в зависимости от геометрии исследуемой поверхности), ρ_m — плотность треков деления в стекле используемого монитора.

После оценки величины калибровочного коэффициента ζ (год \cdot см 2 \cdot тр $^{-1}$) возраст зерен апатита из карбонатитов Силлай Патти определялся по следующему уравнению [Hurford, 1990; Wagner, Van den haute, 1992]:

$$t_u = \frac{1}{\lambda_D} \ln \left[(\lambda_D) \left(\frac{\rho_s}{\rho_i} \right)_u \rho_m G \zeta + 1 \right], \quad (2)$$

где t_u — трековый возраст пробы (лет).

Таблица 2. Анализ возрастного стандарта апатита Дюранго для ζ -калибровки системы с использованием метода внешнего детектора

№ кристалла	Количество полей	Треки самопроизвольного деления		Наведенные треки		ζ	Стандартная ошибка	Общая стандартная ошибка
		N_s	$\rho_s \times 10^4$, тр. · см ²	N_i	$\rho_i \times 10^4$, тр. · см ²			
1	20	308	16.03	1317	68.56	353.17	24.8	25.4
2	20	167	08.69	632	32.90	312.57	28.8	29.2
3	20	506	26.34	1800	93.71	293.81	17.2	17.9
4	20	257	13.38	1041	54.19	334.55	25.4	26.0
5	20	224	11.66	915	47.63	337.38	27.1	27.7
6	20	364	18.95	1458	75.90	330.83	21.8	22.4
7	20	281	14.63	1058	55.08	310.98	22.9	23.4
8	20	233	12.13	928	48.31	328.96	26.1	26.6
9	20	431	22.44	1675	87.20	320.99	19.9	20.5
10	20	611	31.81	2435	126.27	329.16	17.9	18.7
11	20	501	26.10	1923	100.11	317.02	18.6	19.2
12	20	481	25.04	1781	92.72	305.82	18.2	18.9
13	20	501	26.08	1866	97.14	307.63	18.1	18.7
14	20	583	30.35	2251	117.19	318.90	17.7	18.4
Сумма	280	5448	—	21080	78.39	—	—	—
Общее среднее	—	—	—	—	—	319.58	10.8	11.9
Среднее	—	—	20.26	—	78.39	320.88	10.5	11.7

Примечание. Время облучения 200 с. Канал облучения RS-2. Стекланный дозиметр SRM-612 ($^{238}\text{U} = 37.38 \pm 0.3$ г/т, $^{235}\text{U} = 0.2392$ ат. %): $\rho_d \times 10^4 = 76.22 \pm 2.30$ тр. · см², $N_d = 1098$. $P(\chi^2) = 7.2$ %; $\rho_s/\rho_i = 0.257$, $1\sigma = \pm 0.003$. Независимый возраст апатита Дюранго 31.4 ± 0.5 млн лет. $\lambda_d = 1.55125 \cdot 10^{-10}$ год⁻¹. $G = 0.5$.

К пробам апатитов Дюранго и Силлай Патти был применен статистический χ^2 -тест [Galbraith, 1981]. Пробы с обоих участков были обработаны с использованием χ^2 -теста (существовала более чем 5%-я вероятность получения рассчитанного значения χ^2). Для расчета погрешностей определения величины коэффициента ζ и трековых возрастов использовалась процедура, предложенная в [Wagner, Van den haute, 1992].

Для апатита Дюранго с помощью процедуры ручного расчета получены средние и общие средние значения коэффициента ζ , равные соответственно 320.88 ± 11.7 и 319.58 ± 11.9 год · см² · тр⁻¹. Рассчитанные вручную значения ζ для отдельных зерен апатита Дюранго, а также его средние и общие средние значения приведены в табл. 2.

Подстановкой общего среднего значения $\zeta = 319.58 \pm 11.9$ год · см² · тр⁻¹ в уравнение возраста [Hurford, 1990; Wagner, Van den haute, 1992] для карбонатита Силлай Патти с использованием процедур ручного расчета получен средний возраст 29.41 ± 1.42 млн лет и общий средний возраст 29.40 ± 1.47 млн лет. Полученные таким способом значения возрастов отдельных кристаллов апатита, а также среднего и общего среднего возраста всех трех препаратов апатита из карбонатита Силлай Патти приведены в табл. 3.

