

Термохронология северной части Верхоянского складчато-надвигового пояса по данным трекового датирования апатита

Д.А. Васильев^{1,*}, А.В. Прокопьев^{1,**}, А.К. Худолей²,
В.Б. Ершова², Г.Г. Казакова³, Е.В. Ветров⁴

¹Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³Всероссийский научно-исследовательский геологический институт
им. А.П. Карпинского, Санкт-Петербург

⁴Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья,
Новосибирск, Россия

*juorankhay@mail.ru,

**prokopiev@diamond.ysn.ru

Аннотация. Представлены результаты термохронологических исследований, проведенных во фронте северной части Верхоянского складчато-надвигового пояса и Приверхоянского краевого прогиба с целью установления основных возрастных рубежей палеоподнятий и возможной их связи с тектоническими событиями. На основе метода трекового датирования апатита, извлеченного из двенадцати образцов песчаников пермского–эоценового возраста, было уверенно установлено термотектоническое событие, произошедшее 77–57 млн лет назад (кампан–палеоцен), сопровождавшееся высокими скоростями денудации. Предполагается, что в это время происходила заключительная стадия формирования фронта Хараулахского антиклинория. В эоценовых отложениях Кенгдейского грабена преобладают зерна апатита, имеющие трековые возрасты около 73,6±3,5 млн лет, близкие к этому термохронологическому событию. Вероятно, при накоплении этих толщ происходил размыв поднимающегося горно-складчатого сооружения. Предполагается, что на исследованной территории происходил еще ряд термотектонических событий 110–55, 95–90, 50–25, 45–40 млн лет назад.

Ключевые слова: трековое датирование апатита, средние длины треков, Хараулахский антиклинорий, Приверхоянский краевой прогиб, Кенгдейский грабен, Верхоянский складчато-надвиговой пояс, денудация, поднятие, охлаждение.

Благодарности. Исследование выполнено по плану НИР ИГАБМ СО РАН (проект 0381-2019-0001) (трековое датирование в лаборатории Apatite to Zircon, Inc и интерпретация данных по Хараулахскому антиклинорию) и при поддержке гранта РНФ № 17-17-01171 (трековое датирование в лаборатории университета Гента и интерпретация данных по Приверхоянскому прогибу).

Введение

Были проведены термохронологические исследования в различных структурах фронта северной части Верхоянского складчато-надвигового пояса (ВСНП) и Приверхоянского краевого прогиба с целью установления основных возрастных рубежей палеоподнятий и возможной их связи с тектоническими событиями. Для трекового датирования низкотемпературной термохронологии были отобраны двенадцать образцов песчаников пермского–эоценового возраста в приустьевой части р. Лена (от мыса Крестях до

мыса Чекуровка), вдоль р. Эекит (от места впадения р. Сололи в р. Тас-Эекит до устья), а также в среднем течении р. Кенгдей. В тектоническом плане эти районы относятся, с севера на юг, к Центрально-Хараулахской синклинали, Ют-тяхской антиклинали, Тасаринской синклинали и Чекуровской антиклинали (рис. 1) [1–3]. В работе использовались также песчаники, отобранные в прилегающей с запада северной части Приверхоянского краевого прогиба, отделяющего Сибирскую платформу от ВСНП, а также из эоценовых отложений Кенгдейского грабена.

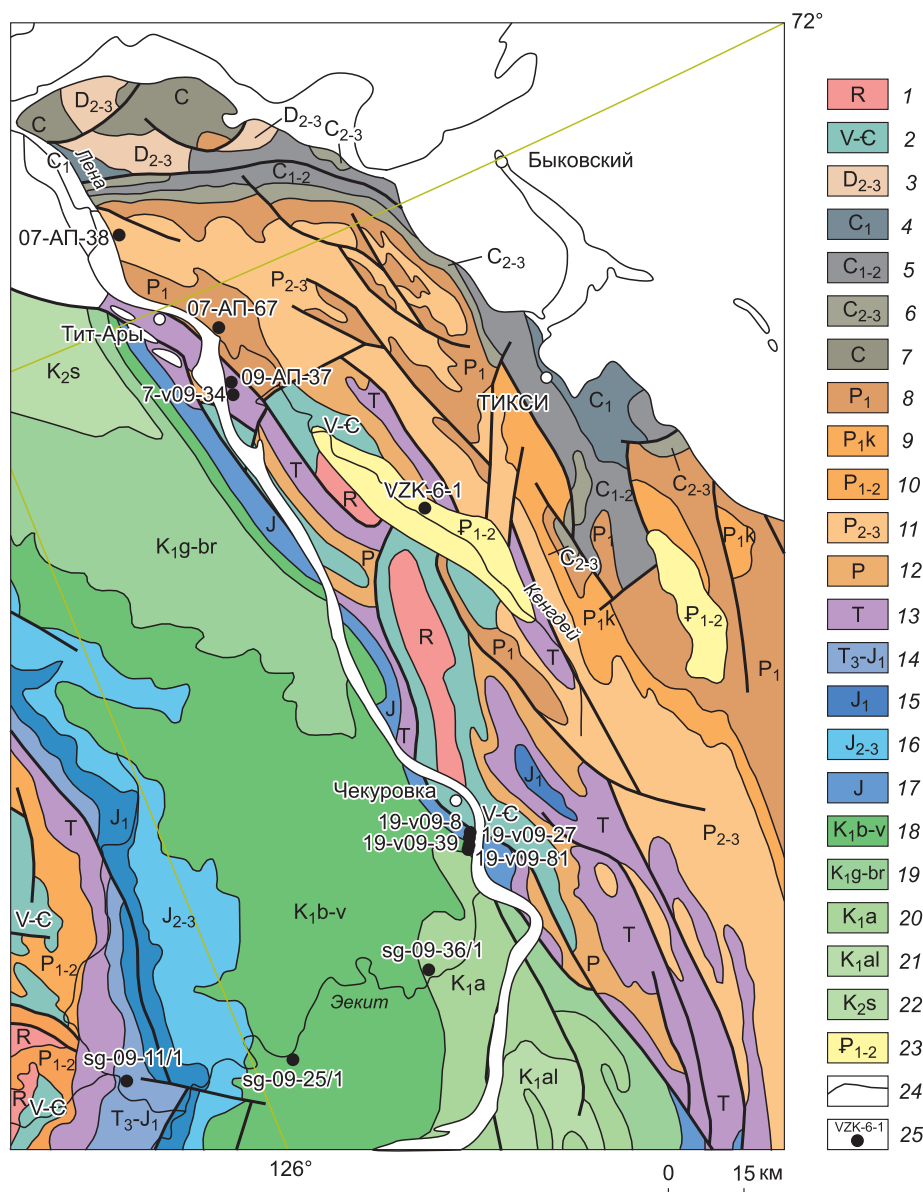


Рис. 1. Геологическая карта северо-востока Сибирской платформы и северного фланга Верхоянского складчато-надвигового пояса.

1–23 – отложения: 1 – рифейские, 2 – венд-кембрийские, 3 – средне-верхнедевонские, 4 – нижнекаменноугольные, 5 – нижне-среднекаменноугольные, 6 – средне-верхнекаменноугольные, 7 – каменноугольные нерасчлененные, 8 – нижнепермские, 9 – нижнепермские кунгурского яруса, 10 – нижне-среднепермские, 11 – средне-верхнепермские, 12 – пермские нерасчлененные, 13 – триасовые нерасчлененные, 14 – верхнетриасовые-нижнеюрские нерасчлененные, 15 – нижнеюрские, 16 – средне-верхнеюрские, 17 – юрские нерасчлененные, 18–21 – нижнемеловые (18 – берриасский и валанжинский ярус, 19 – готеривский и барремский ярус, 20 – аптский ярус, 21 – альбский ярус), 22 – верхнемеловые сеноманского яруса, 23 – нижне-среднепалеогеновые; 24 – разломы различной кинематики, 25 – места отбора проб и их номера.

Fig. 1. Geological map of the northeastern Siberian platform and the northern flank of the Verkhoyansk fold-and-thrust belt: 1–23 – deposits: 1 – Riphean, 2 – Vendian-Cambrian, 3 – Middle-Upper Devonian, 4 – Lower Carboniferous, 5 – Lower-Middle Carboniferous, 6 – Middle-Upper Carboniferous, 7 – Carboniferous undifferentiated, 8 – Lower Permian, 9 – Lower Permian, Kun-gurian stage, 10 – Lower-Middle Permian, 11 – Middle-Upper Permian, 12 – Permian undifferentiated, 13 – Triassic undifferentiated, 14 – Upper Triassic – Lower Jurassic undifferentiated, 15 – Lower Jurassic, 16 – Middle-Upper Jurassic, 17 – Jurassic undifferentiated, 18–21 – Lower Cretaceous (18 – Berriasian and Valanginian stages, 19 – Hauterivian and Barremian stages, 20 – Aptian stage, 21 – Albian stage), 22 – Upper Cretaceous, Cenomanian stage, 23 – Lower-Middle Paleogene; 24 – faults of various kinematics, 25 – sample sites and numbers.

Возраста исследованных пород приведены в таблице [1, 4, 5].

Методы исследования

Для изучения термохронологического развития территории, а также для определения возраста тектонических деформаций использовалось трековое датирование апатита, поскольку оно является практически единственным и наиболее доступным методом, отражающим термальную историю, а не только время формирования пород.

Метод трекового датирования, получивший в англоязычной литературе название «fission-track dating method», основан на подсчете плотности треков осколков спонтанного деления ядер ^{238}U , накапливающихся в минерале в ходе геологической истории [6–9].

Треками называют след, или узкую зону деформаций, образуемую разлетающимися фрагментами при спонтанном распаде ядра (например, ^{238}U), включенного в состав твердого вещества (детектор) в виде рассеянного элемента в кристаллической решетке. Это происходит при специфическом типе ядерного распада, называемого

расщеплением [6]. Упрощенная модель образования треков распада известна как теория иглы ионного разрыва [10]. Хотя эта теория в настоящее время оспаривается физиками, она все еще широко используется в основных статьях и учебниках о трековом датировании [11].

