



A MODEL OF THE LATE MESOZOIC AND CENOZOIC THERMOTECTONIC EVOLUTION OF THE PRE-MESOZOIC BASEMENT ROCKS IN SOUTH TUVA

E.V. Vetrov ✉, N.I. Vetrova 

Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

ABSTRACT. Thermotectonic modeling was performed for the crystalline rocks of South Tuva using the apatite fission-track analysis. Thermotectonic modeling made it possible to visualize the Late Mesozoic and Cenozoic cooling history of the Pre-Mesozoic basement rocks, and to reconstruct the chronology and scale of the denudational processes over the last 125 myr and the evolution of paleorelief of South Tuva over the last 100 myr. The modeling results depicted several Mesozoic-Cenozoic episodes of cooling due to differential denudation and exhumation of the Pre-Mesozoic basement rocks. A differential denudation is related to an asynchronous activation of fault structures controlling the tectonic evolution of South Tuva. It is shown that the Early Cretaceous (~125–100 Ma) activation of the Agar-Dag-Oka thrust fault zone could result from the post-collisional processes after the collision between Siberia and Amuria and/or consecutive collision between the Cimmerian blocks. An intense activation of the Agar-Dag-Oka fault zone in the Late Cretaceous (~100–75 Ma), accompanied by significant basement rock exhumation in the eastern South Tuva to absolute heights of 1200 m, could be caused by the Karakoram-Pamir collision in the south of Eurasia. The Late Cenozoic (25–0 Ma) activation of the main fault zones of South Tuva represents a far-field effect of the Indo-European collision on the southern Eurasian continent. At the same time, there were the maximum basement uplift in the junction zone between the South Tannuola and Ubsunur-Bii-Khem fault zones and the transformation of relief of South Tuva from moderately dissected, with absolute heights of 500 to 1400 m, to modern, with absolute heights of 800 to 2600 m.

KEYWORDS: Tuva; Central Asian fold belt; apatite fission-track analysis; modeling; Mesozoic; Cenozoic

FUNDING: The study was carried out as part of the Grant of the President of the Russian Federation MK-3510.2022.1.5 and that of the state assignment of the IGM SB RAS 122041400214-9.



RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Evgeny V. Vetrov, vetrov@igm.nsc.ru

Received: April 12, 2023

Revised: May 23, 2023

Accepted: June 14, 2023

FOR CITATION: Vetrov E.V., Vetrova N.I., 2023. A Model of the Late Mesozoic and Cenozoic Thermotectonic Evolution of the Pre-Mesozoic Basement Rocks in South Tuva. *Geodynamics & Tectonophysics* 14 (6), 0729. doi:10.5800/GT-2023-14-6-0729

English version: see article page online

МОДЕЛЬ ТЕРМОТЕКТОНИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ ПОРОД ДОМЕЗОЗОЙСКОГО ФУНДАМЕНТА ЮЖНОЙ ТУВЫ В ПОЗДНЕМ МЕЗОЗОЕ И КАЙНОЗОЕ

Е.В. Ветров, Н.И. Ветрова

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

АННОТАЦИЯ. Выполнено термотектоническое моделирование на основе данных трекового анализа апатита для кристаллических пород Южной Тувы. Термотектоническое моделирование позволило визуализировать историю охлаждения пород домезозойского фундамента в позднемезозойское и кайнозойское время, восстановить хронологию и масштаб денудационных процессов за последние 125 млн лет и реконструировать эволюцию палеорельефа Южной Тувы за последние 100 млн лет. Результаты моделирования демонстрируют несколько мезозойско-кайнозойских эпизодов охлаждения, связанных с дифференцированной денудацией и эксгумацией пород домезозойского фундамента. Неравномерная денудация связана с асинхронной активизацией разломных структур, контролирующей тектоническую эволюцию Южной Тувы. Показано, что раннемеловая (~125–100 млн лет) активизация Агардакско-Окинской надвиговой зоны могла произойти в результате постколлизийных процессов после столкновения Сибири и Амурии и/или последовательной коллизии между киммерийскими блоками. Усиленная активизация Агардакско-Окинской разломной зоны, сопровождаемая значительной эксгумацией пород восточной части фундамента Южной Тувы до абсолютных отметок 1200 м, в позднем мелу (~100–75 млн лет) могла быть вызвана Каракорамско-Памирской коллизией на юге Евразии. Активизация главных разломных зон Южной Тувы в позднем кайнозое (25–0 млн лет) является эффектом дальнего воздействия от Индо-Евразийской коллизии в южной части Евразийского континента. В это время произошло максимальное поднятие фундамента в зоне сочленения Южно-Таннуольской и Убсунур-Бийхемской разломных зон и трансформация рельефа Южной Тувы от среднерасчлененного с абсолютными высотами от 500 до 1400 м до современного с абсолютными высотами от 800 до 2600 м.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Тува; Центрально-Азиатский складчатый пояс; трековая термохронология апатита; моделирование; мезозой; кайнозой

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-3510.2022.1.5 и в рамках государственного задания ИГМ СО РАН (№ 122041400214-9).

1. ВВЕДЕНИЕ

Определение тектонических этапов в истории развития Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) является одним из важных направлений в изучении длительной эволюции орогенов. ЦАСП, расположенный между кратами Северного Китая, Тарима, Сибири и Балтики, является крупнейшим в мире орогеном [Sengör et al., 1993; Windley et al., 2007]. Его структура представляет собой сложный коллаж, который состоит из террейнов различной геодинамической природы (островодужных, коллизийных, внутриплитных), смещенных в результате закрытия различных ветвей Палеоазиатского океана и аккреционно-коллизийных событий в палеозое [Dobretsov, 2003; Buslov et al., 2004, 2013; Windley et al., 2007; Wilhem et al., 2012; Xiao et al., 2013]. Считается, что окончательное закрытие Палеоазиатского океана произошло в позднем палеозое [Didenko et al., 1994; Buslov, 2011, 2014] и сопровождалось коллизийной и/или постколлизийной тектономагматической активностью [Wang et al., 2009; Wilhem et al., 2012; Vetrov et al., 2021a]. После палеозойской сборки различные сегменты фундамента ЦАСП были реактивированы в течение мезозоя и кайнозоя в результате тектонических событий на южной и юго-восточной

окраине Евразийского континента [Molnar, Tapponnier, 1975; Dobretsov et al., 1996]. Крупномасштабная реактивация структур ЦАСП привела к деформации верхней части континентальной коры и формированию внутриконтинентальных горных хребтов, межгорных впадин и бассейнов, выполненных осадочными отложениями мезозойского и кайнозойского возраста. Осадочная летопись, сохранившаяся в межгорных впадинах и бассейнах, позволяет судить о характере тектонического режима этого времени. Полное понимание мезозойско-кайнозойской тектонической эволюции различных сегментов ЦАСП невозможно без использования прецизионных методов. Одним из таких методов, позволяющих получить информацию о тектонических процессах верхней коры в мезозойское и кайнозойское время, является трековая термохронология апатита. В настоящей работе авторы приводят результаты исследования термотектонической эволюции пород фундамента одного из северных сегментов ЦАСП (рис. 1) – Южной Тувы. Домезозойский фундамент Южной Тувы сформирован главным образом в ходе аккреционно-коллизийных событий в позднем протерозое – раннем палеозое [Zonenshain et al., 1990; Berzin, Kungurtsev, 1996; Dobretsov et al., 2003; Gordienko, 2004, 2019;

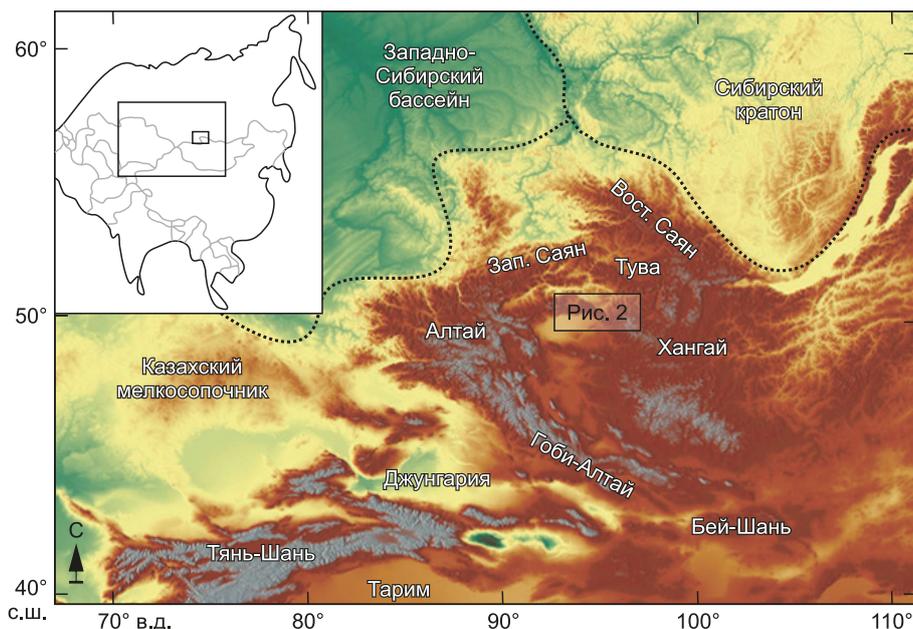


Рис. 1. Положение области исследования в северной части ЦАСП.

Fig. 1. Location of the study area in the northern part of the Central Asian fold belt.

Vladimirov et al., 2005; Dobretsov, Buslov, 2007; Vetrov et al., 2019]. Его дальнейшая тектоническая эволюция связана с многократной реактивацией крупных разломных структур, таких как Южно-Таннуольская, Убсунур-Бийхемская и Агардакско-Окинская зоны разломов (рис. 2) [Vetrov et al., 2020]. Судя по современным землетрясениям с магнитудой до 7 баллов [Ovsyuchenko, Butanayev, 2017], разрывные нарушения в районе исследований активны и по сей день контролируют новейшую тектоническую эволюцию Таннуольского хребта и Сангиленского нагорья.

Протерозойско-палеозойские породы Южной Тувы перекрыты мезозойскими и кайнозойскими отложениями; однако сохранившаяся осадочная летопись позволяет судить о характере тектонического режима лишь для ограниченного временного интервала, и многочисленные вопросы относительно этапов роста и денудации домезозойского фундамента остаются открытыми. В связи с этим выполнено термотектоническое моделирование по данным трекового анализа апатита [De Grave et al., 2014; Vetrov et al., 2022] для кристаллических пород Южной Тувы. Цель работы – визуализировать историю охлаждения пород домезозойского фундамента Южной Тувы в позднемезозойское – кайнозойское время, хронологию и масштаб денудационных событий и реконструировать эволюцию палеорельефа за последние 100 млн лет.