ОБСУЖДЕНИЕ

Для объяснения времени и природы внедрения карбонатитов и ассоциирующих с ними щелочных пород в пределах щелочного пояса Северного Пакистана две разные группы исследователей предложили две альтернативные концепции, связанные с однократным или многократным проявлением карбонатитового магматизма на данной территории. Вопрос о преобладающей тектонической обстановке в пределах рассматриваемой провинции во время внедрения щелочных интрузивов также остается дискуссионным. Одна группа исследователей считает, что внедрение щелочных интрузий происходило вдоль надвигов в обстановке сжатия, а другая полагает, что это внедрение должно было происходить вдоль рифтовых зон в обстановке обычного образования разломов.

Многократное проявление карбонатитового магматизма. Авторы работ [Le Bas et al., 1987; Tilton et al., 1998] считают, что все карбонатиты и ассоциирующие с ними щелочные породы щелочного пояса Северного Пакистана сформировались в результате, по крайней мере, двух магматических собы-

Таблица 3. Трековые возраста апатита из карбонатита комплекса силлай патти, определенные с использованием метода внешнего детектора и калибровочного коэффициента ζ

№ пробы/№ кристалла	Количество полей	Самопроизвольные треки		Наведенные треки		Возраст, млн лет
		$\rho_s \times 10^4$, тр. · см ²	N_s	$\rho_i \times 10^4$, тр. · см ²	N_i	
SPN-3/1	12	20.12	232	82.17	947	29.77 ± 2.61
SPN-3/2	12	29.93	345	119.30	1375	30.49 ± 2.35
SPN-3/3	12	30.19	348	129.80	1496	28.27 ± 2.16
SPN-3/4	12	21.87	252	87.81	1012	30.26 ± 2.58
SPN-3/5	12	25.77	297	108.89	1255	28.76 ± 2.31
SPN-3/6	12	28.33	327	115.75	1334	29.79 ± 2.33
SPN-3/8	12	34.36	396	142.73	1645	29.25 ± 2.16
SPN-3/9	12	29.59	341	121.91	1405	29.49 ± 2.27
SPN-3/10	12	28.20	325	112.80	1300	30.38 ± 2.38
SPN-3/12	12	26.98	311	108.81	1254	30.13 ± 2.39
SPN-3/15	12	27.16	313	110.11	1269	29.97 ± 2.38
SPN-3/16	12	34.45	397	143.60	1655	29.15 ± 2.15
SPN-7/1	12	17.61	203	74.62	860	28.68 ± 2.63
SPN-7/3	12	22.56	260	97.18	1120	28.21 ± 2.37
SPN-7/4	12	20.82	240	87.20	1005	29.02 ± 2.51
SPN-7/5	12	31.24	360	128.24	1478	29.60 ± 2.25
SPN-7/8	12	27.77	320	112.36	1295	30.03 ± 2.37
SPN-7/9	12	18.57	214	77.83	897	28.99 ± 2.61
SPN-9/1	12	16.49	190	72.10	831	27.79 ± 2.60
SPN-9/5	12	23.43	270	99.52	1147	28.60 ± 2.37
SPN-9/6	12	20.56	237	85.29	983	29.30 ± 2.54
SPN-9/7	12	28.02	323	111.84	1289	30.45 ± 2.39
SPN-9/8	12	15.36	177	65.16	751	28.64 ± 2.76
Сумма	276	—	6678	104.13	27603	—
Общий средний	—	—	—	—	—	29.40 ± 1.47
Среднее	—	25.19	—	104.13	—	29.41 ± 1.42

Примечание. Время облучения 200 с. Канал облучения RS-2. Стекланный дозиметр SRM-612 — $\rho_d = 76.22 \pm \pm 2.30$ тр. · см², $N_d = 1098$. $P(\chi^2) = 99.9\%$; $\rho_s/\rho_i = 0.242$, $1\sigma = \pm 0.001$. Возрасты рассчитаны с использованием коэффициента $\zeta = 319.58 \pm 11.9$ год · см² · тр⁻¹.