В трековом датировании могут использоваться разные минералы, такие как циркон, сфен и природные стекла. Но самым распространенным минералом, используемым для трекового датирования и, следовательно, наиболее изученным в качестве трекового хронометра, является апатит. В зависимости от одновалентного катиона в структуре апатита $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$ выделяют гидроксипатит, фторпатит или хлорпатит. Первая разновидность редка в природе. Фторпатит – самая распространенная фаза твердых растворов апатита [12]. Хлорпатиты встречаются реже, чаще всего являются членами рядов твердых растворов имеющих характерное Cl/F - или $\text{Cl}/(\text{Cl} + \text{F})$ -отношение, и более устойчивы к отжигу треков.

Основные параметры трекового датирования – трековый возраст, распределение и средние длины треков. Формула для практического расчета

Данные трекового датирования апатитов из образцов песчаников Приверхоянского краевого прогиба и Хараулахского антиклинория

Apatite fission track data from sandstones of Priverkhoyansk foredeep and Kharaulakh anticlinorium

Номер п/п	Абс. высота, м	Номер образца	Страт. возраст		Кол-во зерен апатита	Качество зерен (1 – плохо, 10 – отлично)	Трековый возраст (млн лет)	Средняя длина треков (мкм)
1	58	09-АП-38	P ₂	272–252	40	3	61,1±2,8	14,19±0,11
2	65	07-АП-67	P ₁	299–272	37	–	70,67±11,39	11,13±2,12
3	69	7-v09-34	T _{2an}	247–242	34	3	57,4±3,6	13,57±0,12
4	69	09-АП-37	T _{3k}	235–228	39	4	95,4±5,8	13,02±0,18
5	119	19-v09-8	J _{2bt}	168–166	40	3	67,6±2,3	13,55±0,10
6	119	19-v09-27	J _{2bt}	168–166	37	3	67,4±2,3	13,00±0,12
7	119	19-v09-39	K _{1b}	145–140	40	3	60,0±1,9	13,43±0,13
8	118	19-v09-81	K _{1h}	133–129	40	4	59,8±2,7	13,04±0,13
9	128	sg-09-11/1	J _{1d}	200–174	40	4	171,0±6,0	13,16±0,15
10	115	sg-09-25/1	K _{1hr-v₁}	140–129	36	2	90,0±4,3	13,16±0,15
11	99	sg-09-36/1	K _{1bh-bl(?)}	125–113	40	4	76,6±3,1	13,44±0,13
12	85	VZK-6-1	Pg	66–23	40	2	73,6±3,5	14,00±0,11

Примечание. 1 – Центральная-Хараулахская синклиналь, 2 – Юттыхская антиклиналь, 3, 4 – Тасаринская синклиналь, 5–8 – Чекуровская антиклиналь, 9–11 – Приверхоянский краевой прогиб и 12 – Кенгдейский грабен.

Note. 1 – Central Kharaulakh syncline, 2 – Yuttyakh anticline, 3, 4 – Tas-Ary syncline, 5–8 – Chekurovka anticline, 9–11 – Priverkhoyansk foredeep and 12 – Kengdey graben.

трекового возраста сложна и основана на подсчете спонтанных и индуцированных треков. Для этого подсчета используется метод внешнего детектора [13]. Для определения термального эффекта в образце измеряются длины треков и строится график их распределения [14]. Характер распределения трековых длин, средняя трековая длина и стандартное отклонение дают информацию о термальной истории образца. Радиационное повреждение вдоль распавшегося фрагмента создает метастабильное состояние материи, которое при наличии внешних факторов (в первую очередь температуры) со временем восстанавливается [15]. Этот процесс называется стиранием (отжигом) треков и приводит к уменьшению длины протравленных треков [16]. Для наиболее представительного типа апатитов (фторапатита) и при нормальной скорости охлаждения принято, что температура полного сохранения – около 60 °С, а температура полного отжига – около 120–125 °С [14]. Разрез земной коры между температурами полного сохранения и полного отжига называется «зоной частичного отжига» (Partial Annealing Zone, PAZ) [17]. Эффективная температура закрытия для трекового датирования определяется как температура, при которой 50 % треков сохраняются, 50 % треков отжигаются [18].

Трековое датирование было проведено в двух независимых лабораториях – A2Z (Apatite to Zircon, Inc) в США и университета Гента (Universiteit Gent) в Бельгии по стандартным методикам [6, 7]. Моделирование термальных историй образцов, проанализированных в A2Z, проводилось с помощью компьютерной программы HeFTy [19]. Это компьютерная программа прямого и обратного моделирования термохронометрических систем, включающая следы распада апатита, (U-Th)/He и отражательную способность витринита. Для оценки палеоглубин использовался геотермический градиент 30 °С на 1 км. Построенные кривые время–температура дают область нормального приближения (области зеленого цвета на графиках термальной эволюции), в пределах которой выделяется область хорошего приближения (области бордового цвета на графиках термальной эволюции). В пределах этих областей трассируется кривая наилучшего приближения. Моделирование термальной истории образцов, проанализированных в университете Гента, про-

водилось для всех образцов с достаточным числом (там, где возможно, от 50 до 100) длин треков с помощью программного обеспечения QTQt [20, 21]. Тренд в координатах время–температура, который наилучшим образом коррелирует с трековыми данными, представлен красным тепловым полем (т. е. представляет собой модель максимального правдоподобия). Для более надежной интерпретации термальной истории используется линия тренда черного цвета графиках термальной эволюции [20].

Длины треков

Изучение распределения длин треков на гистограммах, их средних длин позволяет разделить изучаемые образцы на две неравные группы. В первую группу входит большинство образцов (10 из 12). Распределение длин треков широкое (10–13 мкм), унимодальное, асимметричное (рис. 2, А и Б). Подобное распределение отражает постепенное линейное охлаждение [7]. У образцов 09-АП-38 и VZK-6-1 средняя длина треков около 14 мкм, что гарантирует отсутствие эффекта отжига и омоложения трекового возраста [14, 22]. Это позволяет интерпретировать их возраст как наиболее точное датирование геологического процесса [7]. Остальные образцы этой группы характеризуются средними длинами треков от 13 до 13,57 мкм, что указывает на незначительный отжиг. Их трековый возраст не связан ни с одним отдельным событием, хотя отражает время, когда образцы остыли ниже эффективной температуры закрытия трековой системы [7]. Во вторую группу входят два образца (sg-09-11/1 и 07-АП-67), характеризующиеся относительно короткими средними длинами треков (11–13 мкм). Распределение длин треков этой группы узкое (8–11 мкм), бимодальное и также асимметричное (рис. 2, В и Г). Такое распределение показывает, что часть треков была сформирована в период нагревания, часть – в период охлаждения. В этом случае трековый возраст напрямую не связан ни со временем остывания, ни со временем максимума палеотемператур. Возраста образцов этой группы самостоятельно не несут в себе какой-либо полезной геологической информации, хотя совместно с образцами первой группы, с большой долей условности, их можно использовать в качестве дополнительного материала [7].

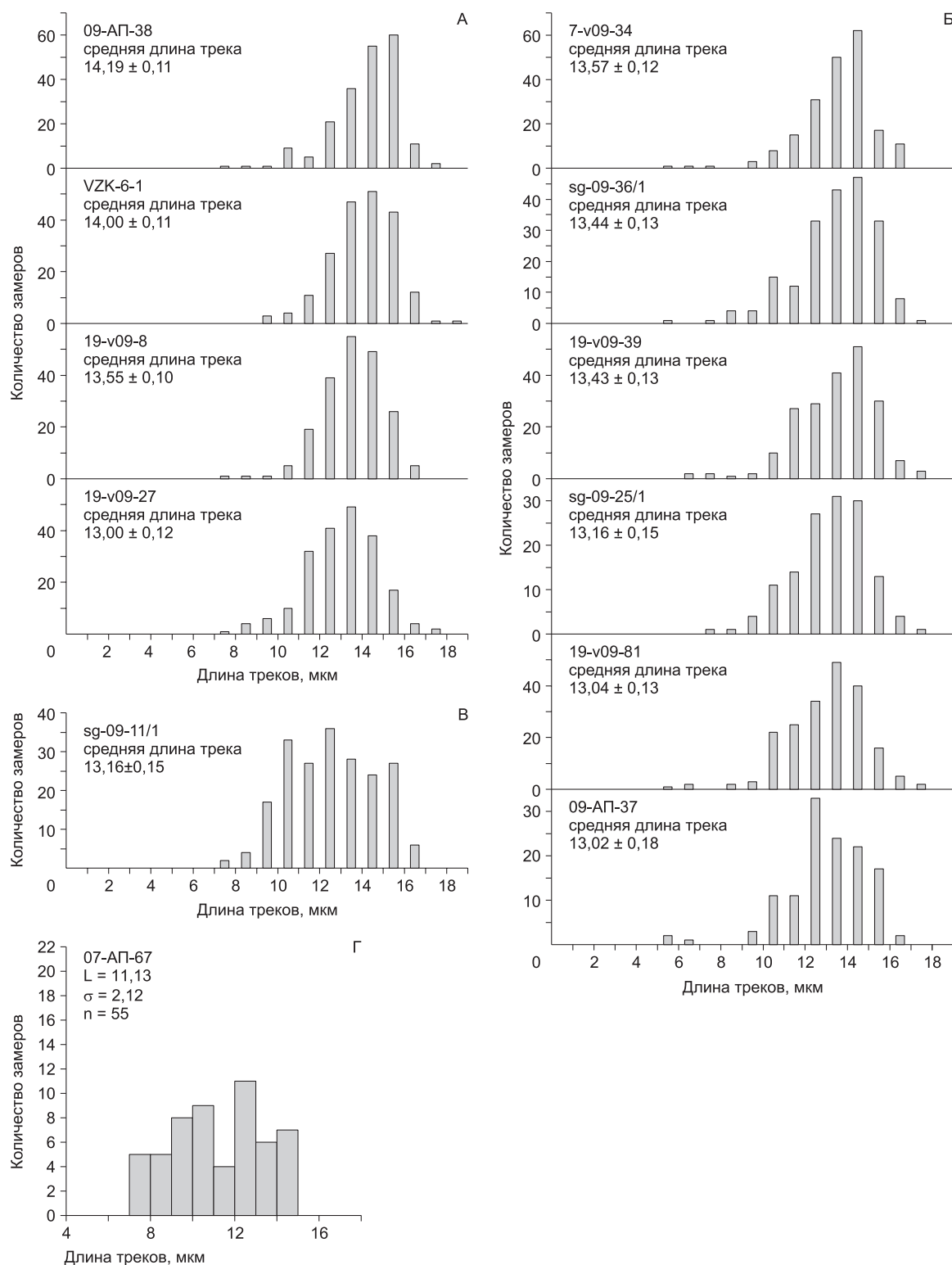


Рис. 2. Распределения и значения средних длин треков на гистограммах из образцов Хараулахского антиклинория и прилегающего к нему Приверхоянского краевого прогиба.
А–Г см. в тексте.