2. МЕТОДИКА ТЕРМОТЕКТОНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Стратегия термотектонического моделирования ранее была подробно описана в диссертационной работе [Vetrov, 2016]. В данном исследовании использована аналогичная методика на примере другого объекта

в пределах ЦАСП. Трековая термохронология апатита (apatite fission-track, AFT) является одним из наиболее чувствительных низкотемпературных методов геохронологии для получения количественной информации о тектонических процессах в условиях верхней коры на временных отрезках от миллионов до сотен миллионов лет. Как и в случае других термохронологических методов, трековый анализ апатита представляет собой метод геологического датирования, при котором сохранение продуктов радиоактивного распада U^{238} чувствительно к высоким температурам (выше 120 °C). Диапазон температур для частичного отжига треков в апатите ограничивается температурным интервалом ~60–120 °C, что, согласно геотермальному градиенту ~25 °C/км, характерному для складчатых поясов, соответствует глубине от ~2 до ~5 км верхней коры [Wagner, Van den Haute, 1992]. Данный метод является хорошим инструментом для восстановления термальной истории пород фундамента на протяжении длительного времени (до ~200–150 млн лет для ЦАСП). Во многих случаях низкотемпературные термохронометры показывают возраст, который редко связан со временем начала работы изотопной системы. Эти значения возраста часто регистрируют термальные и тектонические процессы, отражая результат длительной денудации земной поверхности, а не возраст формирования исследуемых пород. В большинстве случаев полученные трековые значения возраста апатита являются «смешанными» и показывают интегрированный результат низкотемпературной термальной истории в условиях верхней коры. Термотектоническое моделирование, основанное на параметрах, полученных в ходе трекового анализа апатита, и термальных историях для отдельных проб, позволяет визуализировать

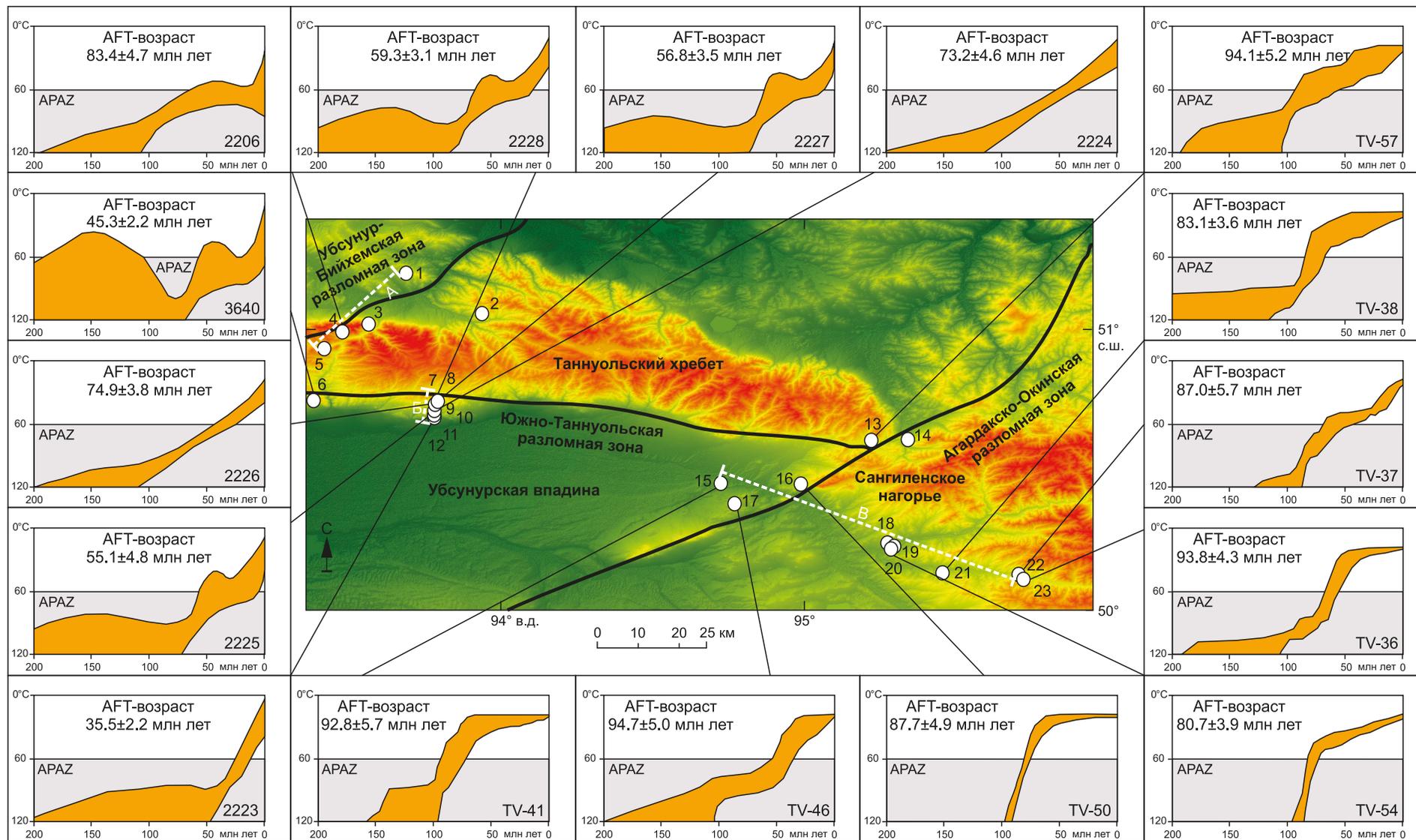


Рис. 2. Основные разломные зоны Южной Тувы и результаты трекового датирования апатита (по [De Grave et al., 2014; Vetrov et al., 2022]). Номера проб, показанные на карте, согласуются с порядковыми номерами в табл. 1.

Fig. 2. The main fault zones of South Tuva and the results of AFT dating after [De Grave et al., 2014; Vetrov et al., 2022]. The sample numbers shown on the map are consistent with the serial numbers in Table 1.

Таблица 1. Привязка проб, литология и трековые параметры
Table 1. Sampling sites, lithology, and fission-track parameters

№	Проба	Координаты		Высота, м	Привязка	Литология	AFT-возраст, млн лет	Средняя трековая длина, мкм
		с.ш.	в.д.					
1	2012	51°10'05"	93°42'07"	1249	п. Хову-Аксы	гранит	57.2±6.1	-
2	2100	51°02'13"	93°59'10"	1315	р. Кызыл-Эрик	диорит	69.9±4.2	-
3	2080	51°01'30"	93°33'43"	1664	р. Улуг-Сайлыг	плагиогранит	50.8±5.6	-
4	2206	50°59'20"	93°30'11"	1805	р. Улуг-Сайлыг	диорит	83.4±4.7	11.4±1.3 (41)
5	4545	50°56'06"	93°25'05"	1768	р. Холу	гранит	44.7±4.6	-
6	3640	50°45'32"	93°22'16"	1225	п. Ак-Чира	диорит	45.3±2.2	11.5±1.6 (43)
7	2223	50°43'23"	93°48'25"	1145	р. Деспен	гранит	35.5±2.2	12.1±1.8 (43)
8	2224	50°43'52"	93°48'25"	1226	р. Деспен	гранит	73.2±4.6	11.9±1.5 (51)
9	2225	50°44'35"	93°48'43"	1313	р. Деспен	гранит	55.1±4.8	12.1±1.7 (47)
10	2226	50°45'14"	93°48'50"	1439	р. Деспен	гранит	74.9±3.8	11.8±1.5 (58)
11	2227	50°45'50"	93°48'50"	1452	р. Деспен	гранит	56.8±3.5	12.2±1.5 (50)
12	2228	50°46'23"	93°48'54"	1523	р. Деспен	гранит	59.3±3.1	12.3±1.6 (53)
13	TV-57	50°37'31"	95°13'28"	1365	п. Самагалтай	диорит	94.1±5.2	13.1±1.5 (60)
14	TV-58	50°38'14"	95°18'34"	1210	п. Самагалтай	гранодиорит	90.6±9.3	-
15	TV-41	50°26'22"	94°46'29"	1225	р. Тес-Хем	тоналит	92.8±5.7	13.5±1.8 (100)
16	TV-50	50°28'31"	94°58'46"	1240	р. Тес-Хем	диорит	87.7±4.9	13.9±1.6 (73)
17	TV-46	50°30'19"	94°44'46"	1010	р. Тес-Хем	гранодиорит	94.7±5.0	12.7±2.3 (64)
18	TV-56	50°17'43"	95°17'11"	1250	п-ки Морен-Эрзин	аплит	89.3±7.5	-
19	TV-55	50°17'28"	95°18'18"	1140	п-ки Морен-Эрзин	гранит	80.8±7.2	-
20	TV-54	50°17'45"	95°17'10"	1270	п-ки Морен-Эрзин	гранит	80.7±3.9	13.6±0.9 (100)
21	TV-38	50°12'58"	95°25'21"	1235	п. Эрзин	гранит	83.1±3.6	13.7±1.3 (100)
22	TV-37	50°11'45"	95°36'24"	1385	п. Нарын	гнейс	87.0±5.7	13.2±1.7 (100)
23	TV-36	50°11'08"	95°36'49"	1540	п. Нарын	гнейс	93.8±4.3	13.5±2.1 (100)

Примечание. Значения трекового возраста апатита и средней трековой длины ± стандартное отклонение, привязка проб и литология приведены согласно [De Grave et al., 2014; Vetrov et al., 2022]. Количество измерений, по которым получены значения средней трековой длины, показаны в скобках.

Note. Apatite fission-track ages and mean track lengths ± standard deviation after [De Grave et al., 2014; Vetrov et al., 2022]. The number of measurements from which the mean track lengths were obtained is shown in parentheses.

дифференцированную историю остывания пород фундамента, его денудацию и инструментально обоснованную эволюцию рельефа [Kohn et al., 2002; Vetrov et al., 2016].