тий, произошедших соответственно в карбоновое и третичное время (олигоцене). Они полагают, что внедрение карбонатитов комплекса кога произошло в карбоновую эпоху щелочного магматизма, а карбонатитовые комплексы ло шилман и силлай патти образовались в третичный (олигоценовый) этап щелочного магматизма. Предположение М.Дж. Ле Баса с соавторами [Le Bas et al., 1987] основано на K-Ar датировке биотита из карбонатитов Силлай Патти и Ло Шилман, составляющей 31 ± 2 млн лет, и Rb-Sr датировках 315 ± 15 млн лет и 297 ± 4 млн лет, выполненных соответственно по валовым анализам сиенита и ийолита из магматического комплекса кога. Кроме того, они утверждали, что щелочные комплексы Северного Пакистана не связаны с гималайской коллизией и что, по крайней мере, в случае карбонатитовых комплексов ло шилман и силлай патти третичного (олигоценового) возраста отсутствуют свидетельства рифтообразования. В статье [Tilton et al., 1998] на основе изотонных данных выдвинуто предположение о многоэтапном формировании щелочных и карбонатитовых интрузий на территории Северного Пакистана, а также описана специфическая особенность синорогенных карбонатитов районов Ло Шилман и Силлай Патти, проявляющаяся в их весьма низких отрицательных значениях ϵ_{Nd} и высоких отношениях $^{87}Sr/^{86}Sr$ в отличие от положительных значений ϵ_{Nd} и низких отношений $^{87}Sr/^{86}Sr$, характерных для доорогенных карбонатитов комплекса кога.

В работах [Le Bas et al., 1987; Mian, Le Bas, 1988] отмечалось, что карбонатиты Ло Шилман внедрялись по взбросу Варшак, имеющему падение на север и разделяющему палеозойские метаосадки и долериты на севере и докембрийские сланцы и филлиты на юге. А.А. Куреши с соавторами [Qureshi et al., 1991] также считают, что пластовая интрузия карбонатитов Силлай Патти внедрилась примерно в

середине олигоцена по надвигу, связанному с Индо-Евразийской плитной коллизией. Г.Р. Тилтон с соавторами [Tilton et al., 1998] придерживались концепции внедрения карбонатитовых интрузий Ло Шилман и Силлай Патти по надвиговым разломам примерно 30 млн л.н. (в олигоцене) в постколлизивной обстановке.

Однократное проявление карбонатитового магматизма. Р.А.К. Тахирхели [Tahirkheli, 1980] отмечал существование рифтовой зоны полукруглой формы, протягивающейся от площади Ло Шилман вблизи пакистано-афганской границы на западе до области Тарбела, расположенной в восточной части северного фланга Пешаварской долины. Он считал, что щелочной магматизм в пределах рифтовой зоны проявился в период между средним и верхним эоценом. Д.Р. Кемп и М.К. Ян [Kemp, Jan, 1980] полагают, что Пешаварская равнина представляет собой рифтовую долину неправильной формы, протягивающуюся с востока на запад более чем на 200 км. Они предположили, что ось рифта протягивается от Ло Шилман до Малаканда и далее на восток. Кроме того, они доказывали, что щелочной магматизм в пределах Пешаварской долины имел место в результате литосферного куполообразования, вызванного мантийными плюмами в пределах рифтовой системы. Эти плюмы образовались в ответ на возникновение напряжений рельефа или снятие напряжения сжатия, последовавшего за первоначальным столкновением плит, имевшим место, вероятно, в конце мела или в начале третичного периода. Позже была выдвинута идея [Butt et al., 1989; Jan, Karim, 1990] об однократном проявлении щелочного и карбонатитового магматизма в Северном Пакистане в предгималайское время. Согласно этим авторам, все карбонатитовые комплексы и ассоциирующие с ними щелочные породы Северного Пакистана образовались в один магматический этап во время пермокарбонатового рифтогенеза и распада суперконтинента Гондвана. Представление об однократном магматическом эпизоде поддерживается наличием эпидота в породах карбонатитового комплекса силлай патти. К.А. Батт с соавторами [Butt et al., 1989] полагают, что карбонатиты Силлай Патти и ассоциирующие с ними вмещающие породы региона были метаморфизованы до зеленосланцевой или эпидот-амфиболитовой фации в ходе регионального метаморфизма гималайской орогении, а К-Аг датировка 31 ± 2 млн лет, полученная по биотитам двух главных карбонатитовых комплексов, дает пермокарбонатовый возраст. Эти исследователи сопоставляли данные породы с карбонатитами карбонатового возраста (когскими карбонатитами) региона. В поддержку этого представления в работе [Jan, Karim, 1990] приводятся свидетельства об отсутствии щелочных пород и ассоциирующих с ними карбонатитов в постпалеозойской магматической серии. Они коррелировали карбонатиты Ло Шилман и Силлай Патти с щелочными породами участков Амбела, Малаканд и Шева-Шахбазгархи позднепалеозойского возраста.