Fig. 2. Distribution of tracks and their mean length values on the track age histograms for samples from the Kharaulakh anticlinorium and the adjacent Priverkhoyansk foredeep.
А–Г see in text.

Трековый возраст

По степени перезагруженности трековых систем исследованные образцы можно сгруппировать следующим образом: образцы с полностью перезагруженной трековой системой и прогревом более 120 °С, с частичной перезагрузкой трековой системы и прогревом от 60 до 120 °С и без перезагрузки трековой системы (образец не нагревался более 60 °С). Этот процесс перезагрузки трековой системы подразумевает некоторый этап подогрева территории после накопления вышележащих осадков. Если нагрев был более 120 °С все треки в первоначально разновозрастных апатитах из различных источников обломочного материала стираются. Дальнейшее охлаждение приводит к формированию новых треков; таким образом, апатиты становятся как бы «одновозрастными». В эту группу входят три образца – 09-АП-38, 19-в09-8 и 19-в09-27 (рис. 3, А). В образце 09-АП-38 средняя длина треков более 14 мкм. Характер распределения длин треков на гистограмме, а также степень перезагруженности трековой системы позволяют считать возраст этого образца наиболее точным и представительным. Средние длины треков образцов 19-в09-8 и 19-в09-27 (от 13 до 13,55 мкм) указывают на незначительный отжиг. Это, в целом, несколько снижает точность определения их трекового возраста. С некоторой долей условности возраст этих образцов можно считать представительными.

Наибольшее количество образцов (8 из 12) подверглись частичной перезагрузке трековой системы, свидетельствуя, что нагрев территории был менее 120 °С. Это устанавливается тем, что в этих образцах среди зерен апатитов выделяются либо единичные зерна, либо группы зерен с трековым возрастом древнее времени осадконакопления. Для большей части образцов этот прогрев привел к тому, что большинство треков было стерто, а дальнейшее охлаждение привело к значительному преобладанию апатитов моложе возраста осадконакопления возрастными, которые фиксируют это термальное событие (рис. 3, Б и 4, Б).

Для образцов sg-09-11/1 и 07-АП-67 температура предполагаемого нагрева была еще более низкой, что фиксируется довольно значительным количеством разновозрастных апатитов, а также распределением длин треков (рис. 4, А и В). В результате этого прогрева здесь в равной степени фиксируются треки как предыдущего тер-

мального события, так и последнего. Трековый возраст этих двух образцов является наименее представительным и точным, и его следует интерпретировать с большой осторожностью.

Образец VZK-6-1 является единственным из изученных, в котором не было перезагрузки трековой системы и прогрев составлял менее 60 °С (см. рис. 3, А). Практически все треки в апатитах этого образца имеют возраст древнее возраста осадконакопления. Это свидетельствует, что полученный трековый возраст отражает время эрозии не этого образца, а источника сноса обломочного материала в бассейн осадконакопления. Практически все зерна апатита в этом образце показывают в пределах ошибки схожие возраста, что позволяет говорить об одновозрастном источнике кластики. Средняя длина треков в апатитах более 14 мкм, что указывает на практически полное отсутствие их вторичного отжига. Таким образом, полученный трековый возраст этого образца можно считать представительным.

Полученные трековые возраста изучаемых образцов группируются в три группы: кампан-палеоценовую (76,6±3,1–57,4±3,6 млн лет), сеноман-туронскую (95,4±5,8–90,0±4,3 млн лет) и ааленскую (171,0±6,0 млн лет) (см. таблицу, рис. 3 и 4). Изучение распределения длин треков, степени перезагруженности трековых систем позволило нам выделить наиболее представительные образцы – 09-АП-38 (61,1±2,8 млн лет), VZK-6-1 (73,6±3,5 млн лет), 19-в09-8 (67,6±2,3 млн лет) и 19-в09-27 (67,4±2,3 млн лет), трековые возраста которых попадают в первую, кампан-палеоценовую группу. В эту же группу входят возраста большинства других образцов. Во вторую группу, сеноман-туронскую, входят два, а третью представляет один из наименее представительных и наиболее удаленных от ВСНП образцов, отобранный с пограничных структур Оленекского поднятия и Приверхоянского краевого прогиба. Кроме этого, необходимо отметить, что среди образцов, отобранных вкрест простирания северной части Приверхоянского прогиба, наблюдается постепенное омоложение трековых возрастов от 171,0±6,0 млн лет на западе, на границе Оленекского поднятия и Приверхоянского краевого прогиба, до 59,8±2,7 млн на востоке, на западном крыле Чекуровской антиклинали.

«График-бумеранг» [23] иллюстрирует процесс перезагрузки трековой системы, а также показывает природу соотношений этих трех групп (рис. 5). На графике показана центральная и левая

ТЕРМОХРОНОЛОГИЯ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ВЕРХОЯНСКОГО СКЛАДЧАТО-НАДВИГОВОГО ПОЯСА

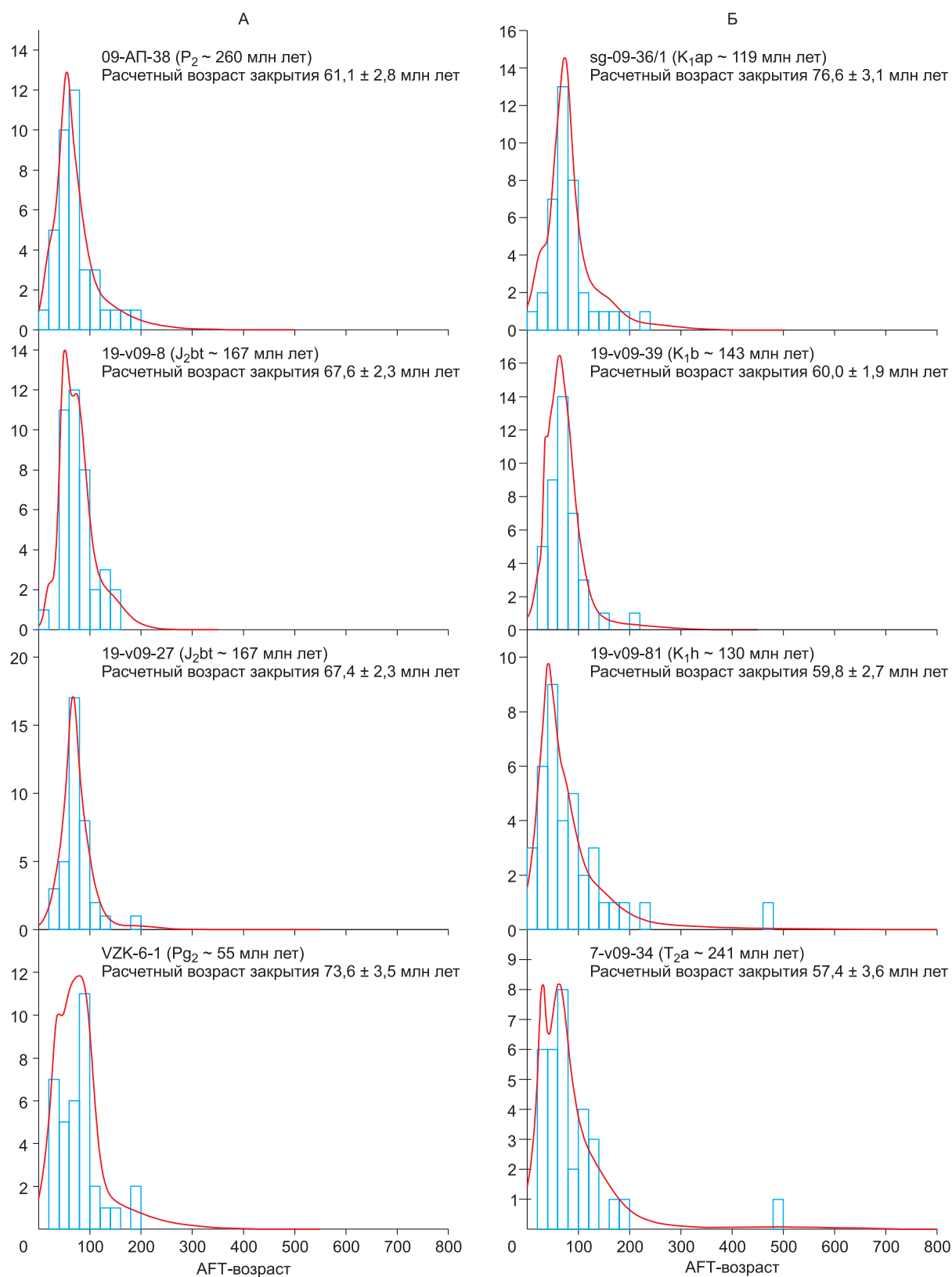


Рис. 3. Гистограммы трековых возрастов наиболее представительных (А) и других (Б) образцов, имеющих кампан-палеоценовый трековый возраст.