Термотектоническое моделирование подразумевает построение региональных схем распределения трековых параметров (трековых возрастов и средних трековых длин), серии пространственно-временных изображений, демонстрирующих динамику остывания пород фундамента от 120 °С до температур современной поверхности, денудационную хронологию и эволюцию рельефа. Схемы регионального распределения данных трекового датирования апатита позволяют визуализировать пространственную неоднородность полученных трековых параметров и оценить возраст наиболее древнего дискретного тектонического события. Результаты индивидуальных термальных историй, полученные для отдельных проб, представляются в виде последовательных изображений для определенных временных отрезков, демонстрирующих региональ-

ную историю остывания пород фундамента [Gallagher, Brown, 1999; Kohn et al., 2002]. В то время как результаты индивидуальных термальных историй подчеркивают детальные аспекты историй охлаждения отдельных образцов, региональное представление количественно оценивает среднюю скорость денудации фундамента в качестве функции времени. При использовании геотермального градиента ~25 °С/км значения температуры могут быть конвертированы в количественные оценки объемов денудации фундамента. Такой подход позволяет реконструировать денудационную хронологию для каждого образца и использует интерполяцию методом ближайшего соседа с целью создания пространственной сетки для каждого временного шага.

Эта сетка затем пространственно интегрируется на последующих временных отрезках для получения региональной денудационной хронологии. Такая схема удовлетворяет полученным данным и использует взвешивание, основанное на пространственном

распространении данных точек, для выполнения интерполяции. Этот метод не нуждается в сглаживании и освобождает от общей проблемы неопределенных характеристик в интерполируемом поле. С помощью комбинации денудационной модели и данных цифровой модели рельефа возможно моделирование эволюции палеотопографии. Палеотопография оценивается с помощью последовательного вычитания количества материала, удаленного денудацией, в определенный период времени на текущей поверхности с учетом изостатического равновесия. Оценки палеовысот, реконструированные в ходе термотектонического моделирования, отражают только пассивный ответ на денудационную разгрузку и с целью повышения достоверности могут быть дополнены другими параметрами, например данными изменения уровня Мирового океана относительно современной земной поверхности или оценками локальной деформации и/или амплитудами от надвигообразования [Kohn et al., 2005]. В настоящей работе выполнено термотектоническое моделирование для домезозойского фундамента Южной Тувы на основе данных трекового анализа апатита, включая 23 датировки и 16 термальных историй [De Grave et al., 2014; Vetrov et al., 2022]. Пробы для трекового анализа апатитов отобраны из палеозойских магматических и метаморфических пород в интервале высот 1000–1800 м вдоль трех профилей (рис. 3), секущих главные разломные зоны Южной Тувы (табл. 1).

Результаты, полученные в ходе аналитических процедур, приведены в табл. 1 и на рис. 4. Модели термальной истории (см. рис. 2) построены с использованием программного обеспечения QTQt [Gallagher, 2012] и HeFTy [Ketcham, 2005], уравнений отжига [Ketcham et al., 2007] и метода обратного моделирования Маркова –

Монте-Карло. Детали аналитических работ и стратегии моделирования термальных историй приведены в работах [De Grave et al., 2014; Vetrov et al., 2022]. Региональные схемы распределения трековых параметров (рис. 5), серии пространственно-временных изображений (рис. 6, 7, 8) построены с использованием инструментов и алгоритмов программ ArcMap и ArcScene (версия 10.4.1). История остывания пород фундамента (см. рис. 6) и денудационная хронология (см. рис. 7) показаны в 2D за последние 125 млн лет с временным интервалом 25 млн лет. Эволюция рельефа оценена с использованием данных SRTM и приведена в виде 3D-изображений за последние 100 млн лет с временным интервалом 25 млн лет (рис. 8).

3. ИЗУЧЕННОСТЬ ПОРОД ЮЖНОЙ ТУВЫ МЕТОДОМ ТРЕКОВОГО АНАЛИЗА АПАТИТА

Результаты трекового анализа апатита (трековый возраст апатита и средние значения трековых длин) для пород фундамента Южной Тувы приведены в табл. 1. В целом, полученные значения трекового возраста апатита варьируются от позднего мела (94.7 ± 5.0 млн лет) до позднего эоцена (35.5 ± 2.2 млн лет). Трековый возраст апатита из пород фундамента Южной Тувы несколько моложе, чем в других северных сегментах ЦАСП [De Grave et al., 2009, 2011; Arzhannikova et al., 2013; Zhimulev et al., 2021; Vetrov et al., 2021b], причем меловой и эоценовый возраст известен на схожих высотных отметках и, наоборот, близкие значения возраста получены для проб, отобранных с различных высот. Например, проба TV-46 отобрана с абсолютной высоты 1010 м и показала позднемеловой (~ 95 млн лет) трековый возраст апатита, в то же время проба TV-36, отобранная с высоты 1540 м, демонстрирует схожий

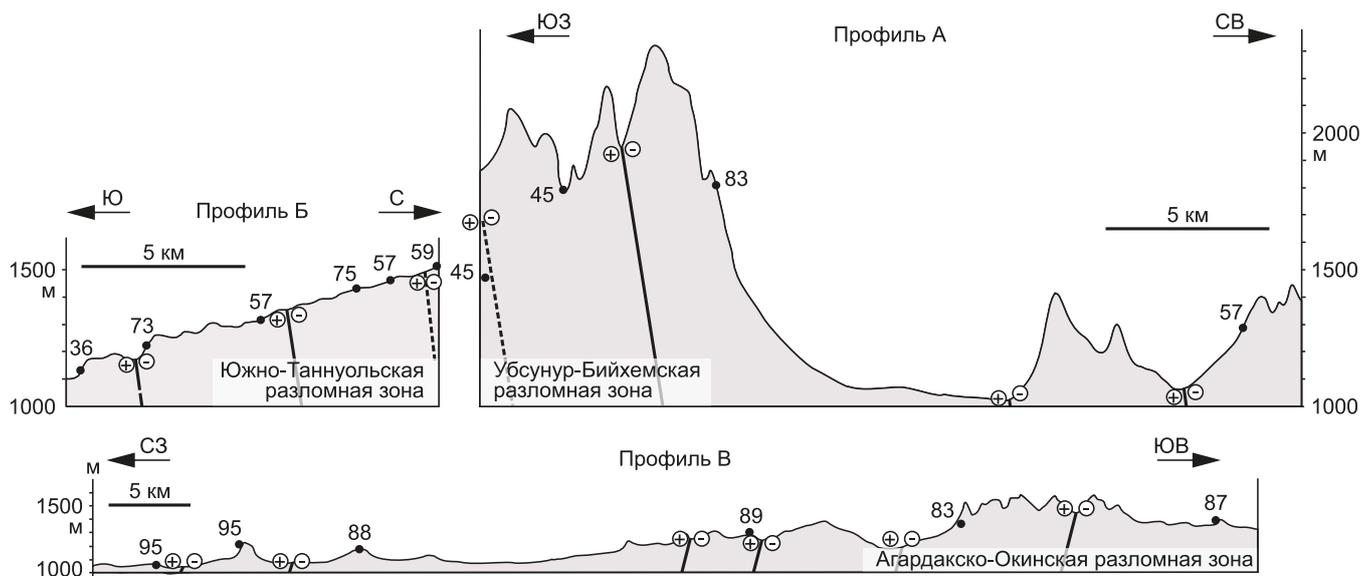


Рис. 3. Профили, секущие разломные зоны Южной Тувы, построенные с использованием результатов АФТ датирования (млн лет). Линии профилей показаны белыми пунктирными линиями на рис. 2.

Fig. 3. Profiles intersecting the fault zones of South Tuva plotted using the results of AFT dating (Ma). The profile lines are shown by white dotted lines in Fig. 2.

возраст. Как показано на рис. 3, подобный разброс в полученных датировках наблюдается для трех профилей, пересекающих основные разломные зоны исследуемой территории. Однако в случае Южно-Таннуольской и Убсунур-Бийхемской разломных зон нарушение «нормального» вертикального профиля связано с активизацией сбросовых структур, а в случае Агардакско-Окинской разломной зоны – с активизацией взбросовых структур. Очевидно, что главная фаза активизации разломных структур с различной кинематикой должна иметь место в различное время. С целью оценки периодов тектонической реактивации (быстрое охлаждение) и периодов тектонического покоя (медленное охлаждение) по трековым параметрам для каждого образца сопоставлены значения средних трековых длин в зависимости от его возраста (см. рис. 4). Значения средней трековой длины для пород фундамента Южной Тувы колеблются от 11.4 ± 1.3 до 13.9 ± 1.6 мкм. Распределения трековых длин имеют преимущественно асимметричный характер с широким основанием [De Grave et al., 2014; Vetrov et al., 2022]. График зависимости между трековым возрастом апатита и значением средней трековой длины указывает на то, что докембрийский фундамент Южной Тувы испытал несколько термотектонических событий. На этом графике меловые датировки соответствуют высоким значениям средней трековой длины, что предполагает быстрый выход пород фундамента из зоны частичного отжига апатита (АРАЗ, температурный интервал 120–60 °С). В свою очередь, снижение значений трекового возраста

апатита (от меловых до эоценовых) при снижении значений средней трековой длины (от 13.6 до 11.5 мкм) свидетельствует о длительном пребывании проанализированных пород в зоне частичного отжига апатита или в еще более глубоких зонах верхней коры.

В пределах исследуемой территории для пород докембрийского фундамента Южной Тувы смоделировано 16 термальных историй с использованием алгоритма случайного поиска Монте-Карло. Полученные модели термальных историй демонстрируют различные сценарии охлаждения пород: одно-, двух-, трех- и пятиэтапный (см. рис. 2). Вариант одноэтапного охлаждения смоделирован, например, для проб 2223 и 2226, что предполагает умеренное охлаждение пород фундамента от 120 °С до температуры современной поверхности с постоянной скоростью. Двухэтапная модель термальной истории, полученная для проб TV-50 и TV-54, показывает позднемеловой (~100–80 млн лет) этап быстрого охлаждения от 120 °С до зоны полной стабильности трековой системы апатита (ТАЗ, ниже 60 °С) с последующим субгоризонтальным поведением тренда Т-*t* кривой вплоть до настоящего времени.