В настоящее время карбонатовый этап карбонатитового магматизма в пределах этой части Северного Пакистана безоговорочно признается всеми предыдущими исследователями. Однако существуют значительные расхождения в отношении третичного (олигоценового) этапа щелочного и карбонатитового магматизма в пределах щелочного пояса Северного Пакистана.

А.А. Куреши с соавторами [Qureshi et al., 1991] привели трековый возраст 32.1 ± 1.9 млн лет, определенный по циркону из карбонатита Силлай Патти. В работе [Anczkiewicz et al., 2001] продатирована единичная проба циркона из дайки щелочных гранитов, секущей гранитогнейсы сватской серии палеозойского возраста, и получен средний $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возраст 29.26 ± 0.12 млн лет. Также приведена конкордантная Аг-Аг датировка мусковита из той же дайки, составляющая 28.4 ± 1.1 млн лет. Данные исследователи рассматривали эти щелочные дайки в составе РАИР. Н.У. Хаттак с соавторами [Khattak et al., 2004] получили трековый возраст 29.3 ± 1.2 млн лет, определенный по апатиту из карбонатитового тела Жамбил, залегающего примерно в 10 км на северо-восток от Мингоры в районе Нижний Сват. В работе [Khattak et al., 2008] приводится трековая датировка 30.0 ± 1.5 млн лет, полученная по апатиту из лошилманских карбонатитов Эйдженси вблизи пакистано-афганской границы.

Предыдущие исследователи [Wagner, Van den haute, 1992; Eby et al., 1995; Hasebe et al., 2000; Armstrong et al., 2003] отмечали, что конкордантные трековые возрастные датировки интрузивного тела, полученные по циркону и апатиту, позволяют предположить быстрое остывание интрузивного тела от температур закрытия изотопных систем циркона и апатита. Таким образом, данные датировки должны представлять возраст формирования рассматриваемого интрузивного тела. Соответствие между трековыми датировками, установленными по циркону и апатиту, и К-Аг датировками представляет дополнительный аргумент в пользу быстрого остывания интрузии.

Средние и объединенные трековые датировки 29.41 ± 1.42 и 29.40 ± 1.47 млн лет, соответственно полученные по апатиту из карбонатитов участка Силлай Патти, согласуются с К-Аг датировкой биотита 31 ± 2 млн лет [Le Bas et al., 1987] и трековой датировкой 32.1 ± 1.9 млн лет [Qureshi et al., 1991], определенной по циркону из того же пластообразного тела карбонатитов. Такое близкое соответствие трековых датировок апатита (АФТ), трековых датировок циркона (ЗФТ) и К-Аг датировок биотита для пластообразной карбонатитовой интрузии Силлай Патти позволяет уверенно считать, что все они фиксируют возраст становления этого карбонатитового комплекса. Соответствие возрастов, порфириновые структу-

ры карбонатитов и моделирование возраста апатита трековым методом указывают на быстрое остывание интрузивного тела от температур внедрения. Если принять величину геотермического градиента $\sim 35 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{км}^{-1}$ и температуру после внедрения интрузии около $60 \text{ }^\circ\text{C}$, на что указывают данные трекового моделирования, то глубина внедрения интрузии должна была составлять от 1.0 до 1.5 км [Armstrong et al., 2003].

Трековые датировки апатита с участка Силлай Патти также согласуются с $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ датировкой циркона 29.26 ± 0.12 млн лет и Ar-Ar возрастом мусковита 28.4 ± 1.1 млн лет из дайки щелочных гранитов участка Нижний Сват [Anczkiewicz et al., 2001], K-Ar датировкой биотита 31 ± 2 млн лет из карбонатита участка Ло Шилман [Le Bas et al., 1987], трековой датировкой 29.3 ± 1.2 млн лет, полученной по апатиту из жамбилского карбонатита участка Нижний Сват [Khattak et al., 2004] и трековой датировкой 30.0 ± 1.5 млн лет, установленной по апатиту из карбонатита Ло Шилман [Khattak et al., 2008]. Близкое сходство определенных в данной работе трековых датировок апатита с трековыми и другими высокотемпературными радиометрическими датировками, полученными с других участков щелочного пояса Северного Пакистана, также убедительно подтверждает гипотезу о внедрении карбонатитового интрузивного комплекса силлай патти на близповерхностные уровни коры (малые глубины внедрения) и относительно быстром его охлаждении до близповерхностных температур.