Fig. 3. Track age histograms of the most representative (A) and other (Б) Campanian-Paleocene specimens.

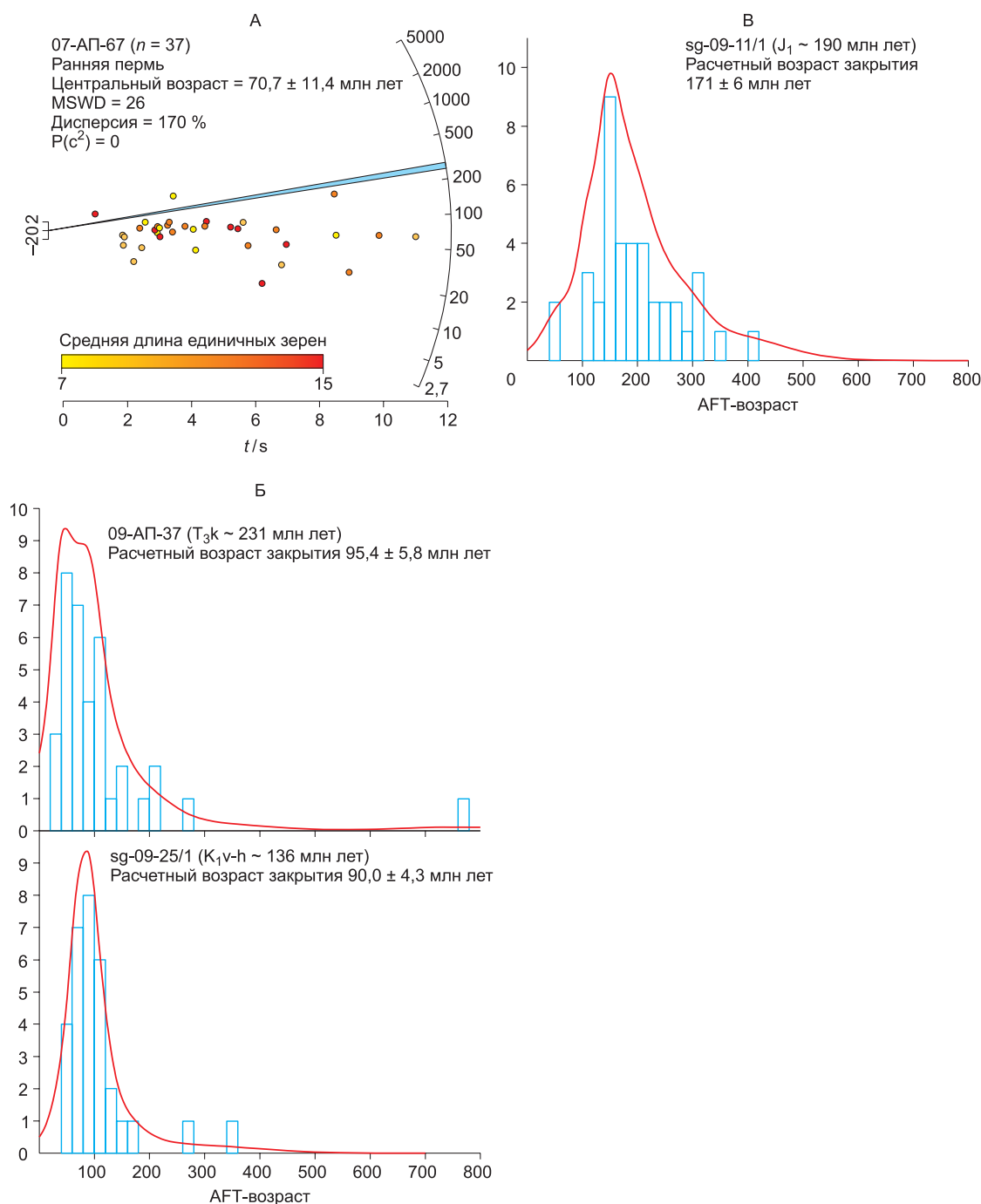


Рис. 4. Трековые кампан-палеоценовые возраста апатитов образца 07-АП-67 на радиальной диаграмме, построенной с помощью программы RadialPlottersoftware [6] (А); гистограммы распределения трековых возрастов апатитов: сеноман-туронских (обр. 09-АП-37 и sg-09-25/1) (Б) и ааленского (обр. sg-09-11/1) (В):

На радиальной диаграмме голубым сектором показан стратиграфический возраст проанализированных осадочных пород. Тепловая шкала (от желтого к красному) отображает трековые длины единичных зерен апатита (от коротких к длинным). Зеленым цветом показаны зерна апатита, для которых не проведено измерение трековых длин.

Fig. 4. Campanian-Paleocene track ages of apatites (sample 07-AP-67) on a radial diagram constructed using the RadialPlottersoftware program [6] (A) and track age histograms for Cenomanian-Turonian (samples 09-AP-37 and sg-09-25/1) (B) and Aalenian (sample sg-09-11/1) (B) specimens:

Blue sector on the radial diagram shows the stratigraphic age of the analyzed sedimentary rocks. The thermal scale (yellow to red) displays track lengths of single apatite grains (short to long). Green color shows apatite grains for which the track lengths have not been measured.

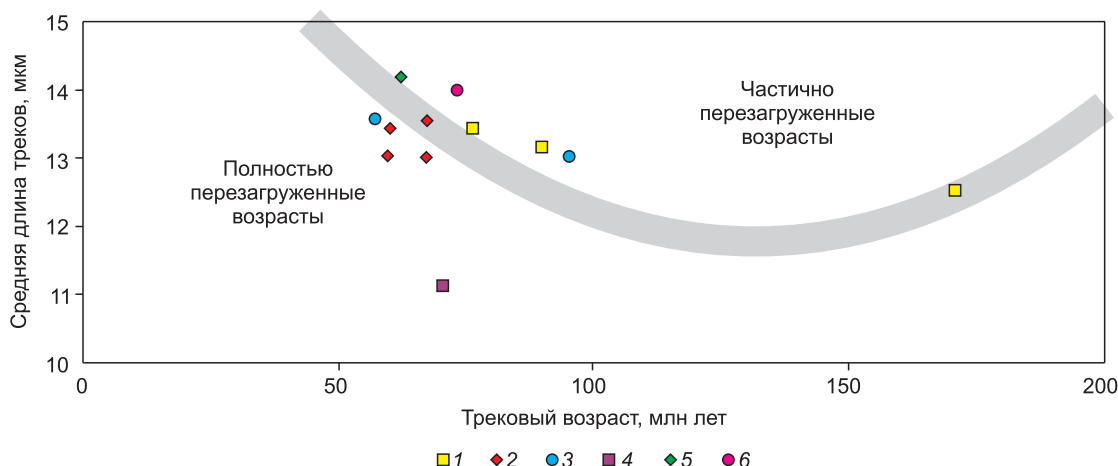


Рис. 5. «График-бумеранг» [23], построенный для образцов Хараулахского антиклинория и прилегающего к нему Приверхоянского краевого прогиба: Фигуративные точки образцов: 1 – Приверхоянского краевого прогиба, 2 – Чекуровской антиклинали, 3 – Тасаринской синклинали, 4 – Юттыхской антиклинали, 5 – Центрально-Хараулахской синклинали, 6 – Кенгдейского грабена. Серая линия – «бумеранг».

Fig. 5. Boomerang plot [23] for samples from the Kharaulakh anticlinorium and the adjacent Priverkhoyansk foredeep: Figurative points of samples from: 1 – Priverkhoyansk foredeep, 2 – Chekurovka anticline, 3 – Tas-Ary syncline, 4 – Yuttyakh anticline, 5 – Central Kharaulakh syncline, 6 – Kengdey graben.

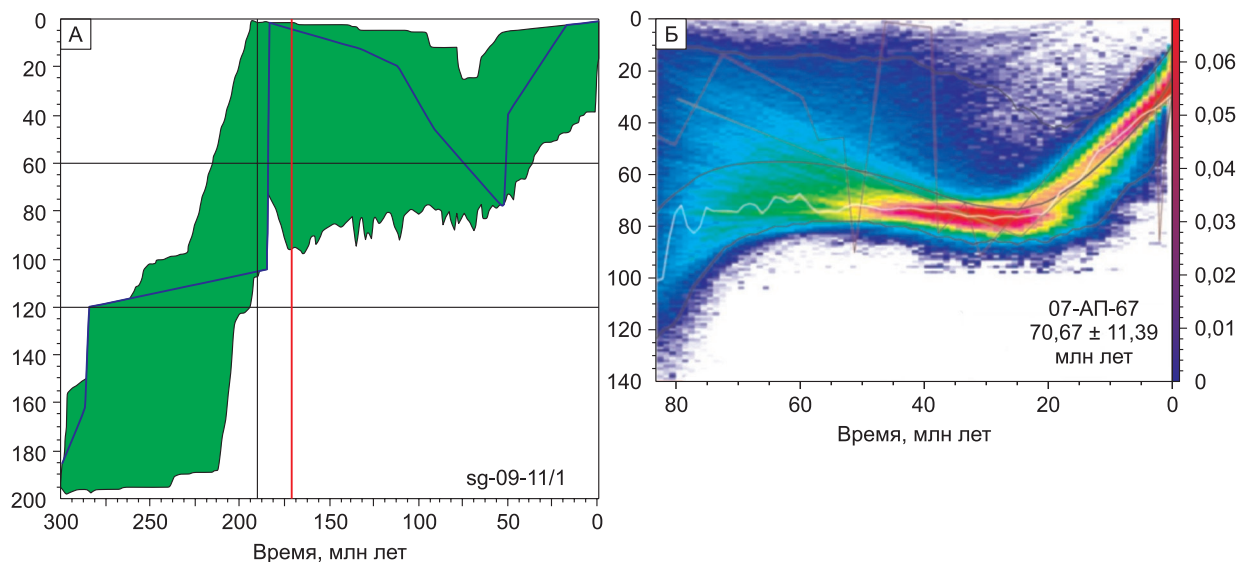


Рис. 6. Графики термальной эволюции: для образца sg-09-11/1 (программа HeFTy) (А), для образца 07-АП-67 (программа QTQt) (Б). Вертикальная шкала показывает температуру. На модели программы HeFTy: черная прямая вертикальная линия – стратиграфический возраст образца, красная – трековый возраст.