Трехэтапное охлаждение пород фундамента фиксируется, например, в пробе TV-46 и демонстрирует два этапа быстрого охлаждения (125–100 млн лет и последние 60 млн лет), разделенные этапом мел-палеогенового умеренного охлаждения. Для некоторых проб (например, проба 3640) кроме этих трех этапов проявлены еще два более древних этапа – юрско-меловое (~190–140 млн лет) медленное охлаждение и

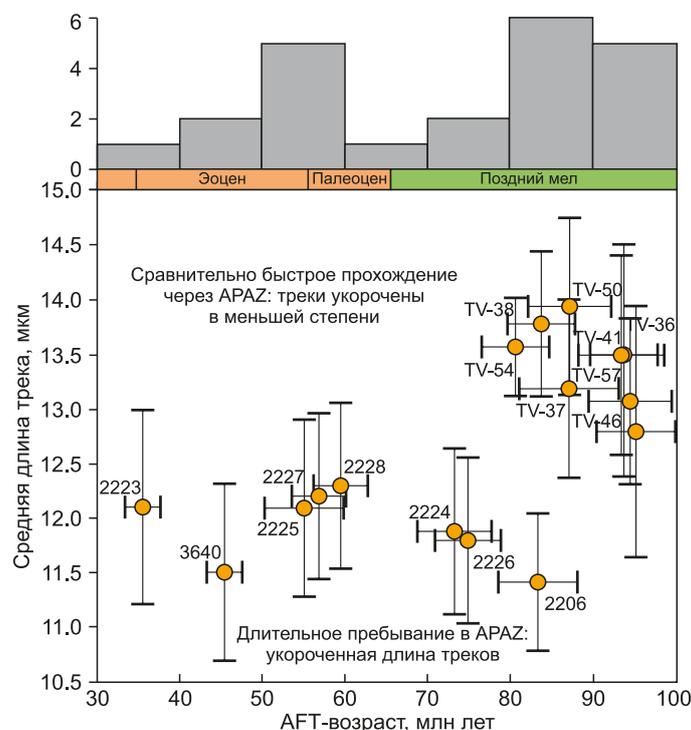


Рис. 4. График отношения трековых возрастов апатита и средней трековой длины (снизу), распределение трековых возрастов апатита по частоте (сверху).

Fig. 4. Plot of AFT ages versus mean track lengths (bottom), frequency distribution of AFT ages (top).

раннемеловая (~140–125 млн лет) стабильность или даже незначительное нагревание.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕРМОТЕКТОНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Позднемезозойская и кайнозойская история охлаждения пород домезозойского фундамента. Для анализа трековых параметров (трековое значение возраста апатита и средняя трековая длина), полученных для пород Южной Тувы в пространстве, показано их региональное распределение (см. рис. 5). Это распределение показало высокую концентрацию меловых (от ~90 до 80 млн лет) определений в восточной части исследуемой территории (Сангиленское нагорье) и более молодых – палеоцен-эоценовых (от ~60 до 45 млн лет) – датировок в западной части (Таннуольский хребет). Региональное распределение значений средней трековой длины с концентрацией наименьших значений длины (от 11.6 до 12.0 мкм) в зоне сочленения Южно-Таннуольской и Убсунур-Бийхемской разломных зон коррелирует с распределением трековых возрастов апатита. С целью обобщения различных типов термальных историй построена серия изображений (см. рис. 6), отображающих региональную историю остывания пород фундамента Южной Тувы во время их транспортировки к поверхности через верхнюю кору.

Судя по этой серии изображений, динамика остывания пород фундамента Южной Тувы неоднородна, однако проявлены общие закономерности. Наиболее контрастное охлаждение территории произошло в позднем мелу (100–75 млн лет) и позднеолигоцен-голоценовое время (25–0 млн лет). Мел-палеогеновый (75–50 млн лет) интервал характеризуется сравнительно стабильным положением палеоизотерм.

Позднемезозойская и кайнозойская денудация пород домезозойского фундамента. Дифференцированный характер охлаждения поверхности фундамента Южной Тувы можно объяснить неравномерной эксгумацией и денудацией пород фундамента в связи с различными этапами тектонической активизации основных разломных структур. Для визуализации региональных денудационных событий за последние 125 млн лет на серии изображений с шагом 25 млн лет показаны объемы денудированных толщ в объеме от 0 до 2000 м (см. рис. 7). Смена областей с высокими объемами денудированных толщ маркирует различные этапы активности региональных палеозойских разломных зон, контролирующей эволюцию фундамента Южной Тувы. Региональные модели выявляют несколько повышенную денудацию (до 40 м/млн лет) пород фундамента Южной Тувы в зоне сочленения Южно-Таннуольской и Агардакско-Окинской разломных зон в конце

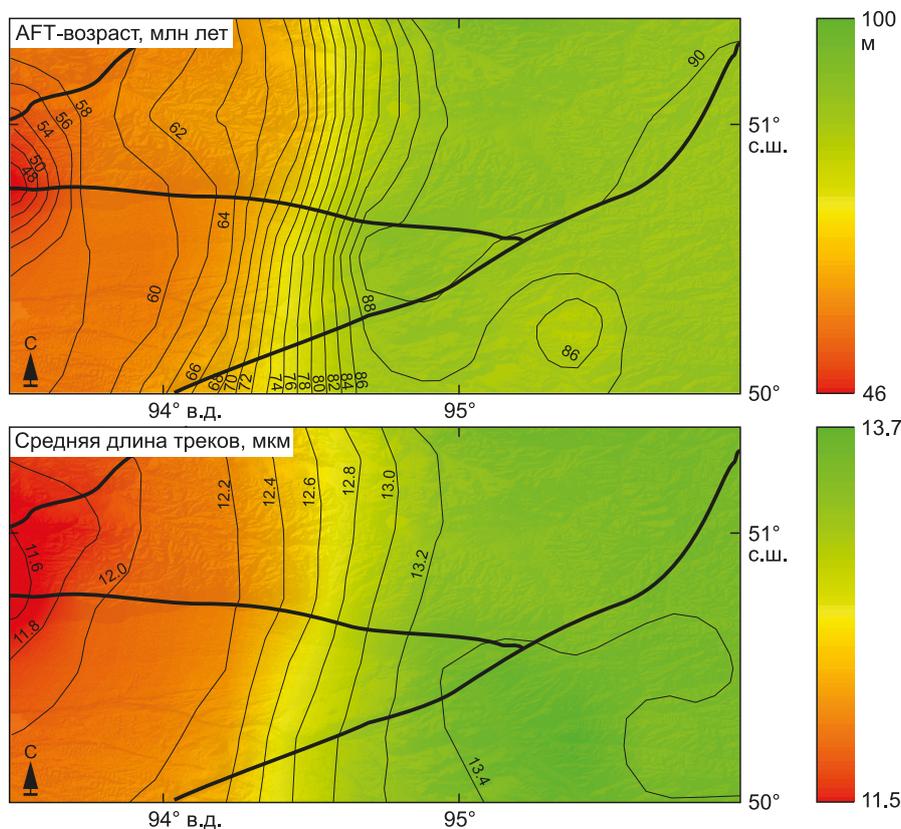


Рис. 5. Региональное распределение трековых возрастов апатита (сверху, млн лет) и средних значений трековой длины (снизу, мкм) для пород домезозойского фундамента Южной Тувы.

Fig. 5. Regional distribution of AFT ages (top, Ma) and mean fission-track lengths (bottom, μm) for the Pre-Mesozoic basement rocks of South Tuva.

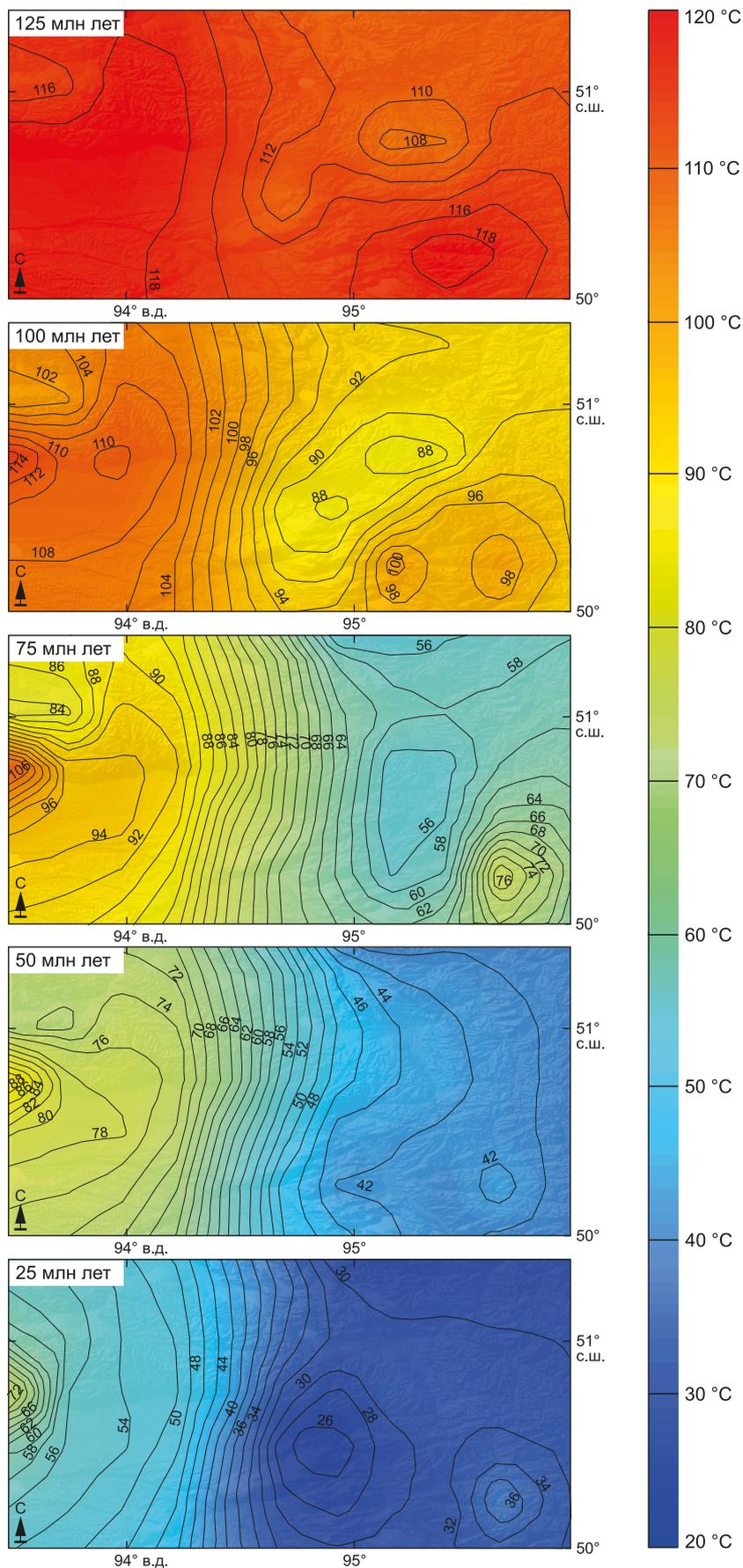


Рис. 6. История остывания пород домезозойского фундамента Южной Тувы за 125 млн лет.
Fig. 6. Cooling history of the South Tuva basement for 125 million years.