Согласно [Harrison, 1994], величина нормальной скорости эрозии в горных районах обычно составляет $0.235\text{—}0.212 \text{ мм} \cdot \text{год}^{-1}$, а для обеспечения существенно больших скоростей денудации необходима обстановка тектонического растяжения или расслаивания литосферы. На базе трековых датировок циркона Н.У. Хаттак с соавторами [Khattak et al., 2001] рассчитали средние скорости денудации гранитов Мансера и Силлай Патти, обусловленной воздыманием района, за период от 25 млн л.н. до настоящего времени, которые составили соответственно 0.26 ± 0.01 и $0.27 \pm 0.03 \text{ мм} \cdot \text{год}^{-1}$. Эти данные свидетельствуют о том, что породы двух комплексов, распространенные к югу от ММТ, за последние примерно 25 млн лет испытали приблизительно одинаковую историю денудации, вызванной воздыманием этого участка земной коры. Для района, расположенного к югу от главного мантийного надвига, для периода 25—15 млн лет в работе [Zeitler et al., 1982] рассчитана средняя скорость денудации, вызванной воздыманием коры, которая превышает вышеуказанное значение на $0.70 \text{ мм} \cdot \text{год}^{-1}$. Приведенные всеми этими исследователями значения скорости денудации для района, расположенного к югу от ММТ, значительно превышают диапазон нормальных скоростей эрозии $0.235\text{—}0.212 \text{ мм} \cdot \text{год}^{-1}$ [Harrison, 1994]. Это однозначно свидетельствует о существовании обстановки растяжения в районе южнее ММТ в олигоценовое время, что явилось благоприятной предпосылкой для развития щелочного магматизма в регионе. Этот вывод решительно отвергает представление о формировании карбонатитовых комплексов на площадях Ло Шилман и Силлай Патти вдоль взбросов в олигоцене. Наш вывод о реактивизации в олигоцене ММТ как нормального разлома после формирования чешуйчатой структуры района с перекрытием отдельных блоков пород также подтверждается работами некоторых предыдущих исследователей [Zeitler et al., 1993; Burg et al., 1996; Anczkiewicz et al., 2001]. Т.К. Зейтлер с соавторами [Zeitler et al., 1993] временем реактивизации главного мантийного разлома как нормального разлома считали интервал от 25 до 20 млн лет, когда террейн Кохистан сместился на север относительно Индийской плиты вслед за главной фазой регионального метаморфизма и накоплением взбросов в пределах Индийской плиты. Авторы работы [Anczkiewicz et al., 2001] временем нормального сбросообразования считают интервал 29—15 млн лет, который они сопоставляют с растяжением вдоль Южно-Тибетской системы обособления (STDS) на северном борту Гималайского хребта.

Наряду с карбонатитовым комплексом силлай патти, карбонатитовый комплекс ло шилман обычно рассматривается как сформировавшийся в обстановке сжатия. Многие ученые [Le Bas et al., 1987; Mian, Le Bas, 1988; Qureshi et al., 1991; Tilton et al., 1998] отмечали, что карбонатиты комплекса ло шилман внедрялись по взбросу Варшак, имеющему падение на север и разделяющему палеозойские метасадки и долериты на севере и докембрийские сланцы и филлиты на юге. По нашему мнению, разлом с северным падением на участке Ло Шилман не может быть надвигом, поскольку в его висячем крыле (северный бок) залегают более молодые палеозойские породы, а лежащее крыло (южный бок) сложено более древними докембрийскими сланцами. Такая ситуация возможна только в том случае, если допустить, что этот разлом является падающим на север нормальным сбросом, вдоль которого лежащий бок на юге был приподнят и смещен на юг относительно висячего бока, расположенного на северной стороне разлома.

ВЫВОДЫ

1. Трековая датировка 29.40 ± 1.47 млн лет, полученная по апатиту из карбонатита комплекса силлай патти, согласуется с трековыми и другими высокотемпературными радиометрическими датировками минералов, отобранных из того же пластообразного тела карбонатитов. Такая согласованность датировок карбонатитов на участке Силлай Патти позволяет уверенно считать, что все они отвечают

возрасту становления карбонатитового комплекса приблизительно 30 млн лет. Соответствие возрастов также свидетельствует, что глубина внедрения карбонатитовой магмы составляла от 1.0 до 1.5 км и что вскоре после внедрения магма очень быстро остыла до близповерхностных температур.