Fig. 6. Thermal evolution plots for samples sg-09-11/1 (HeFTy program model) (А) and 07-АП-67 (QTQt program model) (Б). The vertical scale shows temperature. In the HeFTy program model: the black and red straight vertical lines show the stratigraphic and fission-track age of the sample, respectively.

части «бумеранга». В левой части группируются практически все образцы кампан-палеоценовой группы, маркируя последний крупный этап охлаждения территории. Образцы сеноман-турон-

ской и ааленской групп ограничивают центральную часть «бумеранга». Первая из этих групп на графике тяготеет к кампан-палеоценовой группе. Небольшой прогрев территории (менее 120 °С)

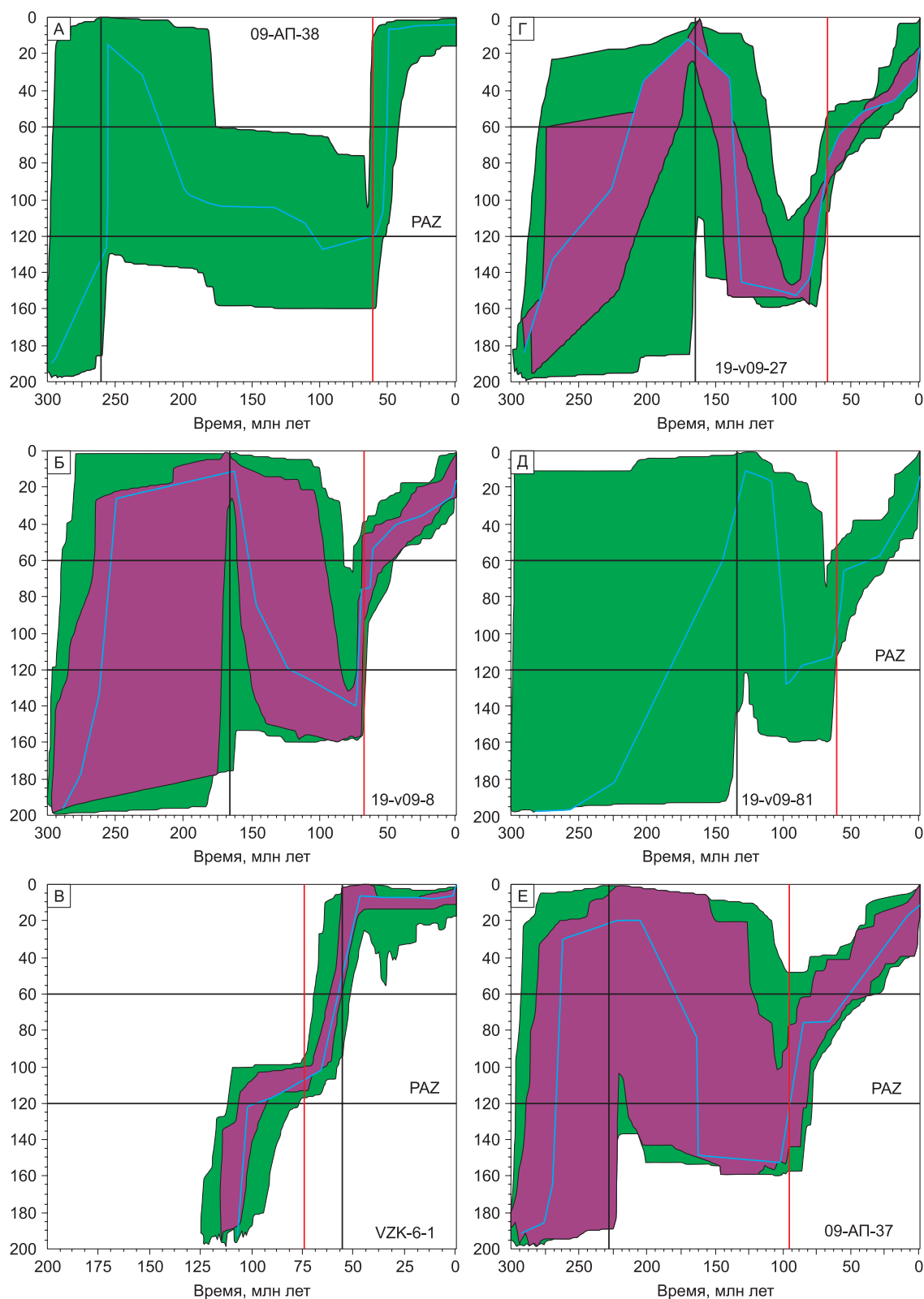


Рис. 7. Графики термальной эволюции (программа HeFTy) для образцов 09-АП-38 (А), 19-v09-8 (Б), VZK-6-1 (В), 19-v09-27 (Г), 19-v09-81 (Д), 09-АП-37 (Е).

Fig. 7. Thermal evolution plots based on the HeFTy program model for samples 09-AP-38 (A), 19-v09-8 (Б), VZK-6-1 (В), 19-v09-27 (Г), 19-v09-81 (Д), 09-AP-37 (Е).

способствовал тому, что не все короткие первоначальные треки были стерты, и это привело к получению несколько более древнего трекового возраста. Ааленская группа тяготеет к предполагаемому первоначальному возрасту; еще менее высокие температуры подогрева привели к преобладанию коротких первоначальных треков.

Интерпретация графиков термальных эволюций

Таким образом, изучение и интерпретация графиков термальной эволюции позволяет сделать несколько выводов. В целом, на территории пред-

полагается денудация около 2,0–3,4 км пород. Мощность денудированного материала в северной части Приверхоянского краевого прогиба возрастает с запада на восток от 2,0 до 3,3 км. Мощность денудированного материала в Хараулахском антиклинории составляет от 3,0 до 3,4 км. Слишком большие мощности предполагаемых денудированных пород позволяют сделать вывод о высокой скорости денудации, связанной, вероятно, с интенсивным тектоническим подъемом.

Графики термальной эволюции двух наименее представительных образцов указывают на погружение (нагрев) территории. Образец sg-09-11/1

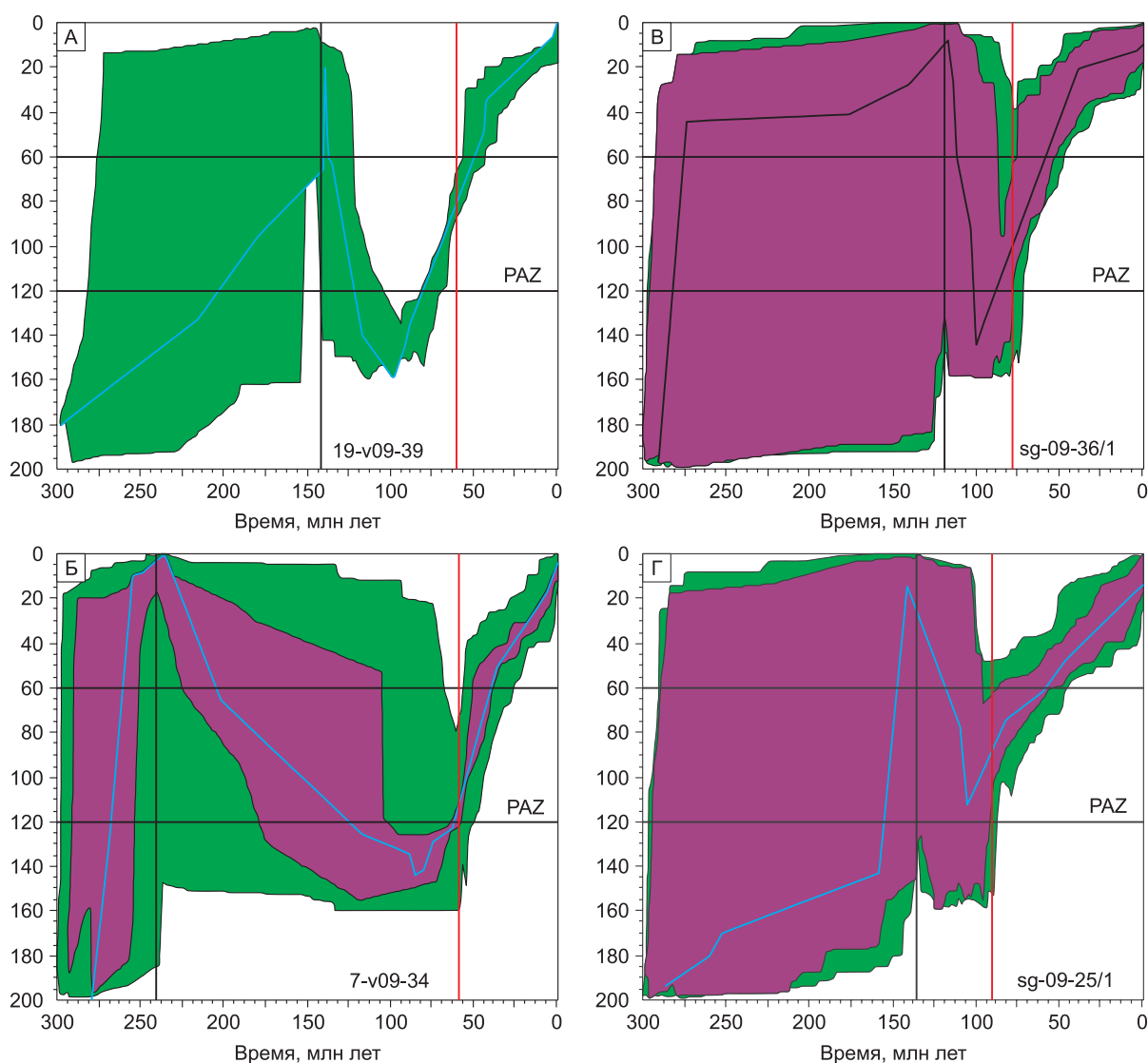


Рис. 8. Графики термальной эволюции (программа HeFTy) для образцов 19-v09-39 (А), 7-v09-34 (Б), sg-09-36/1 (В), sg-09-25/1 (Г).