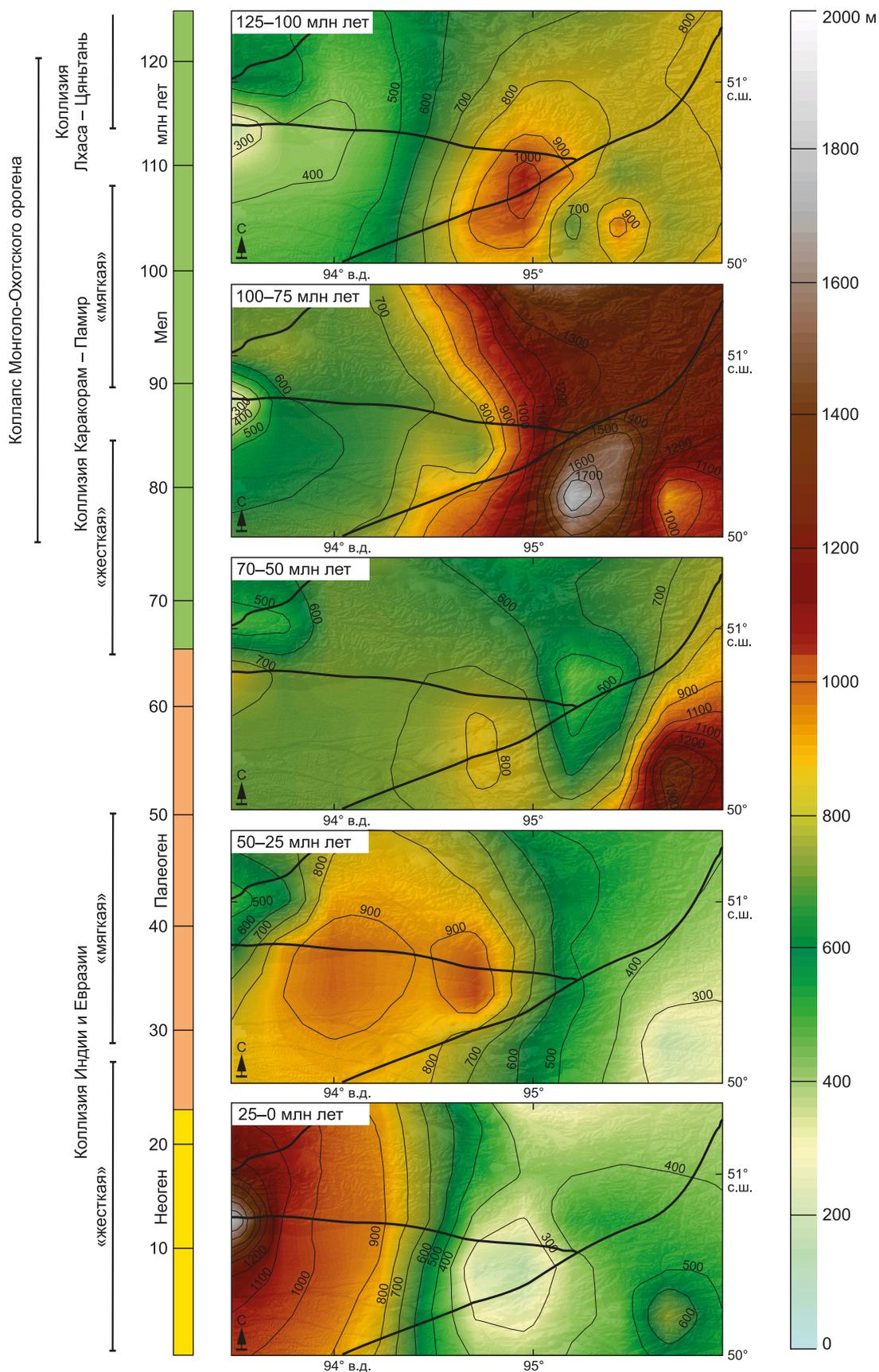


Рис. 7. Хронология денудации пород домезозойского фундамента Южной Тувы. Слева – хронология тектонических событий на южной и юго-восточной окраине Евразии.

Fig. 7. Denudation chronology of the Pre-Mesozoic basement rocks of South Tuva. Shown on the left is the chronology of tectonic events at the southern and southeastern margins of Eurasia.

раннего мела (125–100 млн лет). В то же время для остальной территории Южной Тувы сохраняется общий невысокий денудационный фон от 10 до 20 м/млн лет. В позднем мелу (100–75 млн лет) денудация пород фундамента усиливается до 70 м/млн лет в восточной части исследуемой области главным образом за счет активизации Агардакско-Окинской разломной зоны. Поздний мел – ранний палеоген (75–50 млн лет) характеризуется некоторой стабилизацией денудационной активности; по крайней мере, основные разломные структуры Южной Тувы пребывали в стабильном тектоническом состоянии. Последующее повышение денудации (до 40 м/млн лет на фоне 10–20 м/млн лет) пород фундамента Южной Тувы отмечается вдоль Южно-Таннуольской зоны разломов в позднем палеогене (50–25 млн лет). Денудация и эксгумация фундамента в позднем палеогене привели к образованию грубо-обломочных отложений позднеэоценовой кургакской свиты в Убсунурской впадине к югу от Южно-Таннуольской разломной зоны. Эта денудационная активность продолжилась в неогене (25–0 млн лет), достигнув максимальных значений (до 50 м/млн лет) в зоне сочленения Южно-Таннуольской и Убсунур-Бийхемской разломных зон. Показатели денудации в области, контролируемой Агардакско-Окинской зоной разломов, в то же время незначительны (15–20 м/млн лет). Неогеновая повышенная денудация и эксгумация пород Южной Тувы подтверждаются появлением континентальной молассы в Убсунурской впадине. Поздненеогеновая реактивация Южно-Таннуольской и Убсунур-Бийхемской разломных зон продолжалась в течение четвертичного периода и активна до сих пор. Об этом свидетельствуют концентрации эпицентров современных землетрясений с магнитудой до 7 баллов и палеоземлетрясения с возрастом 3000–3500 лет, известные в пределах Южной Тувы [Ovsyuchenko, Butanayev, 2017].

Позднемезозойская и кайнозойская история формирования рельефа. Термотектоническое моделирование, основанное на результатах трекового анализа апатита, включая термальные истории, позволяет оценить только динамику вертикальных движений. Однако это один из немногих методов, способных воссоздать инструментально обоснованную модель эволюции рельефа на протяжении длительного времени. На рис. 8 представлена серия 3D изображений рельефа для пяти временных срезов за последние 100 млн лет. Палеотопографическая схема для временного среза на 100 млн лет демонстрирует, что в начале позднего мела территория Южной Тувы представляла собой выровненную поверхность с абсолютными высотами до 750 м. Далее, в конце позднего мела (75 млн лет), на фоне повышения глобального уровня Мирового океана в пределах Южной Тувы начали появляться приподнятые участки (район современного Сангиленского нагорья) с абсолютными отметками от 800 до 1200 м относительно уровня Мирового океана того времени. Существовавший в это время на смежной территории

эпиконтинентальный морской бассейн (Западно-Сибирский) имел связь с Мировым океаном и мог служить базисом денудации [Novikov et al., 2019]. Мел-палеогеновый (75–50 млн лет) этап характеризуется равномерной денудацией пород Южной Тувы и отсутствием каких-либо контрастных тектонических поднятий. В это время на территории северных регионов ЦАСП происходила пенепленизация с формированием кор выветривания в связи со сменой климата на более теплый [Dobretsov et al., 1996; Velichko, 1999]. Незначительное повышение высот на палеотопографической схеме для временного среза на 50 млн лет, по сравнению с временным срезом на 75 млн лет, может быть обусловлено снижением уровня Мирового океана 100–125 м в мелу – палеогене (75–50 млн лет). В позднем палеогене (25 млн лет) существовал среднерасчлененный рельеф с абсолютными высотами от 500 до 1400 м, в это же время начинается воздымание западной части исследуемой территории (район современного Таннуольского хребта). Современная орография Южной Тувы была сформирована за последние 25 млн лет. В этот период времени образовались максимально высокие горные системы (например, Таннуольский хребет), обеспечившие поступление обломочного материала в соседнюю Убсунурскую впадину.

5. ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ ЮЖНОЙ ТУВЫ В МЕЗОЗОЕ И КАЙНОЗОЕ. ОБСУЖДЕНИЕ

Моделирование термотектонических процессов верхней части земной коры Южной Тувы, основанное на данных трекового анализа апатита, демонстрирует несколько мезозойско-кайнозойских эпизодов охлаждения, связанных с дифференцированной денудацией и эксгумацией домезозойского фундамента после его позднепалеозойской консолидации. Считается, что на скорость денудации, а следовательно, и на динамику тектонического поднятия фундамента может повлиять ряд факторов, включая тектонический, климатический и колебания глобального уровня Мирового океана. В случае Южной Тувы региональную дифференциацию денудационной истории, которая связана с неравномерной эксгумацией пород фундамента, сложно объяснить глобальным падением/подъемом уровня Мирового океана и климатическими изменениями. Следовательно, ключевая роль в мезозойской и кайнозойской истории геологической эволюции верхней части земной коры Южной Тувы отведена тектоническим факторам. В ходе изучения мезозойских и кайнозойских тектономагматических событий Тувинского сегмента ЦАСП высказано предположение об активном мантийно-коровом взаимодействии в данном сегменте [Yarmolyuk et al., 2001; Lebedev et al., 2001, 2016], которое может отвечать за периодическую активизацию разломных структур. Однако выявленные эпизоды денудации и эксгумации пород трудно объяснить активностью мантийного плюма под фундаментом Южной Тувы, поскольку если бы вертикальные движения