2. Трековая датировка 29.40 ± 1.47 млн лет также согласуется с трековыми и другими высокотемпературными радиометрическими датировками карбонатитов и щелочных гранитов прилегающих территорий. Это соответствие показывает, что карбонатитовый и щелочной магматизм третичного (олигоценного) возраста проявился на весьма обширной территории, охватывающей проявления карбонатитового комплекса ло шилман вблизи пакистано-афганской границы на западе и тела карбонатитов жамбилского комплекса в провинции Нижний Сват на востоке.

3. Наличие порфиритовых и субпорфиритовых структур в пластообразном теле карбонатитов свидетельствует о внедрении интрузии карбонатитов(ой) магм(ы) в районе Силлай Патти на близповерхностные уровни земной коры. За короткий интервал времени после внедрения магма быстро затвердела.

4. Карбонатитовый магматизм в олигоцене проявился вдоль разрывных дислокаций в обстановке растяжения, а не вдоль надвиговых дислокаций, как предполагали некоторые исследователи-предшественники.

Авторы признательны доктору С.В. Назиру из Геологической службы США за предоставление возрастных стандартов для определения возраста апатитов Дюранго, благодаря которым стало возможным выполнение данного исследования.

ЛИТЕРАТУРА

Anczkiewicz R., Oberli F., Burg J.P., Villa I.M., Gunther D., Meir M. Timing of normal faulting along the Indus Suture in Pakistan Himalaya and a case of major $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$ initial disequilibrium in zircon // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2001, v. 191, № 1—2, p. 101—114.

Armstrong P.A., Ehlers T.A., Chapman D.A., Farley K.A., Kamp P.J.J. Exhumation of the central Wasatch mountains, Utah: 1. Patterns and timings of exhumation deduced from low-temperature thermochronology data // *J. Geophys. Res.*, 2003, v. 108, № B3, p. 2172, doi: 10.1029/2001JB001708.

Ashraf M., Chaudry M.N. A note on the discovery of carbonatites from Malakand District // *Geol. Bull. Punjab Univ.*, 1977, v. 14, p. 91—94.

Burg J.P., Chaudhry M.N., Ghazanfar M., Anczkiewicz A., Spencer D.A. Structural evidence for back sliding of the Kohistan arc in the collisional system of northwestern Pakistan // *Geology*, 1996, v. 24, p. 739—742.

Butt K.A. Petrology and geochemical evolution of Lahor pegmatoid/granite complex, northern Pakistan, and genesis of associated Pb-Zn-Mo and U mineralization // *Granites of Himalayas, Karakoram and Hindukush* / Ed. F.A. Shams. Inst. Geol. Punjab Univ. Lahore, 1983, p. 309—322.

Butt K.A., Arif A.Z., Ahmed J., Ahmed A., Qadir A. Chemistry and petrography of the Sillai Patti carbonatite complex, North Pakistan // *Geol. Bull. Univ. Peshawar*, 1989, v. 22, p. 197—215.

Coward M.P., Butter R.W.H., Chandar A.P., Graham R.H., Izatt C.N., Khan M.A., Knipe R.J., Treloar P.J., Williams M.P. Folding and imbrication of the Indian crust during Himalayan collision // *Phil. Transactions Royal Soc. London*, 1988, v. 326, p. 89—116.

Durrani S.A., Bull R.K. Solid state nuclear track detection: principles, methods and applications. Oxford, Pergamon Press, 1987, 50 p.

Eby G.N., Tice M.R., Krueger H.L., Ewing W., Faxon E.H., Woolley A.R. Geochronology and cooling history of the northern part of Chilwa Alkaline Province, Malawi // *J. Afr. Earth Sci.*, 1995, v. 20, № 3—4, p. 275—288.

Fleischer R.L., Price P.B., Walker R.M. Nuclear tracks in solids: principles and applications. Berkeley, University of California Press, 1975, 605 p.

Galbraith R.F. On statistical models for fission-track counts // *Math. Geol.*, 1981, v. 13, p. 417—431.

Harrison C.G.A. Rates of continental erosion and mountain building // *Geologische Rundschau*, 1994, v. 83, p. 431—447.