Fig. 8. Thermal evolutions plots based on the HeFTy program model for samples 19-v09-39 (A), 7-v09-34 (Б), sg-09-36/1 (B), sg-09-25/1 (Г).

фиксирует погружение (нагрев) на 2 км в интервале 110–55 млн лет (рис. 6, А), а образец 07-АП-67 показывает погружение на 500–600 м около 50–25 млн лет назад (рис. 6, Б). Наибольшую скорость денудации (остывание на 10 °С/млн лет) показывает наиболее представительный образец изучаемой территории (09-АП-38) во временном интервале 60–50 млн лет (рис. 7, А). Это скоростное значение настолько велико, что денудация наиболее вероятно сопровождалась интенсивным тектоническим поднятием [6, 24]. Следующие по величине скорости денудации (остывание на 5–8 °С/млн лет) показывают три образца (sg-09-11/1, 19-v09-8, VZK-6-1) примерно в этом же интервале 70–50 млн лет (рис. 6, А, 7, Б, В). Этот же возрастной интервал фиксируется двумя менее высокоскоростными эпизодами (остывание на 3,7–4,5 °С/млн лет) в образцах 19-v09-81 и 19-v09-27 (рис. 7, Г и Д). Кроме того, фиксируются еще два относительно высокоскоростных (остывание на 3–4,5 °С/млн лет) эпизода денудации. Первый, 95–85 млн лет назад, отмечается в образце 09-АП-37 (рис. 7, Е), а второй, 45–40 млн лет назад, фиксируется в образце 19-v09-39 (рис. 8, А). В целом остальные полученные данные по скоростям денудации имеют относительно низкие значения, что не позволяет в эти временные промежутки однозначно выделять каких-либо событий поднятия (рис. 8, Б–Г).

Два недостаточно представительных образца (09-АП-37 и 07-АП-67) фиксируют на рубеже 85–65 и 75–50 млн лет соответственно денудационную стабилизацию на уровне верхней границы зоны частичного отжига (60–75 °С) (рис. 6, Б и 7, Е).

Заключение

В результате проведенных исследований наиболее уверенно фиксируется только одно термотектоническое событие, произошедшее 77–57 млн лет назад (кампан–палеоцен) (рис. 9 и 10). Этот интервал фиксируется наиболее представительными образцами, имеющими трековый возраст $67,6 \pm 2,3$ – $61,1 \pm 2,8$ млн лет и, в целом, подтверждается датировками других, менее надежных образцов. Интерпретация графиков термальной эволюции показывает наибольшую скорость денудации (остывания), вероятно связанную с интенсивным тектоническим поднятием 60–50 млн лет назад. Примерно в такой же временной промежуток, 70–50 млн лет, высокие скорости денудации (остывания) отмечаются при

интерпретации графиков термальной эволюции других наиболее представительных образцов. В этот временной промежуток, возможно, происходила заключительная (горообразование) стадия формирования фронта Хараулахского антиклинория ВСНП. В эоценовых отложениях Кенгдейского грабена преобладают зерна апатита, имеющие трековые возраста около $73,6 \pm 3,5$ млн лет, близкие к этому термохронологическому событию. Вероятно, при накоплении этих толщ происходил размыв поднимающегося горно-складчатого сооружения.

Отмечается постепенное омоложение высокоскоростных временных интервалов на графиках термальной эволюции наиболее представительных образцов от 70–60 млн лет в самой южной части зоны форланда ВСНП, (Чекуровская антиклиналь) до 60–50 млн лет в наиболее северных частях форланда (Центрально-Хараулахская синклиналь). Также следует упомянуть отмеченное ранее постепенное омоложение трековых возрастов с запада на восток от $171,0 \pm 6,0$ до $59,8 \pm 2,7$ млн лет. Если не учитывать наиболее спорную датировку возраста ($171,0 \pm 6,0$ млн лет), данное омоложение, в интервале от $90,0 \pm 4,3$ до $59,8 \pm 2,7$ млн лет, возможно, косвенно подтверждает тыловую последовательность формирования складчато-надвиговых структур [25].

Кроме этого, на исследуемой территории с некоторой долей вероятности можно предположить проявление следующих термотектонических событий:

1. 110–55 млн лет (см. рис. 10). Продолжительное погружение территории, фиксируемое графиком термальной эволюции одного из наименее представительных образцов (sg-09-11/1). Это погружение предположительно связано с формированием восточного фланга Оленекского поднятия на границе с Приверхоянским краевым прогибом.

2. 95–90 млн лет (см. рис. 9 и 10). Поднятие фиксируется как трековыми возрастами, так и графиками термальной эволюции. Два образца (09-АП-37 и sg-09-25/1), отобранные из триасовых толщ Тасаринской синклинали и меловых пород Приверхоянского прогиба соответственно, показывают трековые возраста, попадающие в этот временной интервал. Кроме этого, образец 09-АП-37 фиксирует относительно высокоскоростное ($4,5$ °С/млн лет) событие охлаждения (денудации) на графике термальной эволюции 95–80 млн лет назад. Еще три графика термаль-

ТЕРМОХРОНОЛОГИЯ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ВЕРХОЯНСКОГО СКЛАДЧАТО-НАДВИГОВОГО ПОЯСА

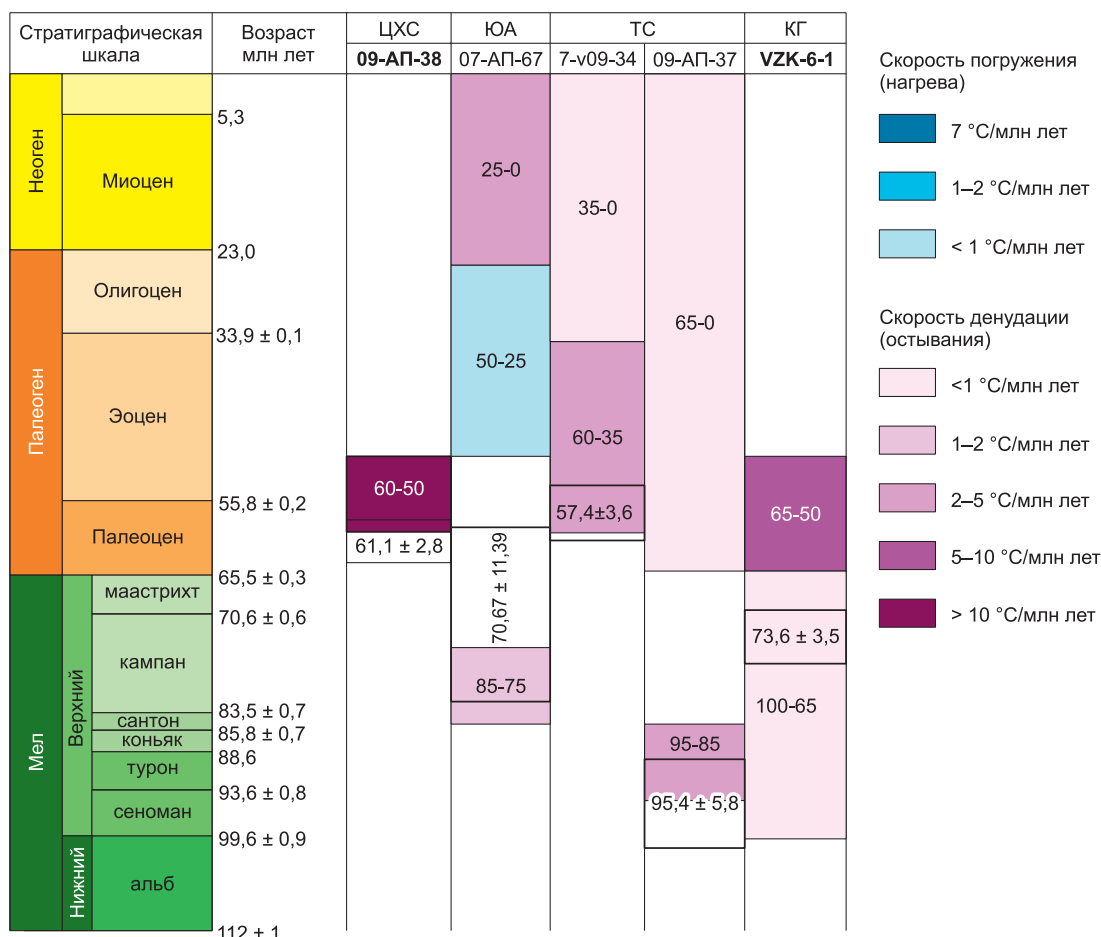


Рис. 9. Диаграммы скоростей остывания (поднятия) и нагрева (погружения) по данным интерпретации графиков термальной эволюции образцов Хараулахского антиклинория.

Размер прямоугольников соответствует оцениваемой длительности события, густота цвета – относительной интенсивности. Цифры указывают примерную длительность события в миллионах лет. Жирным шрифтом в заголовке показаны наиболее представительные образцы. В жирных черных прямоугольниках показаны трековые возрасты. ЦХС – Центральная Хараулахская синклиналь, ЮА – Юттыхская антиклиналь, ТС – Тасаринская синклиналь, КГ – Кенгдейский грабен.

Fig. 9. Cooling (uplift) and heating (subsidence) rate diagrams based on data from the thermal evolution plots for samples of the Kharaulakh anticlinorium.

The size of rectangles corresponds to the estimated duration of events, the color deepness reflects their relative intensity. The figures indicate the approximate duration of the event in millions of years. In the title, the most representative samples are shown in bold. Numerals in thick black rectangles show fission-track ages. ЦХС – Central Kharaulakh syncline, ЮА – Yuttyakh anticline, ТС – Tas-Ary syncline, КГ – Kengdey graben.