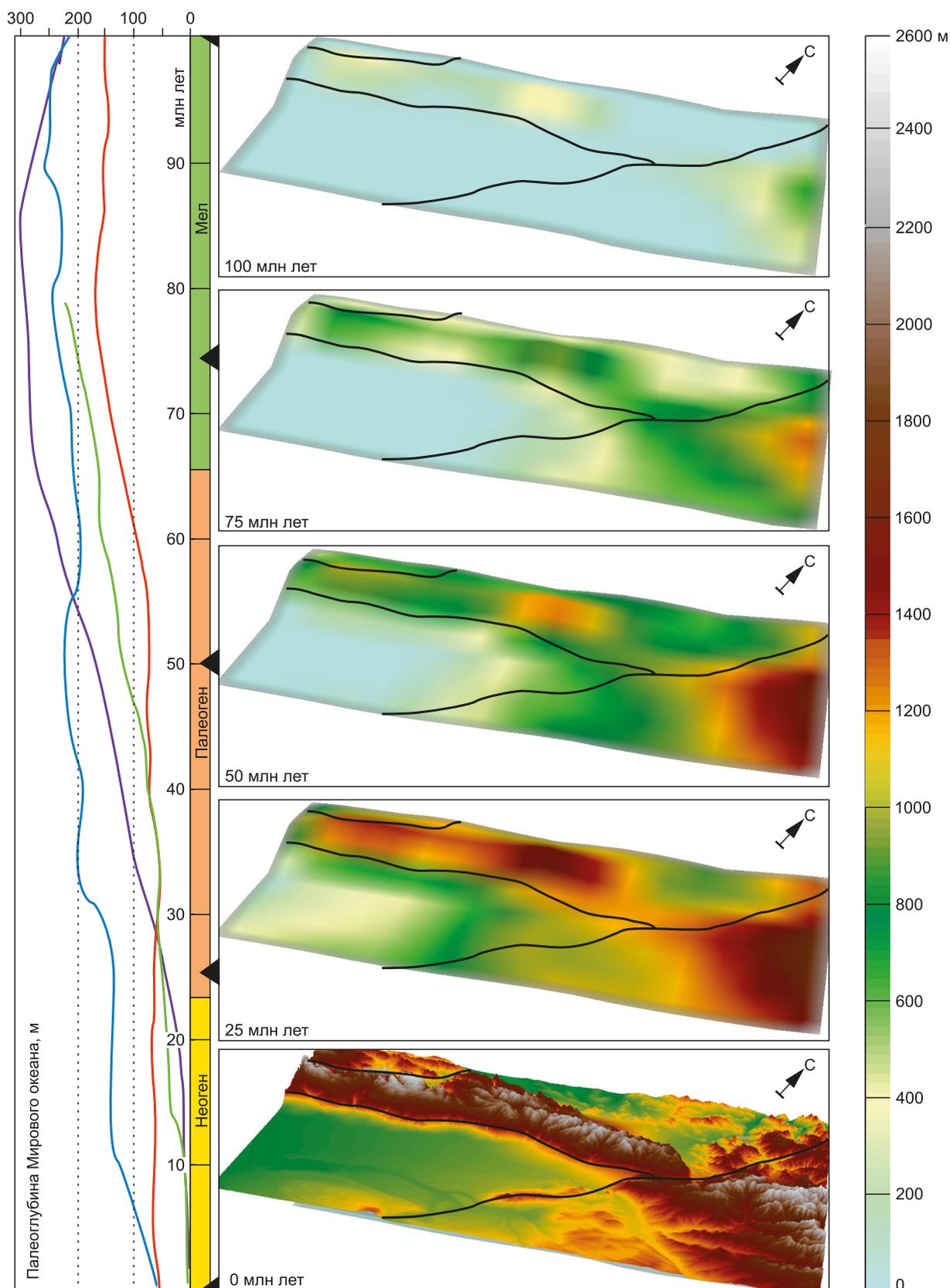


Рис. 8. Эволюция рельефа Южной Тувы за 100 млн лет. Слева фиолетовой, зеленой, синей и красной линиями показана история колебания уровня Мирового океана согласно [Pitman, 1978; Kominz, 1984; Haq et al., 1987; Müller et al., 2008] соответственно.

Fig. 8. Evolution of the landscape of South Tuva over 100 million years. Purple, green, blue, and red lines on the left show the history of global sea level fluctuations after [Pitman, 1978; Kominz, 1984; Haq et al., 1987; Müller et al., 2008], respectively.

вызывались конвективными напряжениями мантийного течения, то они были бы проявлены в более широком масштабе и привели бы к синхронной активизации различных региональных разломных структур. Более того, в исследуемой южной части Тувинского сегмента ЦАСП не известны магматические образования мезозойского и кайнозойского возраста, которые могли бы указывать на деятельность мантийного плюма под литосферой Южной Тувы.

Эпизоды тектонической активности региональных разломных структур, сопровождавшиеся денудацией и эксгумацией пород Южной Тувы, могли быть проявлены в результате эффекта дальнего воздействия тектонических процессов на южной и юго-восточной границе Евразии в мезозойское и кайнозойское время. Усиление денудации и тектонического поднятия фундамента Южной Тувы в раннем мелу (120–100 млн лет) могло быть вызвано эффектами дальнего воздействия от (1) постколлизии растяжения литосферы после закрытия Монголо-Охотского океана и последующей конвергенции между Сибирью и Амурией [Yang et al., 2015; Jolivet et al., 2017], (2) коллизии между блоком Лхаса к южной окраине Евразии [Kapp et al., 2007; Zhu et al., 2013, 2016] или (3) коллизии между блоком Каракорам и Памиром (см. рис. 7). В поздней юре до раннего мела после закрытия Монголо-Охотского океана зафиксирована тектоника растяжения [Zorin, 1999; Sklyarov et al., 1997; Donskaya et al., 2013; Sorokin et al., 2020], связанная с гравитационным коллапсом Монголо-Охотского орогена [Jolivet et al., 2017] на юго-восточной окраине Евразии. Предполагается, что почти одновременно с этим событием произошло столкновение Лхасского блока с блоком Цяньтань вдоль южной окраины Евразии, после чего произошла коллизия между Каракорамским блоком и Памиром, предшествовавшая основной позднемеловой фазе конвергенции между этими блоками. Все эти тектонические события могли привести к денудации и эксгумации фундамента Южной Тувы в раннем мелу (~125–100 млн лет), однако вклад каждого из них трудно оценить.

В позднем мелу (100–75 млн лет) Каракорамский блок сместился на север и столкнулся с Памиром на южной окраине Евразии [Schwab et al., 2004]. Поле напряжений, вызванное Каракорамско-Памирской коллизией, распространилось на северо-восток в глубь континента Евразии и привело к реорганизации тектонических блоков ЦАСП и реактивировало надвиговые структуры, такие как Агардакско-Окинская разломная зона, что привело к эксгумации восточной части фундамента Южной Тувы в это время.

В дальнейшем в результате закрытия океана Неоетис Индия столкнулась с Евразией в раннем кайнозое, что привело к формированию широкой зоны орогенов на юге Евразийского континента [Yin, Harrison, 2000; Green et al., 2008]. Это крупномасштабное столкновение инициировало новый эпизод реактивации многочисленных сегментов к северу от южной окраины Евразии и могло привести к еще одному эпизоду

эксгумации фундамента Южной Тувы в связи с реактивацией крупных разломных структур, таких как Южно-Таннуольская и Убсунур-Бийхемская разломные зоны. В позднем палеогене (50–25 млн лет) коллизия Индии и Евразии инициировала активизацию Южно-Таннуольской и Убсунур-Бийхемской разломных зон и умеренное поднятие восточной части Южной Тувы. В неогене (25–0 млн лет) эта коллизия перешла в основную фазу с максимальным поднятием фундамента Южной Тувы в зоне сочленения сбросовых разломных зон. Полученная обобщенная модель региональной денудации дает довольно грубую оценку возраста неогеновой реактивации разломных структур и всегда может быть уточнена по анализу частных термальных историй, смоделированных для отдельных проб. Например, судя по отдельным термальным историям и комплексной модели, построенной для Таннуольского хребта [Vetrov et al., 2022], максимальная денудация пород фундамента Южной Тувы началась ~15 млн лет назад в области сочленения Южно-Таннуольской и Убсунур-Бийхемской разломных зон.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате термотектонического моделирования на основе данных трекового анализа апатита визуализирована история охлаждения пород домезозойского фундамента Южной Тувы в позднемезозойско-кайнозойское время, восстановлена хронология и масштаб денудационных событий и реконструирована эволюция палеорельефа за последние 100 млн лет. Выявлен дифференцированный характер охлаждения поверхности фундамента Южной Тувы – наиболее контрастное охлаждение произошло 100–75 млн лет назад и за последние 25 млн лет. Анализ денудационной хронологии также показал неравномерную эксгумацию пород в связи с различными этапами реактивации главных разломных структур, контролирующей тектоническую эволюцию домезозойского фундамента Южной Тувы. В свою очередь, активизация разломных структур вызвана эффектом дальнего воздействия тектонических процессов на южной и юго-восточной окраине Евразийского континента. Раннемеловая (~125–100 млн лет) активизация Агардакско-Окинской надвиговой разломной зоны могла произойти в результате постколлизии процессов после конвергенции между Сибирью и Амурией и/или последовательной коллизии между так называемыми киммерийскими блоками (Лхаса, Цяньтань, Каракорам, Памир). Позднемеловые (~100–75 млн лет) тектонические процессы на юге Евразии, такие как Каракорамско-Памирская коллизия, усилили активизацию Агардакско-Окинской разломной зоны и привели к значительной эксгумации восточной части фундамента Южной Тувы в это время. Кайнозойская активизация главных разломных зон Южной Тувы вызвана масштабной реорганизацией тектонических блоков в связи с Индо-Евразийской коллизией в южной части Евразийского континента. С основной фазой этой коллизии (25–0 млн лет) связано

максимальное поднятие фундамента Южной Тувы в зоне сочленения Южно-Таннуольской и Убсунур-Бий-хемской разломных зон.

Реконструированная эволюция палеорельефа Южной Тувы показала, что в начале позднего мела (~100 млн лет) территория Южной Тувы представляла собой выровненную поверхность со значениями высоты до 750 м. В конце позднего мела (75 млн лет) начали появляться приподнятые участки с абсолютными отметками от 800 до 1200 м. В позднем палеогене (25 млн лет) существовал среднерасчлененный рельеф со значениями абсолютной высоты от 500 до 1400 м. Современный рельеф Южной Тувы был сформирован за последние 25 млн лет с наиболее интенсивными преобразованиями в последние 15 млн лет.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны М.М. Буслову и анонимному рецензенту за конструктивные замечания, которые, безусловно, способствовали улучшению статьи.

8. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Both authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

9. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

Both authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Arzhannikova A.V., Jolivet M., Arzhannikov S.G., Vassallo R., Chauvet A., 2013. The Time of the Formation and Destruction of the Meso-Cenozoic Peneplanation Surface in East Sayan. *Russian Geology and Geophysics* 54 (7), 685–694. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.06.004>.

Berzin N.A., Kungurtsev L.V., 1996. Geodynamic Interpretation of Altai-Sayan Geological Complexes. *Russian Geology and Geophysics* 37 (1), 63–81 (in Russian) [Берзин Н.А., Кунгурцев Л.В. Геодинамическая интерпретация геологических комплексов Алтае-Саянской области // Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 1. С. 63–81].

Buslov M.M., 2011. Tectonics and Geodynamics of the Central Asian Fold Belt: The Role of Late Paleozoic Large-Amplitude Strike-Slip Faults. *Russian Geology and Geophysics* 52 (1), 52–71. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.12.005>.

Buslov M.M., 2014. Terrane Tectonics of the Central Asian Orogenic Belt. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (3), 641–665 (in Russian) [Буслов М.М. Террейновая тектоника Центрально-Азиатского складчатого пояса // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 3. С. 641–665]. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-3-0147>.

Buslov M.M., Geng H., Travin A.V., Otgonbaatar D., Kulikova A.V., Chen M., Stijn G., Semakov N.N., Rubanova E.S., Abildaeva M.A., Voitishchek E.E., Trofimova D.A., 2013. Tectonics and Geodynamics of Gorny Altai and Adjacent Structures of the Altai-Sayan Folded Area. *Russian Geology and Geophysics* 54 (10), 1250–1271. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.09.009>.

Buslov M.M., Watanabe T., Fujiwara Y., Iwata K., Smirnova L.V., Safonova I.Yu., Semakov N.N., Kiryanova A.P., 2004. Late Paleozoic Faults of the Altai Region, Central Asia: Tectonic Pattern and Model of Formation. *Journal of the Asian Earth Science* 23 (5), 655–671. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(03\)00131-7](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(03)00131-7).

De Grave J., Buslov M.M., Van den Haute P., Metcalf J., Dehandschutter B., McWilliams M.O., 2009. Multi-Method Chronometry of the Teletskoye Graben and Its Basement, Siberian Altai Mountains: New Insights on Its Thermo-Tectonic Evolution. *Geological Society of London Special Publications* 324, 237–259. <https://doi.org/10.1144/SP324.17>.

De Grave J., De Pelsmaeker E., Zhimulev F.I., Glorie S., Buslov M.M., Van den Haute P., 2014. Meso-Cenozoic Building of the Northern Central Asian Orogenic Belt: Thermotectonic History of the Tuva Region. *Tectonophysics* 621, 44–59. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.01.039>.

De Grave J., Glorie S., Zhimulev F.I., Buslov M.M., Elburg M., Vanhaecke F., Van den Haute P., 2011. Emplacement and Exhumation of the Kuznetsk–Alatau Basement (Siberia): Implications for the Tectonic Evolution of the Central Asian Orogenic Belt and Sediment Supply to the Kuznetsk, Minusa and West Siberian Basins. *Terra Nova* 23 (4), 248–256. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2011.01006.x>.

Didenko A.N., Mossakovsky A.A., Pechersky D.M., Ruzhentshev S.V., Samygin S.G., Kheraskova T.N., 1994. Geodynamics of Paleozoic Oceans of Central Asia. *Russian Geology and Geophysics* 35 (7–8), 59–75.

Dobretsov N.L., 2003. Mantle Plumes and Their Role in the Formation of Anorogenic Granitoids. *Russian Geology and Geophysics* 44 (12), 1243–1261.

Dobretsov N.L., Buslov M.M., 2007. Late Cambrian-Ordovician Tectonics and Geodynamics of Central Asia. *Russian Geology and Geophysics* 48 (1), 71–82. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2006.12.006>.

Dobretsov N.L., Buslov M.M., Delvaux D., Berzin N.A., Ermikov V.D., 1996. Meso- and Cenozoic Tectonics of the Central Asian Mountain Belt: Effects of Lithospheric Plate Interaction and Mantle Plumes. *International Geology Review* 38 (5), 430–466. <https://doi.org/10.1080/00206819709465345>.

Dobretsov N.L., Buslov M.M., Vernikovskiy V.A., 2003. Neoproterozoic to Early Ordovician Evolution of the Paleo-Asian Ocean: Implications to the Breakup of Rodinia. *Gondwana Research* 6 (2), 143–159. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70966-7](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70966-7).

Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Mazukabzov A.M., Ivanov A.V., 2013. Late Paleozoic – Mesozoic Subduction-Related Magmatism at the Southern Margin of the Siberian Continent and the 150 Million-Year History of the Mongol-Okhotsk Ocean. *Journal of Asian Earth Sciences* 62, 79–97. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.07.023>.

Gallagher K., 2012. Transdimensional Inverse Thermal History Modeling for Quantitative Thermochronology. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 117 (B2), B02408. <https://doi.org/10.1029/2011JB008825>.

Gallagher K., Brown R.W., 1999. Denudation and Uplift at Passive Margins: The Record on the Atlantic Margin of Southern Africa. *Philosophical Transactions of the Royal Society A. Mathematical Physical and Engineering Sciences* 357 (1753), 835–859. <https://doi.org/10.1098/rsta.1999.0354>.

Gordienko I.V., 2004. Volcanism in Various Geodynamic Settings of the Central Asian Orogenic Belt. *Lithosphere* (3), 4–16 (in Russian) [Гордиенко И.В. Вулканизм различных геодинамических обстановок Центрально-Азиатского складчатого пояса // Литосфера. 2004. № 3. С. 4–16].

Gordienko I.V., 2019. Relationship between Subduction-Related and Plume Magmatism at the Active Boundaries of Lithospheric Plates in the Interaction Zone of the Siberian Continent and Paleasian Ocean in the Neoproterozoic and Paleozoic. *Geodynamics & Tectonophysics* 10 (2), 405–457 (In Russian) [Гордиенко И.В. Связь субдукционного и плюмового магматизма на активных границах литосферных плит в зоне взаимодействия Сибирского континента и Палеоазиатского океана в неопротерозое и палеозое // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. № 2. С. 405–457]. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-2-0420>.

Green O.R., Searle M.P., Corfield R.I., Corfield R.M., 2008. Cretaceous-Tertiary Carbonate Platform Evolution and the Age of the India-Asia Collision along the Ladakh Himalaya (Northwest India). *The Journal of Geology* 116 (4), 331–353. <https://doi.org/10.1086/588831>.

Haq B.U., Hardenbol J., Vail P.R., 1987. Chronology of Fluctuating Sea Levels since the Triassic. *Science* 235 (4793), 1156–1167. <https://doi.org/10.1126/science.235.4793.1156>.

Jolivet M., Arzhannikova N., Frolov A.O., Arzhannikov S., Kulagina N., Akulova V., Vassallo R., 2017. Late Jurassic – Early Cretaceous Paleoenvironment Evolution of the Transbaikalian Basins (SE Siberia): Implications for the Mongol-Okhotsk Orogeny. *Bulletin Societe Geologique de France* 188 (1–2), 9. <https://doi.org/10.1051/bsgf/2017010>.

Kapp P., DeCelles P.G., Gehrels G.E., Heizler M., Ding L., 2007. Geological Records of the Lhasa–Qiangtang and Indo-Asian Collisions in the Nima Area of Central Tibet. *Geological Society of America Bulletin* 119 (7–8), 917–932. <https://doi.org/10.1130/B26033.1>.

Ketcham R.A., 2005. Forward and Inverse Modeling of Low-Temperature Thermochronometry Data. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 58 (1), 275–314. <https://doi.org/10.2138/rmg.2005.58.11>.

Ketcham R.A., Carter A., Donelick R.A., Barbarand J., Hurford A.J., 2007. Improved Modeling of Fission-Track Annealing in Apatite. *American Mineralogist* 92 (5–6), 799–810. <https://doi.org/10.2138/am.2007.2281>.

Kohn B.P., Gleadow A.J.W., Brown R.W., Gallagher K., Lorencak M., Noble W.P., 2005. Visualizing Thermotectonic

and Denudation Histories Using Apatite Fission-Track Thermochronology. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 58 (1), 527–565. <https://doi.org/10.2138/rmg.2005.58.20>.

Kohn B.P., Gleadow A.J.W., Brown R.W., Gallagher K., O'Sullivan P.B., Foster D.A., 2002. Shaping the Australian Crust over the Last 300 Million Years: Insights from Fission Track Thermotectonic and Denudation Studies of Key Terranes. *Australian Journal of Earth Science* 49 (4), 697–717. <https://doi.org/10.1046/j.1440-0952.2002.00942.x>.

Kominz M.A., 1984. Oceanic Ridge Volume and Sea-Level Change an Error Analysis. In: J.S. Schlee (Ed.), *Interregional Unconformities and Hydrocarbon Accumulation*. American Association of Petroleum Geologists, p. 109–127. <https://doi.org/10.1306/M36440C9>.

Lebedev V.I., Cherezov A.M., Kuzhuget K.S., Lebedeva M.F., Lebedeva S.V., Cherezova O.S., Chupikova S.A., 2001. Geological Formations, Deep-Seated Geodynamics and Seismicity of the Inner Asia Terrains (Tuva and Northwestern Mongolia). In: *The State and Exploration of Natural Resources of Tuva and Adjacent Regions of Central Asia*. Geocology of Natural Environment and Society. TuvIENR SB RAS, Kyzyl, p. 34–45 (in Russian) [Лебедев В.И., Черезов А.М., Кужугет К.С., Лебедева М.Ф., Лебедева С.В., Черезова О.С., Чупикова С.А. Геологические формации, глубинная геодинамика и сейсмичность террейнов Внутренней Азии (Тува и Северо-Западная Монголия) // Состояние и освоение природных ресурсов Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии. Геоэкология природной среды и общества. Кызыл: ТУВИКОПР СО РАН, 2001. С. 34–45].

Lebedev V.I., Duchkov A.D., Kamenskiy I.L., Chupikova S.A., Rychkova K.M., 2016. Seismogeology and Geothermics of the Territory of Tuva. *Vestnik of Tuva State University. Natural and Agricultural Sciences* 2, 112–126 (in Russian) [Лебедев В.И., Дучков А.Д., Каменский И.Л., Рычкова К.М., Чупикова С.А. Сейсмогеология и геотермика территории Тувы // Вестник Тувинского государственного университета. Естественные и сельскохозяйственные науки. 2016. Т. 2. С. 112–126].