Hasebe N., Suwargadi B.W., Nishimura S. Fission track ages of the Omine acidic rocks, Kii Peninsula, Southwest Japan // *Geochem. J.*, 2000, v. 34, p. 229—235.

Hurford A.J. Standardization of fission track dating calibration: recommendation by the Fission Track Working Group of the IUGS Sub-commission on Geochronology // *Chem. Geol. (Isote. Geosci. Sect.)*, 1990, v. 80, p. 171—178.

Jan M.Q., Karim A. Continental magmatism related to Late Palaeozoic-Early Mesozoic rifting in northern Pakistan and Kashmir // *Geol. Bull. Univ. Peshawar*, 1990, v. 23, p. 1—25.

- Kempe D.R.C., Jan M.Q.** The Peshawar Plain Alkaline Igneous Province, NW Pakistan // *Geol. Bull. Univ. Peshawar*, 1980, v. 13, p. 71—77.
- Khattak N.U., Qureshi A.A., Hussain S.S., Akram M., Mateen A., Khan H.A.** Study of the tectonic uplift history of the Sillai Patti granite gneiss, Pakistan: constraints from zircon fission-track dating // *J. Asian Earth Sci.*, 2001, v. 20, № 1, p. 1—8.
- Khattak N.U., Akram M., Ullah K., Qureshi A.A., Qureshi I.E.** Recognition of emplacement time of Jambil carbonatites from NW Pakistan: constraints from fission-track dating of apatite using age standard approach (the ζ method) // *Geol. Bull. Univ. Peshawar*, 2004, v. 37, p. 127—138.
- Khattak N.U., Akram M., Khan M.A., Khan H.A.** Emplacement time of the Loe-Shilman carbonatite from NW Pakistan: constraints from fission-track dating // *Nucl. Tracks & Radiat. Meas.*, 2008, v. 43, S313—S318.
- Le Bas M.J.** Fenites associated with carbonatites // *Canad. Miner.*, 2008, v. 46, p. 915—932.
- Le Bas M.J., Mian I., Rex D.C.** Age and nature of carbonatites emplacement in North Pakistan // *Geol. Rund.*, 1987, v. 76, № 2, p. 317—323.
- Maluski H., Matte P.** Age of Alpine tectono-metamorphic events in northwestern Himalaya (North Pakistan) by $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ method // *Tectonics*, 1984, v. 3, p. 1—18.
- Mian I., Le Bas M.J.** Feldspar solid solution series in fenites from Loe-Shilman carbonatite complex, NW Pakistan // *Geol. Bull. Univ. Peshawar*, 1988, v. 21, p. 71—83.
- Qureshi A.A., Butt K.A., Khan H.A.** Emplacement time of Salai Patai carbonatite, Malakand, Pakistan, from fission-track dating of zircon and apatite // *Nucl. Tracks & Radiat. Meas.*, 1991, v. 18, № 3, p. 315—319.
- Tahirkheli R.A.K.** Geology of Kohistan and adjoining Eurasian and Indo-Pakistan continents, Pakistan // *Geol. Bull. Univ. Peshawar (Spec. Issue)*, 1979, v. 11, p. 1—30.
- Tahirkheli R.A.K.** Major tectonic scars on Peshawar vale and adjoining areas, and associated magmatism // *Geol. Bull. Univ. Peshawar*, 1980, v. 13, p. 39—46.
- Tilton G.R., Bryce J.G., Mateen A.** Pb-Sr-Nd isotope data from 30 and 300 Ma collision zone carbonatites in Northwest Pakistan // *J. Petrol.*, 1998, v. 39, № 11—12, p. 1—10.
- Wagner G.A.** Fission track ages and their geological interpretation // *Nucl. Tracks Radiat. Meas.*, 1981, v. 5, p. 15—25.
- Wagner G.A., Van den haute P.** Fission-track dating. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1992, 285 p.
- Zeitler P.K., Tahirkheli R.A.K., Naeser C.W., Johnson N.M.** Unroofing history of a suture zone in the Himalaya of Pakistan by means of fission-track annealing ages // *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 1982, v. 57, p. 227—240.
- Zeitler P.K., Chamberlain C.P., Smith H.A.** Synchronous anatexis, metamorphism, and rapid denudation at Nanga Parbat (Pakistan Himalaya) // *Geology*, 1993, v. 21, p. 347—350.

*Рекомендована к печати 21 октября 2011 г.
Н.Л. Добрецовым*

*Поступила в редакцию
18 мая 2011 г.*