ной эволюции образцов 19-v09-39, 07-АП-67, sg-09-36/1 показывают начало относительно высокоскоростных (1,5–2,3 °C/млн лет) этапов денудаций 85–80 млн лет назад. Данное событие, если оно действительно имело место, возможно, связано с первым импульсом складчато-надвиговых деформаций в Хараулахском антиклинории. Кроме того, в нескольких десятках километров восточнее 86–89 млн лет назад происходила вулканическая деятельность [26], которая также могла оказать влияние на отмеченный термальный процесс.

3. 50–25 млн лет (см. рис. 9). Погружение фиксируется только в одном образце из пермских песчаников Юттыхской антиклинали, входящем в группу наименее представительных. Природа этого погружения (нагрева) остается дискуссионной. Возможно, полученные возрастные значения связаны с ошибкой модели стирания треков при их отжиге. С другой стороны, начиная с эоцена в центральной части Хараулахского антиклинория происходило прогибание, заложение Кенгдейского грабена и накопление более 600 м осадков, с чем могло быть связано отмеченное прогревание.

Стратиграфическая шкала		Возраст млн лет	Чекуровская антиклиналь				Приверхоянский прогиб		
			19-v09-8	19-v09-27	19-v09-39	19-v09-81	sg-09-36/1	sg-09-25/1	sg-09-11/1
Неоген	Миоцен	5,3				30-0			
		23,0			40-0				
Палеоген	Олигоцен	33,9 ± 0,1	60-0	60-0					50-20
	Эоцен	55,8 ± 0,2			45-40	55-30			
	Палеоцен	65,5 ± 0,3	70-60	75-60	60,0 ± 1,9	59,8 ± 2,7	85-35	105-0	55-50
Мел	Верхний	маастрихт	67,6 ± 2,3	67,4 ± 2,3	80-45	65-55			
		кампан					76,6 ± 3,1		
		сантон							
		коньяк							
		турон						90,0 ± 4,3	
	Нижний	сеноман							
		альб							
		апт							
		баррем							
		готерив							
		валанжин							
		берриас							
Юра	Верхняя	титон							
		киммеридж							
		оксфорд							
	Средняя	келловей							
		бат							
		байос							
		аален							
	Ниж.	тоар							171 ± 6

Рис. 10. Диаграммы скоростей остывания (поднятия) и нагрева (погружения) по данным интерпретации графиков термальной эволюции образцов из Чекуровской антиклинали и Приверхоянского краевого прогиба. Усл. обозн. см. на рис. 9.

Fig. 10. Cooling (uplift) and heating (subsidence) rate diagrams based on data from thermal evolution plots for samples from the Chekurovka anticline and the Priverkhoyansk foredeep. See Fig. 9 for symbols.

4. 45–40 млн лет (см. рис. 10). Данное поднятие с относительно высокой скоростью денудации (остывание на 3 °С/млн лет) фиксируется на графике термальной эволюции образца, отобранного на западном крыле Чекуровской антиклинали. Природа этого поднятия также остается дискуссионной; возможность того, что оно связано с ошибкой модели стирания треков при их отжиге, очень высока. С другой стороны, денудация в это время может быть связана с формированием расположенных восточнее палеогеновых грабенов (Кенгдейский и др.).

Литература

1. Биджиев Р.А., Грошин С.И., Горшкова Е.Р., Гогина Н.И. Государственная геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Серия Нижнеленская. Лист R-52-VII, VIII. Объяснительная записка. М.: Аэрогеология, 1976. 80 с.
2. Гогина Н.И. Государственная геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Серия Нижнеленская. Лист S-52-XXXI, XXXII. Объяснительная записка. М., 1979. 89 с.
3. Гогина Н.И., Грошин С.И. Государственная геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Серия Нижнеленская. R-52-I, II. Объяснительная записка. М., 1976. 82 с.
4. Биджиев Р.А., Горшкова Е.Р., Леонов Б.Н. Государственная геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Серия Верхоянская. Лист R-52-III, IV. Объяснительная записка. М., 1979. 71 с.
5. Васильев Д.А., Еришова В.Б. Тектонические структуры верхнеюрско-нижнемеловых отложений северной части Приверхоянского прогиба // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы всероссийской научно-практической конференции. Якутск: Издательский дом Северо-Восточного федерального университета, 2013. С. 113–116
6. Ветров Е.В. Эволюция термотектонических событий юго-восточного Алтая в позднем мезозое и кайнозое по данным трековой термохронологии апатита: Дисс. на соискание ученой степени канд. геол.-мин. наук. М., 2016. 200 с.
7. Соловьев А.В. Изучение тектонических процессов в областях конвергенции литосферных плит // Методы трекового и структурного анализа. Труды Геологического института РАН. Вып. 577. М.: Наука, 2008. 320 с.
8. Флейшчер Р.Л., Прайс П.Б., Уолкер Р.М. Треки заряженных частиц в твердых телах: принципы и приложения. Ч. 2. Науки о Земле и космические исследования / Пер. А.Н. Комарова и Л.К. Левского; Ред. Ю.А. Шуколюков. М.: Энергоиздат, 1981. 264 с.
9. Фор Г. Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989. 585 с.
10. Fleischer R.L., Price P.B., Walker R.M. Nuclear tracks in solids: principles and applications. Berkeley: University of California Press, 1975. 605 p.
11. Wagner G., Van den Haute P. Fission track dating. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1992. 285 p.
12. McConnell D. Apatite. Wien: Springer-Verlag, 1973. 111 P. 197.
13. Price P.B., Walker R.M. Fossil tracks of charged particles in mica and the age of minerals // Journal of Geophysical Research. 1963. Vol. 68. P. 4847–4862.
14. Gleadow A.J.W., Duddy I.R., Green P.F., Hegarty K.A. Fission track lengths in the apatite annealing zone and the interpretation of mixed ages // Earth and Planetary Science Letters. 1986. Vol. 78. P. 245–254.
15. Gleadow A.J.W., Duddy I.R., Lovering J.F. Fission track analysis: New tool for the evaluation of thermal histories and hydrocarbon potential // Austral. Petrol. Explor. Assoc. J. 1983. Vol. 23. P. 93–102.
16. Green P.F., Duddy I.R., Gleadow A.J.W., Tingate P.R., Laskett G.M. Thermal annealing of fission tracks in apatite. A qualitative description // Chemical Geology (Isotopes Geoscience Section). 1986. Vol. 59. P. 237–253.
17. Wagner G.A. The geological interpretation of fission track ages // Transactions of the American Nuclear Society. 1972. Vol. 15. P. 117.
18. Wagner G.A., Reimer G.M., 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. Univ. Padova. 1977. Vol. 30. P. 1–27.
19. Ketcham R.A. Forward and inverse modeling of low-temperature thermochronometry data // Rev. Mineral Geochem. 2005. Vol. 58. P. 275–314.
20. Gallagher K. Transdimensional inverse thermal history modeling for quantitative thermochronology // Journal of Geophysical Research and Solid Earth. 2012. Vol. 117. P. 1–16. <https://doi.org/10.1029/2011JB008825>.
21. Ketcham R.A., Carter A., Donelick R.A., Barba-rand J., Hurford A.J. Improved modeling of fission-track annealing in apatite // American Mineralogist. 2007. Vol. 92. P. 799–810. <https://doi.org/10.2138/am.2007.2281>.
22. Gleadow A.J.W., Kohn B.P., Brown R.W., O'Sullivan P.B., Raza A. Fission track thermotectonic imaging of the Australian continent // Tectonophysics. 2002. Vol. 349. P. 5–21.
23. Green P.F., Duddy I.R. AFTA and low temperature thermochronology: the Geotrack approach // Thermo 2014. 14th International Conference on Thermochronology. 2014. P. 1–69.
24. Gleadow A.J.W., Brown R.W. Fission track thermochronology and the long-term denudational response to tectonics // Geomorphology and Global Tectonics / Summerfield, M.J. (Ed.). New York: Wiley, 2000. P. 57–75.
25. Прокопьев А.В., Дейкуненко А.В. Деформационные структуры складчато-надвиговых поясов // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Под ред. Л.М. Парфенова,

М.И. Кузьмина. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. С. 156–198.

26. Prokopiev A., Khudoley A., Egorov A., Gertseva M., Afanasieva E., Sergeenko A., Ershova V., Vasiliev D. Late Cretaceous-Early Cenozoic indicators of continental extension on the Laptev Sea shore (North Verkhoyansk) // 3P Arctic, Stavanger, Norway, October 14–18, 2013. P. 170.

siliev D. Late Cretaceous-Early Cenozoic indicators of continental extension on the Laptev Sea shore (North Verkhoyansk) // 3P Arctic, Stavanger, Norway, October 14–18, 2013. P. 170.

Поступила в редакцию 20.09.2019

Принята к публикации 21.11.2019

Об авторах

ВАСИЛЬЕВ Дмитрий Анатольевич, научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677000, Якутск, проспект Ленина, д. 39, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-1201-3805>, juorankhay@mail.ru;

ПРОКОПЬЕВ Андрей Владимирович, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующий лабораторией, главный научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677000, Якутск, проспект Ленина, д. 39, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-0985-9535>, prokopiev@diamond.ysn.ru;

ХУДОЛЕЙ Андрей Константинович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная 7-9, Россия;

ЕРШОВА Виктория Бэртовна, кандидат геолого-минералогических наук, заведующая кафедрой, Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная 7-9, Россия;

КАЗАКОВА Галина Германовна, ведущий инженер-геолог, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ), 199106, Санкт-Петербург, Средний проспект, д. 74, Россия;

ВЕТРОВ Евгений Викторович, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, 630091, Новосибирск, Красный проспект, д. 67, Россия.