Molnar P., Tapponnier P., 1975. Cenozoic Tectonics of Asia: Effects of a Continental Collision. *Science* 189 (4201), 419–426. <https://doi.org/10.1126/science.189.4201.419>.

Müller R.D., Sdrolias M., Gaina C., Roest W.R., 2008. Age, Spreading Rates, and Spreading Asymmetry of the World's Ocean Crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 9 (4), Q04006. <https://doi.org/10.1029/2007GC001743>.

Novikov I.S., Zhimulev F.I., Vetrov E.V., Savelieva P.Yu., 2019. Mesozoic and Cenozoic Geologic History and Surface Topography of the Northwestern Altai-Sayan Area. *Russian Geology and Geophysics* 60 (7), 781–792. <https://doi.org/10.15372/RGG2019054>.

Ovsyuchenko A.N., Butanayev Y.V., 2017. Seismic History of the Altai-Sayan Region and the 2011–2012 Earthquakes in Tuva. *The New Research of Tuva* 1, 162–180 (in Russian) [Овсюченко А.Н., Бутанаев Ю.В. Сейсмическая история Алтае-Саянского региона и место в ней тувинских землетрясений 2011–2012 гг. // Новые исследования Тувы. 2017. Т. 1. С. 162–180]. <https://doi.org/10.25178/nit.2017.1.11>.

Pitman W.C., 1978. Relationship between Eustacy and Stratigraphic Sequences of Passive Margins. *GSA Bulletin* 89 (9), 1389–1403. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1978\)89<1389:RBEASS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1978)89<1389:RBEASS>2.0.CO;2).

Schwab M., Ratschbacher L., Siebel W., McWilliams M., Minaev V., Lutkov V., Chen F., Stanek K., Nelson B., Frisch F., 2004. Assembly of the Pamirs: Age and Origin of Magmatic Belts from the Southern Tien Shan to the Southern Pamirs and Their Relation to Tibet. *Tectonics* 23 (4), TC4002. <https://doi.org/10.1029/2003TC001583>.

Sengör A.M.C., Natal'in B.A., Burtman V.S., 1993. Evolution of the Altaid Tectonic Collage and Paleozoic Crustal Growth in Eurasia. *Nature* 364, 299–307. <https://doi.org/10.1038/364299a0>.

Sklyarov E.V., Mazukabzov A.M., Mel'nikov A.I., 1997. Complexes of Metamorphic Cores of the Cordillera Type. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, 182 p. (in Russian) [Склярков Е.В., Мазукабзов А.М., Мельников А.И. Комплексы метаморфических ядер кордильерского типа. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. 182 с.].

Sorokin A.A., Zaika V.A., Kovach V.P., Kotov A.B., Xu W., Yang H., 2020. Timing of Closure of the Eastern Mongol – Okhotsk Ocean: Constraints from U-Pb and Hf Isotopic Data of Detrital Zircons from Metasediments along the Dzhanggy Transect. *Gondwana Research* 81, 58–78. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2019.11.009>.

Velichko A.A., 1999. The Common Features of the Cenozoic Landscape and Climate Changes in North Eurasia. In: *Climate and Landscape Changes over the Last 65 Ma (Cenozoic: from Paleocene to Holocene)*. GEOS, Moscow, p. 219–233 (in Russian) [Величко А.А. Общие особенности изменений ландшафтов и климата Северной Евразии в кайнозой. Изменение климата и ландшафтов за последние 65 миллионов лет (кайнозой: от палеоцена до голоцена). М.: ГЕОС, 1999. С. 219–233].

Vetrov E.V., 2016. The Mesozoic and Cenozoic Thermotectonic Evolution of the Southeastern Altai from the Apatite Fission-Track Analysis Data. PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Moscow, 200 p. (in Russian) [Ветров Е.В. Эволюция термотектонических событий Юго-Восточного Алтая в позднем мезозое и кайнозое по данным трековой термохронологии апатита: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. 2016. М., 200 с.].

Vetrov E.V., Buslov M.M., De Grave J., 2016. Evolution of Tectonic Events and Topography in Southeastern Gorny Altai in the Late Mesozoic – Cenozoic (Data from Apatite Fission Track Thermochronology). *Russian Geology and Geophysics* 57 (1), 95–110. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.01.007>.

Vetrov E.V., Chernykh A.I., Babin G.A., 2019. Early Paleozoic Granitoid Magmatism in the East Tannu-Ola Sector of the Tuvinian Magmatic Belt: Geodynamic Setting, Age, and Metallogeny. *Russian Geology and Geophysics* 60 (5), 492–513. <https://doi.org/10.15372/RGG2019047>.

Vetrov E.V., De Grave J., Kotler P.D., Kruk N.N., Zhigalov S.V., Babin G.A., Fedoseev G.S., Vetrova N.I., 2021a. Evolution of the Kolyvan-Tomsk Granitoid Magmatism (Central Siberia): Insights into the Tectonic Transition from Post-Collision to

Intraplate Settings in the Northwestern Part of the Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research* 93, 26–47. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2021.01.008>.

Vetrov E.V., De Grave J., Vetrova N.I., 2022. The Tectonic Evolution Paleozoic Tannuola Terrane of Tuva in the Mesozoic and Cenozoic: Data of Fission-Track Thermochronology of Apatite. *Geotectonics* 56, 471–485. <https://doi.org/10.1134/S0016852122040094>.

Vetrov E.V., De Grave J., Vetrova N.I., Zhimulev F.I., Nachtergaele S., Van Ranst G., Mikhailova P.I., 2020. Tectonic History of the South Tannuol Fault Zone (Tuva Region of the Northern Central Asian Orogenic Belt, Russia): Constraints from Multi-Method Geochronology. *Minerals* 10 (1), 56. <https://doi.org/10.3390/min10010056>.

Vetrov E.V., De Grave J., Vetrova N.I., Zhimulev F.I., Nachtergaele S., Van Ranst G., Mikhailova P.I., 2021b. Tectonic Evolution of the SE West Siberian Basin (Russia): Evidence from Apatite Fission Track Thermochronology of Its Exposed Crystalline Basement. *Minerals* 11 (6), 604. <https://doi.org/10.3390/min11060604>.

Vladimirov V.G., Vladimirov A.G., Gibsher A.S., Travin A.V., Rudnev S.N., Shemelina I.V., Barabash N.V., Savinykh Ya.V., 2005. Model of the Tectonometamorphic Evolution for the Sangilen Block (Southeastern Tuva, Central Asia) as a Reflection of the Early Caledonian Accretion-Collision Tectogenesis. *Doklady Earth Sciences* 405, 1159–1165.

Wagner G.A., Van den Haute P., 1992. *Fission Track Dating*. Springer, Dordrecht, 285 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-2478-2>.

Wang B., Cluzel D., Shu L., Faure M., Charvet J., Chen Y., Meffre S., de Jong K., 2009. Evolution of Calc-Alkaline to Alkaline Magmatism through Carboniferous Convergence to Permian Transcurrent Tectonics, Western Chinese Tianshan. *International Journal of Earth Sciences* 98, 1275–1298. <https://doi.org/10.1007/s00531-008-0408-y>.

Wilhem C., Windley B.F., Stampfli G.M., 2012. The Altaids of Central Asia: A Tectonic and Evolutionary Innovative Review. *Earth-Science Reviews* 113 (3–4), 303–341. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.04.001>.

Windley B.F., Alexeiev D., Xiao W., Kröner A., Badarch G., 2007. Tectonic Models for the Accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of the Geological Society of London* 164 (1), 31–47. <https://doi.org/10.1144/0016-76492006-022>.

Xiao W., Windley F., Allen B., Han C., 2013. Paleozoic Multiple Accretionary and Collisional Tectonics of the Chinese Tianshan Orogenic Collage. *Gondwana Research* 23 (4), 1316–1341. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.01.012>.

Yang Y.-T., Song C.-C., He S., 2015. Jurassic Tectonostratigraphic Evolution of the Junggar Basin, NW China: A Record of Mesozoic Intraplate Deformation in Central Asia. *Tectonics* 34 (1), 86–115. <https://doi.org/10.1002/2014TC003640>.

Yarmolyuk V.V., Lebedev V.V., Sugorakova A.M., 2001. The Eastern Tuva Region of Recent Volcanism in Central Asia: Periods, Products and Types of Volcanic Activity. *Journal of Volcanology and Seismology* 3, 3–32 (in Russian) [Ярмолюк В.В., Лебедев В.И., Сугоракова А.М. Восточно-Тувинский ареал новейшего вулканизма Центральной

Азии: этапы, продукты и характер вулканической активности // Вулканоология и сейсмология. 2001. Т. 3. С. 3–32].

Yin A., Harrison T.M., 2000. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Earth and Planetary Sciences Annual Review* 28, 211–280. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.211>.

Zhimulev F.I., Vetrov E.V., Novikov I.S., Van Ranst G., Nachtergaele S., Dokashenko S.A., De Grave J., 2021. Mesozoic Intracontinental Orogeny in the Tectonic History of the Kolyvan'-Tomsk Folded Zone (Southern Siberia): A Synthesis of Geological Data and Results of Apatite Fission Track Analysis. *Russian Geology and Geophysics* 62 (9), 1006–1020. <https://doi.org/10.2113/RGG20204172>.

Zhu D.-C., Li S.-M., Cawood P.A., Wang Q., Zhao Z.-D., Liu S.-A., Wang L.-Q., 2016. Assembly of the Lhasa and Qiangtang

Terranes in Central Tibet by Divergent Double Subduction. *Lithos* 245, 7–17. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.06.023>.

Zhu D.-C., Zhao Z.D., Niu Y., Dilek Y., Hou Z.Q., Mo X.X., 2013. The Origin and Precenozoic Evolution of the Tibetan Plateau. *Gondwana Research* 23 (4), 1429–1454. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.02.002>.

Zonenshayn L.P., Kuzmin M.I., Nataпов L.M., 1990. Tectonics of Lithospheric Plates of the USSR. Book 1. Nedra, Moscow, 328 p. (in Russian) [Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натопов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. М.: Недра, 1990. Кн. 1. 328 с.].

Zorin Y., 1999. Geodynamics of the Western Part of the Mongolia-Okhotsk Collisional Belt, Trans-Baikal Region (Russia) and Mongolia. *Tectonophysics* 306 (1), 33–56. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00042-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00042-6).