Информация для цитирования

Васильев Д.А., Прокопьев А.В., Худолей А.К., Ершова В.Б., Казакова Г.Г., Ветров Е.В. Термохронология северной части Верхоянского складчато-надвигового пояса по данным трекового датирования апатита // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2019, Т. 24, № 4. С. 49–66. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-4-4>

DOI 10.31242/2618-9712-2019-24-4-4

Thermochronology of the northern part of the Verkhoyansk Fold-and-Thrust Belt according to apatite fission-track age

D.A. Vasiliev^{1,*}, A.V. Prokopiev^{1,**}, A.K. Khudoley²,
V.B. Ershova², G.G. Kazakova³, E.V. Vetrov⁴

¹Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

²Institute of earth Sciences, St Petersburg University, St Petersburg, Russia

³A.P. Karpinsky All-Russian Research Geological Institute (VSEGEI), St Petersburg, Russia

⁴Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Minerals,
Novosibirsk, Russia

*juorankhay@mail.ru,

**prokopiev@diamond.ysn.ru

Abstract. The paper presents the results of thermochronological studies conducted in the front of the northern part of the Verkhoyansk fold-and-thrust belt and the Priverkhoyansk foredeep with the aim to

establish the age of paleo-uplifts and their possible relation to tectonic events. The results of fission track analysis of apatite grains extracted from 12 samples of Permian-Eocene sandstones point confidently to the occurrence of a thermotectonic event at 77–57 Ma (Campanian-Paleocene), which was accompanied by high denudation rates. It is supposed that this was the time of the final formative stage of the Kharaulakh anticlinorium front. Deposits of the Kengdey graben are dominated by apatite grains with track ages of about 73.6 ± 3.5 Ma, which are close to this thermochronologic event. Accumulation of these strata was likely accompanied by the erosion of the uplifting foldbelt. It is assumed that some more thermotectonic events occurred in the area under study at 110–55, 95–90, 50–25, and 45–40 Ma.

Key words: apatite fission-track age, mean track lengths, Kharaulakh anticlinorium, Priverkhoyansk foredeep, Kengdey graben, Verkhoyansk fold-and-thrust belt, denudation, uplift, cooling.

Acknowledgements. The study was carried out according to the plan of research of IGABM SB RAS (project 03-81-201-0001) (track dating at the Laboratory of the Apatite to Zircon, Inc and interpretation of data on the Kharaulakh anticlinorium) and with the support of the grant from the Russian Science Foundation, no. 17-17-01171 (track dating at the Laboratory of the Gent University and interpretation of data on the Priverkhoyansk foredeep).

References

1. Bidjiev R.A., Gorshkova S.I., Gorshkova E.R., Gogina N.I. State geological map of the USSR scale 1: 200 000. Series of the lower Lena. Sheet R-52-VII, VIII. Exploration note. Moscow: Aerogeology. 1976. 80 p.
2. Gogina N.I. State geological map of the USSR scale 1: 200 000. Series of the lower Lena. Sheet S-52-XXXI, XXXII. Exploration note. Moscow. 1979. 89 p.
3. Gogina N.I., Groshin S.I. State geological map of the USSR scale 1: 200 000. Series of the lower Lena. R-52-I, II. Exploration note. Moscow. 1976. 82 p.
4. Bidjiev R.A., Gorshkova E.R., Leonov B.N. State geological map of the USSR scale 1: 200 000. Series of the Verkhoyansk. Sheet R-52-III, IV. Explanatory note. Moscow, 1979. 71 p.
5. Vasiliev D.A., Ershova V.B. Tectonic structures of the upper Jurassic-lower Cretaceous deposits of the Northern part Priverkhoyansk foredeep // *Geology and mineral resources of the North-East of Russia: materials of the all-Russian scientific and practical conference*. Yakutsk: Publishing house of North-Eastern Federal University, 2013. P. 113–116.
6. Vetrov E.V. Evolution of thermotectonic events of the southeastern Altai in the late Mesozoic and Cenozoic according to apatite track thermochronology // *Thesis for the degree of candidate of geological and mineralogical Sciences*. Moscow, 2016. 200 p.
7. Soloviev A.V. Study of tectonic processes in the areas of convergence of lithospheric plates. Methods of track and structural analysis. Proceedings of the Geological Institute of RAS. Edition 577. Moscow: Nauka, 2008. 320 p.
8. Fleischer R.L., Price P.B., Walker R.M. Tracks of charged particles in solids: principles and applications. Part 2. Earth Sciences and space research. Translated by A.N. Komarov and L.K. Levsky. Ed. Yu.A. Shukolyukov. Moscow: Energoizdat, 1981. 264 p.
9. For G. Fundamentals of isotope Geology. Moscow: Mir, 1989. 585 p.
10. Fleischer R.L., Price P.B., Walker R.M. Nuclear tracks in solids: principles and applications. Berkeley: University of California Press, 1975. 605 p.
11. Wagner G., Van den Haute P. Fission track dating. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1992. 285 p.
12. McConnell D. Apatite. Wien: Springer-Verlag, 1973. 111 P. 197.
13. Price P.B., Walker R.M. Fossil tracks of charged particles in mica and the age of minerals // *Journal of Geophysical Research*. 1963. Vol. 68. P. 4847–4862.
14. Gleadow A.J.W., Duddy I.R., Green P.F., Hegarty K.A. Fission track lengths in the apatite annealing zone and the interpretation of mixed ages // *Earth and Planetary Science Letters*. 1986. Vol. 78. P. 245–254.
15. Gleadow A.J.W., Duddy I.R., Lovering J.F. Fission track analysis: New tool for the evaluation of thermal histories and hydrocarbon potential // *Austral. Petrol. Explor. Assoc. J.* 1983. Vol. 23. P. 93–102.
16. Green P.F., Duddy I.R., Gleadow A.J.W., Tingate P.R., Laskett G.M. Thermal annealing of fission tracks in apatite. A qualitative description // *Chemical Geology (Isotopes Geoscience Section)*. 1986. Vol. 59. P. 237–253.
17. Wagner G.A. The geological interpretation of fission track ages // *Transactions of the American Nuclear Society*. 1972. Vol. 15. P. 117.
18. Wagner G.A., Reimer G.M., 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. Univ. Padova*. 1977. Vol. 30. P. 1–27.
19. Ketcham R.A. Forward and inverse modeling of low-temperature thermochronometry data // *Rev. Mineral Geochem.* 2005. Vol. 58. P. 275–314.
20. Gallagher K. Transdimensional inverse thermal history modeling for quantitative thermochronology // *Journal of Geophysical Research and Solid Earth* 2012. Vol. 117. P. 1–16. <https://doi.org/10.1029/2011JB008825>.

21. Ketcham R.A., Carter A., Donelick R.A., Barba-
rand J., Hurford A.J. Improved modeling of fission-track
annealing in apatite. *American Mineralogist*. 2007. Vol 92.
P. 799–810. <https://doi.org/10.2138/am.2007.2281>.
22. Gleadow A.J.W., Kohn B.P., Brown R.W.,
O'Sullivan P.B., Raza A. Fission track thermotectonic
imaging of the Australian continent // *Tectonophysics*.
2002. Vol. 349. P. 5–21.
23. Green P.F., Duddy I.R. AFTA and low tempera-
ture thermochronology: the Geotrack approach // *Thermo*
2014. 14th International Conference on Thermochronology.
2014. P. 1–69.
24. Gleadow A.J.W., Brown R.W. Fission track ther-
mochronology and the long-term denudational response to
tectonics // *Geomorphology and Global Tectonics* / Sum-
merfield, M.J. (Ed.). New York: Wiley, 2000. P. 57–75.
25. Prokopiev A.V., Deykunenko A.V. The deforma-
tion of the structure of fold-thrust belts // *Tectonics, geo-
dynamics and metallogeny of the Republic of Sakha (Yaku-
tia)* / Ed. L.M. Parfenov, M.I. Kuzmin. Moscow: MAIK
«Nauka/Interperiodica», 2001. P. 156–198.
26. Prokopiev A., Khudoley A., Egorov A., Gertse-
va M., Afanasieva E., Sergeenko A., Ershova V., Va-
siliev D. Late Cretaceous-Early Cenozoic indicators of
continental extension on the Laptev Sea shore (North
Verkhoyansk) // *3P Arctic*, Stavanger, Norway, October
14–18, 2013. P. 170.

About the authors

VASILIEV Dmitry Anatolyevich, researcher, Diamond and Precious Metals Geology Institute SB RAS, 39
Lenina pr., Yakutsk, 677000, Russia,
<https://orcid.org/0000-0003-1201-3805>, juorankhay@mail.ru;

PROKOPIEV Andrey Vladimirovich, candidate of geological and mineralogical sciences, associate profes-
sor, head of the laboratory, senior researcher, Diamond and Precious Metals Geology Institute SB RAS, 39
Lenina pr., Yakutsk, 677000, Russia,
<https://orcid.org/0000-0003-0985-9535>, prokopiev@diamond.ysn.ru;

KHUDOLEY Andrey Konstantinovich, doctor of geological and mineralogical sciences, professor, In-
stitute of Earth Sciences, St. Petersburg State University, 3-9 Universitetskaya emb, St Petersburg,
199106, Russia;

ERSHOVA Victoria Bertovna, candidate of geological and mineralogical Sciences, associate professor,
head of department, Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University, 3-9 Universitetskaya emb,
St Petersburg, 199106, Russia;

KAZAKOVA Galina Germanovna, engineer-geologist, A.P. Karpinsky All-Russian Research Geological
Institute (VSEGEI), 74 Srediny pr., St Petersburg, 199106, Russia;

VETROV Evgeny Victorovich, candidate of geological and mineralogical sciences, head of the laboratory, Si-
berian Research Institute of Geology, Geophysics and Minerals, 67 Krasniy pr., Novosibirsk, 630091, Russia.

Citation

Vasiliev D.A., Prokopiev A.V., Khudoley A.K., Ershova V.B., Kazakova G.G., Vetrov E.V. Thermochronology
of the northern part of the Verkhoyansk fold-and-thrust belt according to apatite fission-track age // *Arctic and
Subarctic Natural Resources*. 2019, Vol. 24, N 4. P. 49–66. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-4-4>